

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт информационных и телекоммуникационных технологий

Кафедра автоматизация и управление

Зиявдуновой Дильназ Тохтахуновне
Лоенко Дмитрию Евгеньевичу
Калымбет Ақтілеку Оразханұлы

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Синтез и исследование интеллектуальных алгоритмов управления процессом получения P_2O_5 в условиях завода НДФЗ»

5B070200 - Автоматизация и управление

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт информационных и телекоммуникационных технологий

Кафедра автоматизация и управление



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Синтез и исследование интеллектуальных алгоритмов управления процессом получения P_2O_5 в условиях завода НДФЗ»

По специальности 5В070200 - Автоматизация и управление

Выполнили
Зиявдунова Д., Лоенко Д.,
Қалымбет А.

Научный руководитель
д-р. техн. наук, профессор
_____ Б. А. Сулейменов
(подпись)

«__» _____ 2019 г.

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт информационных и телекоммуникационных технологий

Кафедра автоматизация и управление

5B070200 - Автоматизация и управление



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АиУ

д-р. техн. наук, профессор

Б.А. Сулейменов

« » _____ 2019 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Обучающимся Зиявдуновой Д., Лоенко Д., Калымбет А.

Тема «Синтез и исследование интеллектуальных алгоритмов управления процессом получения P_2O_5 в условиях завода НДФЗ».

Утвержден Ученым советом института № 41211 от " 14 " мая 2019 г.

Срок сдачи законченного проекта: " 16 " мая 2019 г.

Исходные данные дипломному проекту: Основы искусственного интеллекта, техническая литература, данные преддипломной практики.

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов или краткое содержание дипломной работы: а) характеристика производства б) сбор и получение данных для матрицы ПФЭ; в) разработка интеллектуальной системы для процессов сжигания, охлаждения, осаждения; г) проверка модели на адекватность.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): технологическая схема производства сухого P_2O_5 ; таблицы матриц планирования ПФЭ; схема получения сухого P_2O_5 ; результаты интеллектуального моделирования управления.

Рекомендуемая основная литература: техническая литература по интеллектуальным системам и математическому моделированию из 18 наименований.

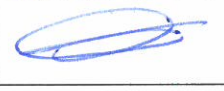
ГРАФИК

подготовки дипломного проекта




Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Технологический раздел	1 марта 2019 г.	
Специальный раздел	20 марта 2019 г.	
Раздел синтеза	30 апреля 2019 г.	
Раздел исследования	30 апреля 2019 г.	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект с указанием относящихся к ним разделов проекта

Наименования разделов	Научный руководитель, консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	д.т.н., Б. А. Сулейменов	28.04.2019	
Специальный раздел	д.т.н., Б. А. Сулейменов	28.04.2019	
Раздел синтеза	д.т.н., Б. А. Сулейменов	25.04.2019	
Раздел исследования	д.т.н., Б. А. Сулейменов	25.04.2019	
Нормоконтролер	к.т.н., Н.С. Сарсенбаев	05.05.2019	

Научный руководитель _____ Сулейменов Б. А.
(подпись)

Задание принял к исполнению бакалавра, обучающиеся  Зиявдунова Д.
 Лоенко Д.
 Калымбет А.
(подпись)

Дата " ____ " _____ 2019 г.

Протокол анализа Отчета подобия заведующего кафедрой

Заведующий кафедрой заявляет, что ознакомился (-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой появления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Авторы: Зиявдунова Д., Лоенко Д., Калымбет А.

Название: «Синтез и исследование интеллектуальных алгоритмов управления процессом получения P_2O_5 в условиях завода НДФЗ»

Координатор: Сәрсенбаев Н.С.

Коэффициент подобия 1: 0,5%

Коэффициент подобия 2: 0,1%

Тревога: 25

После анализа отчета подобия заведующий кафедрой/начальник структурного подразделения констатирует следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, работа признается самостоятельной и допускается к защите;
- обнаруженные в работе не обладают признаками плагиата, но из чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, работа не допускается к защите.

Обоснование:

к защите допущена

05.05.2019

Дата

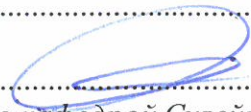
Подпись заведующего кафедрой Сулейменов Б.А

Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:

к защите допустить

05.05.2019

Дата



Подпись заведующего кафедрой Сулейменов Б. А

Raport podobieństwa



Uczelnia:

Satbayev University

Tytuł:

Синтез и исследование интеллектуальных алгоритмов управления процессом получения P2O5 в условиях завода НДФЗ

Autor:

Лоенко, Калимбет, Зиявдунова.doc

Promotor:

Айтуар Сулейменов

Data Raportu Podobieństwa:

2019-05-16 10:14:44

Współczynnik podobieństwa 1: ?

0,5%

Współczynnik podobieństwa 2: ?

0,1%

Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения в отношении работы:

Авторы: Зиявдунова Д., Лоенко Д., Калымбет А.

Название: «Синтез и исследование интеллектуальных алгоритмов управления процессом получения P_2O_5 в условиях завода НДФЗ»

Координатор: Сәрсенбаев Н.С.

Коэффициент подобия 1: 0,5%

Коэффициент подобия 2: 0,1%

Тревога: 25

После анализа Отчета подобия констатирую следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе не обладают признаками плагиата, но из чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите.

Обоснование:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Дата

Подпись Научного руководителя

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На дипломный проект

(наименование вида работы)

Зиявдуновой Дильназ, Лоенко Дмитрия, Қалымбет Ақтілека

(Ф.И.О. обучающегося)

5B070200-Автоматизация и управление

(шифр и наименование специальности)

Тема: Синтез и исследование интеллектуальных алгоритмов управления процессом получения P2O5 в условиях завода НДФЗ

Тема дипломного проекта является актуальной и посвящена к разработке интеллектуальных алгоритмов управления процессом получения фосфорного ангидрида.

Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованной литературы.

Работа начинается с описания объекта исследования и анализа похожих технологий в мире.

Вторая глава включает в себя анализ и описание экспертных данных полученных от опытных технологов. Проведен анализ существующих параметров для сжигания, охлаждения и осаждения. Построена матрица ПФЭ для каждого из процессов.

Для создания интеллектуальных алгоритмов выбраны методы искусственного интеллекта нечеткой логики и нейро-сетевой структуры.

Для реализации имитационного моделирования выбран программно-технический комплекс Matlab с применением компонента FuzzyLogicToolbox.

Дипломная работа Зиявдуновой Д., Лоенко Д., Қалымбет А. является самостоятельной, целостной и выполнена в соответствии с требованиями ГАК, заслуживает высокой оценки и может быть допущена к защите.

В процессе работы авторы проекта показали себя дисциплинированными и исполнительными.

Считаю, что дипломная работа заслуживает оценки “отлично”, а Зиявдунова Д., Лоенко Д., Қалымбет А. присвоения академической степени “бакалавр” по специальности 5B070200 - “Автоматизация и управления”.

Научный руководитель

д-р.техн.наук.профессор

(должность, уч. степень, звание)

Сулейменов Б. А.

(подпись)

« 05 » 05 2019г.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жобада фосфор ангидридін алу процесін басқарудың зияткерлік алгоритмдерін синтездеу және зерттеу мақсаты қарастырылған.

Дипломдық жоба төрт бөлімнен тұрады: технологиялық бөлім, арнайы бөлім, зерттеу бөлімі, үлгіні адекваттылыққа бағалау бөлімі.

Алғашқы екі тарауда ЖЖФЗ өндірісін толық талдау және сараптамалық деректерді алу жүргізілген. Сараптамалық деректер зауытта жұмыс істеген тәжірибелі технолог қызметкерлерін сұрау арқылы алынды. ПФЭ жоспарлау матрицасын алу үшін бірқатар зерттеулер өткізілді.

Үшінші, төртінші, бесінші тарауда Matlab ортасында зияткерлік алгоритмдерді әзірлеу жүргізілді. Өртеу, салқындату, тұндыру процестері нейро-желілік құрылым құру үшін өзінің жоспарлау матрицасына сәйкестелінген. Нейрондық желілер алгоритмдерін құру үшін нейрондар оқуға ұшырады. Оқыту барысында нейрондық желілер дұрыс оқытылатыны белгілі болды.

Алтыншы тарау үлгіні адекваттылыққа бағалау әдістеріне арналған. Бұл мақсатқа жету үшін тақ логикада, нейрондық желіде және нейро-тақ логикада зерттеулер жүргізілді. Әр айнымалы нәтижелер туралы графиктер зерттелді және ұсынылды. Осы зерттеулердің мәліметтері бойынша зияткерлік алгоритмдермен жасалған модель адекваттылық шарттарын қанағаттандырады деп айтуға болады.

Зияткерлік жүйелерді қолдану арқылы процеске қажетті талаптарға қол жеткізу туралы қорытынды жасалды.

ANNOTATION

In this thesis project addresses the task of synthesis and research of intelligent algorithms for managing the process of obtaining phosphoric anhydride. The graduation project consists of four chapters: the technological part, a special section, a section on research, a section on model evaluation for adequacy.

In the first two chapters, a complete analysis of the production of NDFZ and the acquisition of expert data are carried out. Expert data was obtained by interviewing employees of experienced technologists who worked at the plant. A number of studies were carried out to obtain the PFE planning matrix.

The third chapter is the development of intelligent algorithms in Matlab. The combustion, cooling, deposition processes have their own planning matrix for creating a neural network structure. To create algorithms, neural networks underwent training. During the training, it became known that neural networks are trained adequately.

The fourth chapter is devoted to methods for assessing the adequacy of the model. To achieve this goal, research on fuzzy logic, neural network and neuro-fuzzy logic has been conducted. Each of the variables was studied and provided with graphs of the results. According to these studies, we can say that the model created by intelligent algorithms satisfies the conditions of adequacy.

It is concluded that the achievement of the desired requirements for the process with the use of intelligent systems.

АННОТАЦИЯ

В данном дипломном проекте рассматривается задача синтеза и исследования интеллектуальных алгоритмов управления процессом получения фосфорного ангидрида. Дипломный проект состоит из четырех глав: технологическая часть, специальный раздел, раздел по исследованию, раздел по оценке модели на адекватность.

В первых двух главах производится полный анализ производства НДФЗ и получение экспертных данных. Экспертные данные были получены путем опрашивания сотрудников опытных технологов, работавших на заводе. Для получения матрицы планирования ПФЭ были проведены ряд исследований.

В третьей, четвертой и в пятой главе идет разработка интеллектуальных алгоритмов в среде Matlab. Процессы сжигания, охлаждения, осаждения имеют свою матрицу планирования для создания нейро-сетевой структуры. Чтобы создать алгоритмы нейронные сети подверглись обучению. В ходе обучения стало известно, что нейронные сети обучаются адекватно.

Шестая глава посвящена методам оценки модели на адекватность. Для достижения этой цели были проведены исследования на нечеткой логике, нейронной сети и нейро-нечеткой логике. Каждая из переменных была изучена и предоставлены графики о результатах. По данным этих исследований можно сказать что модель, созданная интеллектуальными алгоритмами, удовлетворяет условиям адекватности.

Сделан вывод о достижении желаемых требований к процессу с применением интеллектуальных систем.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	11
1 Технология производства	12
1.1 Характеристика производства	12
1.2 Физико-химические особенности фосфорного ангидрида	13
1.3 Описание технологического процесса	15
1.4 Описание технологической схемы	15
1.5 Общий подход к созданию интеллектуальных систем управления технологическими процессами	18
1.6 Концепция синтеза интеллектуальных алгоритмов управления технологическими процессами получения P_2O_5	24
2 Сбор экспертных заключений опытных операторов и формирование матриц планирования ПФЭ для моделирования управления процессами: сжигания, охлаждения и осаждения сухого P_2O_5	27
2.1 Расчет материального и теплового балансов производства ангидрида фосфора	27
2.2 Нормы технологических режимов в цехе №6	31
2.3 Автоматический контроль технологических режимов в цехе №6	32
2.4 Учет возможных аварийных ситуаций в цехе №6	33
2.5 Формирование матрицы ПФЭ для синтеза интеллектуальных алгоритмов управлением процессом сжигания	34
2.6 Формирование матрицы ПФЭ для синтеза интеллектуальных алгоритмов управлением процесса охлаждения	37
2.7 Формирование матрицы ПФЭ для синтеза интеллектуальных алгоритмов управлением процесса осаждения	38
3 Синтез нечеткой модели управления процессами сжигания, охлаждения и осаждения	40
3.1 Синтез нечеткой модели управления процессом сжигания	40
3.2 Синтез нечеткой модели управления процессом охлаждения	42
3.3 Синтез нечеткой модели управления процессом осаждения	43
4 Синтез нейро-сетевой модели управления процессами сжигания, охлаждения и осаждения	46
4.1 Синтез нейро-сетевой модели управления процессом сжигания	46
4.2 Синтез нейро-сетевой модели управления процессом охлаждения	48
4.3 Синтез нейро-сетевой модели управления процессом осаждения	50
5 Синтез нейро-нечеткой модели управления процессами сжигания, охлаждения и осаждения	52
5.1 Синтез нейро-нечеткой модели управления процессом сжигания	52
5.2 Синтез нейро-нечеткой модели управления процессом охлаждения	55
5.3 Синтез нейро-нечеткой модели управления процессом осаждения	58
6 Исследование полученных моделей на адекватность	62
6.1 Оценка адекватности моделей управлениями процессами сжигания, охлаждения и осаждения	62
6.2 Оценка моделей управления на адекватность процессам сжигания	62

6.3 Оценка моделей управления на адекватность процессам охлаждения	67
6.4 Оценка моделей управления на адекватность процессам сжигания	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	78

ВВЕДЕНИЕ

В промышленном производстве во всем мире сейчас огромную роль занимает автоматизация. Автоматизирование производства на сегодняшний день – один из основных течений научно-технического процесса, что является главным способом изменить трудовую деятельность и усовершенствовать концепцию управления, сделать деятельность работников наиболее полезным, и менее травмоопасным. Автоматизация в настоящее время осуществляется с поддержкой гибких производственных концепций, формирующих настоящие предпосылки с целью перехода к управлению без вмешательства человека. Эта деятельность позволяет существенно увеличить производительность управления современного промышленного производства. Усложняется специальное техническое оборудование и разнообразные технологические движения, увеличиваются различные условия и подходы к качеству, надёжности издаваемой продукции. На сегодняшний день управление научно-техническими комплексами в целом нереально без средств автоматизации. Всё данное содействует увеличению производительности работы.

В автоматизации много различных направлений. Один из них на данный момент времени является искусственный интеллект. Искусственный интеллект приобретает большую популярность, так как, он дает возможности при производстве различных вещей. К тому же эти системы позволяют более рационально использовать минеральные ресурсы нашей страны, экономить тепловую и электрическую энергию, снизить экологические проблемы, повысить экономическую отдачу от производства.

Множественные изучения демонстрируют, что интеллектуальные технологии (ИТ) можно применять при создании непосредственно модели оптимального управления процессом, а не модели самого технологического процесса. Интеллектуальные технологии дают возможность разрабатывать создавать алгоритмы управления, в отличие от традиционной цепочки.

Применение ИТ дает решать аналогичные задачи сразу же, как показал опыт достаточно успешно. Методы искусственного интеллекта подразумевают использование знаний, опыта и интуиции людей-экспертов, хорошо знакомых с данной областью. Здесь используется «эффект готовых знаний». Опытные-технологи за время длительной работы обучились вести технологический процесс в оптимальных режимах при различных ситуациях.

Посылка «готовых знаний» от людей-экспертов в базу знаний интеллектуальной системы существенно упрощает создание данных систем, а их эксплуатация позволяет исключить эффект «человеческого фактора».

1 Технология производства

1.1 Характеристика производства

Сырьем для получения сухого P_2O_5 является желтый фосфор. Желтый фосфор - твердое вещество с удельным весом $1,82 \text{ г/см}^3$. На холоде хрупок, при температуре выше 15°C становится мягким и легко режется ножом, при температуре $44,2^\circ\text{C}$ плавится, при 280°C – кипит. В расплавленном состоянии представляет подвижную маслообразную жидкость. На воздухе самовоспламеняется.

Производство фосфорного ангидрида из фосфора.

Введено в эксплуатацию в 2014 году.

Исходными данными для проектирования явились: проект ТОО «Казниихимпроект».

Пилотная установка по производству фосфорного ангидрида мощностью 50 кг/час по фосфору с утилизацией тепла сгорания фосфора и получением фосфорного ангидрида P_2O_5 (P_4O_{10}) «товарного». Данная опытно-промышленная установка (ОППУ) будет ориентирована на утилизацию тепла реакции сгорания фосфора с получением товарного кристаллического фосфорного ангидрида $P_2O_5(P_4O_{10})$. Оптимальная мощность, предлагаемой ОПУ:

- 50 кг/час (1.2 т/сутки) по фосфору;
- 2.5 т/сутки по P_2O_5 (P_4O_{10}) кристаллического.

Настоящий проект предусматривает реконструкцию башенного отделения с размещением в существующем отделении цеха №6 оборудования с максимальным использованием строительных конструкций.

Рабочая документация выполнена проектно-конструкторским отделом ЖФ ТОО «Казфосфат» (НДФЗ).

Категория производства по технико-экономическому уровню – 1.

Обоснование основных технологических решений:

- внедрение современной энергосберегающей технологии, не требующей больших капиталовложений.
- наличие производственного помещения и обученного персонала

В перспективе, ожидаемый экономический эффект при внедрении данной технологии получения ортофосфорной кислоты и товарного $P_2O_5(P_4O_{10})$ на одной технологической линии производительностью 2.5 т/час составит:

- сокращение расхода природного газа на заводской котельной, вырабатывающий пар и горячую воду для технологических и хоз.бытовых нужд в количестве $9 \text{ млн. м}^3/\text{год}$;
- дополнительная выработка электроэнергии 7 МВт/час или 55440 МВт/год ;

– экономия электроэнергии как минимум на 50%[2].

1.2 Физико-химические особенности фосфорного ангидрида

Взаимодействие фосфора с кислородом в зависимости от условий ведёт к образованию различных продуктов. При сгорании фосфора в избытке кислорода (или воздуха) получается его высшей оксид – фосфорный ангидрид (P_2O_5). Напротив, горение при недостатке воздуха или медленное окисление даёт главным образом фосфористый ангидрид (P_2O_3).

Изображает собой белый порошок, очень ядовит. Он чрезвычайно энергично притягивает влагу и поэтому часто применяется в качестве осушителя газов. Вместе с тем P_2O_5 во многих случаях отнимает от различных веществ также химически связанную воду, чем пользуются при получении некоторых соединений. Теплота образования P_2O_5 из элементов составляет 1490 кДж/моль. определение молекулярного веса фосфорного ангидрида в парах указывает на удвоенную формулу – P_4O_{10} .

Твёрдый фосфорный ангидрид – (P_2O_5) п – известен в трёх кристаллических модификациях. Первая, по виду похожа на снег, слагается из отдельных молекул P_4O_{10} , связанных друг с другом лишь межмолекулярными силами, она довольно легко возгоняется (т. возг. $359^\circ C$).

При нагревании этой формы до $400^\circ C$ в запаянной трубке получается полимерная форма, образованная бесконечными слоями тетраэдров PO_4 с общими (тремя из четырёх) атомами кислорода.

Длительное выдерживание данной формы в запаянной трубке при $450^\circ C$ сопровождается её переходом в другую полимерную форму. Это наиболее устойчивая модификация фосфорного ангидрида.

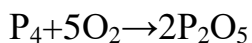
Фосфорный ангидрид, поступающий в продажу, обычно представляет собой смесь первой и второй форм, более или менее загрязнённую примесями воды и продуктов неполного сгорания фосфора. Очистка P_2O_5 осуществляется его возгонкой в быстром токе сухого кислорода (причём получается первая форма). Чистый фосфорный ангидрид совершенно не имеет запаха.

Из сопоставления видно, что по интенсивности осушающего действия P_2O_5 далеко превосходит все остальные вещества. Однако при пользовании техническим продуктом следует учитывать возможность загрязнения очищаемых газов фосфористым водородом (из-за наличия в P_2O_5 примеси низших оксидов фосфора). Во многих случаях не исключена также возможность протекания при сушке химических процессов. [1]

При высоких концентрациях фосфорного ангидрида в системе P_2O_5 - H_2O имеют место сложные равновесия между различными кислотами фосфора. В расплавленном (или стеклообразном) состоянии ни одна из кислот не является индивидуальным химическим соединением. По другим данным, рассматриваемая система состоит из смеси H_3PO_4 с различными линейно полимеризованными фосфорными кислотами, имеющими в молекуле до 10 и

даже более атомов фосфора. Кипящая при 869°C азеотропная смесь фосфорного ангидрида с водой содержит 92% P₂O₅ и приблизительно отвечает составу 3P₂O₅·2H₂O.

Окисление фосфора кислородом воздуха является цепной реакцией и может проходить со взрывом:



Фосфорный ангидрид (пятиокись фосфора) P₂O₅(P₄O₁₀)- молекулярный вес 142 (111) у.е.-важнейший окисел фосфора. Фосфорный ангидрид (P₂O₅) - белое кристаллическое или аморфное вещество. Температура плавления 563°C, температура возгонки 360°C, плотность 2,39. На фосфорных заводах P₂O₅ образуется при горении фосфора в избытке кислорода в виде белого удушливого дыма; при взаимодействии с водой он образует фосфорную кислоту. Ядовитость его зависит от примесей фосфора и других соединений его неполного окисления. Он образуется в результате горения фосфора при недостатке воздуха или при медленном окислении фосфора при обычных температурах. Это белая, похожая на воск, кристаллическая масса. Он ядовит. Температура плавления 24°C, температура кипения 175°C. При нагревании его на воздухе образуется фосфорный ангидрид [5].

Пятиокись фосфора устойчива до очень высоких температур. При нагревании твердой P₂O₅(P₄O₁₀) могут происходить ее фазовые превращения и переход из одного агрегатного состояния в другое, но распад на окислы другого типа не происходит.

Фосфорный ангидрид представляет собой белый кристаллический порошок (5-50мкм), отличающийся исключительной гигроскопичностью.

Теплота образования P₂O₅ из фосфора (ккал/моль):

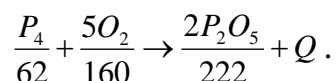
Форма P ₂ O ₅	ΔH°298
Твердая	720
Н-форма(твердая)	717±5
Газообразная	687±5

Мольная теплоемкость газообразного фосфорного ангидрида (при 631-1371°K) составляет Ср=73.6±кал/(моль*град), удельная теплоемкость при (при 631-1371°K) равна ср=0.259кал/(г*град).

Фосфорный ангидрид используется как осушитель газов и жидкостей (сильное водоотнимающее средство). В небольших количествах присутствует в некоторых удобрениях. Качество фосфорного ангидрида должно удовлетворять требованиям основных его потребителей (нефтепереработка, промышленность основного органического синтеза и ряд других химических производств) [10].

1.3 Описание технологического процесса

Процедура получения фосфорного ангидрида из фосфора состоит из окисления (сжигание) фосфора по реакции:



Окисление (сжигание) фосфора по реакции до P_2O_5 без присутствия в нем низших окислов фосфора можно получить только при температурах выше 773-873°K и избытке кислорода не менее 30%.

Исходное сырье для получения фосфорного ангидрида приведены в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Характеристика исходного сырья

Наименование сырья, материалов и полупродуктов	ГОСТ, ОСТ, ТУ, регламент или методика на подготовку сырья	Показатели, обязательные для проверки	Регламентируемые показатели с допустимыми отклонениями
1	2	3	4
Фосфор желтый	ГОСТ8986-82(СТ СЭВ3371-81)	Внешний вид	Парафин образная масса от светло-желтого до зелено-желтого цвета
		Массовая доля фосфора, % не менее	99.9
		Массовая доля шлама, % не более	отсутствие
Сжатый осушенный воздух		Пары воды, г/м ³	Не более 0.2
Дистиллированная вода		Жесткость, мг*экв/л,	не менее: 0,5

В существующих производствах ТФК (термической фосфорной кислоты) обе эти стадии проводят в одном аппарате – башне сжигания. В ОППУ эти стадии разделены по различным аппаратам. Сжигание элементарного фосфора проводится в камере сжигания (топке) с последующим охлаждением продуктов сгорания с целью утилизации тепла сгорания фосфора в котле-утилизаторе и осаждение кристаллов P_2O_5 в газоходе–экономайзере

Сжигание фосфора - гетерогенный экзотермический процесс, протекает по уравнению:



Степень окисления фосфора зависит от температуры в зоне горения и от скорости диффузии сжатого воздуха к поверхности жидкого фосфора. Чтобы обеспечить полноту сгорания и исключить возможность образования низших окислов фосфора, процесс ведут при температуре 1000°С - 1400°С и двукратном избытке воздуха.

1.4 Описание технологической схемы

Со склада желтого фосфора цеха №5 по обогреваемым трубопроводам фосфор поступает в дозаторное отделение. Всего в дозаторном отделении установлено 8 хранилищ-дозаторов, емкостью 32 м³ каждое, по 4 емкости на каждую нитку. Хранилища-дозаторы снабжены лопастными мешалками, которые работают периодически и создают гомогенную смесь. Для поддержания фосфора в расплавленном состоянии дозаторы выполнены с рубашкой, по которым циркулирует вода с температурой 70°-90° С.

Температура и давление внутренней среды в дозаторах контролируются приборами. Вода для обогрева рубашек греется в сборнике паром, а затем насосами подается в рубашки дозаторов. Фосфор с дозатора, после предварительного там отстаивания не менее 2 часа, поступает по системе трубопроводов в расходный сборник (монжус). Из расходного сборника по обогреваемому фосфоропроводу подается в камеру сгорания фосфора поз.402. Перед сжиганием фосфор проходит через испаритель, размещенный внутри камеры сгорания. Испарение фосфора происходит за счет тепла его же сгорания. Сжигание фосфора происходит путем его распыления сжатым воздухом с давлением не менее 0,45 МПа. Сжатый воздух перед подачей на форсунку подогревается в теплообменнике поз.Т-05 до температуры не менее 353°К, которая контролируется прибором поз.Т-170₇.

Давление сжатого воздуха, подаваемого к форсунке, контролируется и сигнализируется на ЦПУ прибором. При понижении давления автоматически отключается подача фосфора в башню сжигания.

Сжигание парообразного фосфора исключает необходимость применения форсунок для его распыливания и сжатого воздуха. В качестве дутья для сжигания фосфора используются рециркуляционные газы после циклона –осадителя с подпиткой их техническим кислородом и корректировкой состава осушенным сжатым воздухом, с целью доведения концентрации кислорода в дутье до 21%об. Расход сжатого воздуха при этом не превышает 0.0314м³/кг сжигаемого фосфора. Использование рециркуляционных газов с подпиткой их кислородом исключает необходимость в осушке дутья, так как влагосодержание рециркуляционных газов очень низкое -0.00001г/м³. Дутье с таким низким влагосодержанием не создает условий для образования при сжигании фосфора паров полифосфорных и фосфорных кислот, и охлаждение таких топочных газов не приведет к конденсации кислот на холодных (охлаждаемых) поверхностях и к туманообразованию.

Ввод дутья в камеру сгорания фосфора, производится так же тангенциально. Камера сгорания фосфора выполнена из нержавеющей стали и имеет водоохлаждаемую рубашку для защиты наружных стенок камеры от воздействия высоких температур (1912°С-1850°С). В качестве охлаждающей воды используется циркуляционная (хозяйственная питьевая) вода.

Снижение температуры в камере сгорания фосфора достигается следующими конструктивными особенностями:

- размещение во внутренней полости камеры сгорания теплообменных поверхностей;

- ввод паробразного фосфора и дутья производится по длине камеры в 2-х точках, причем, в первую точку вводится 40% фосфора и 60% дутья. Во вторую - оставшееся количество фосфора и дутья.

Газы, образующиеся в камере сгорания фосфора, после передачи тепла охлаждающей воде, с температурой 1570°C-1590°C поступают в котел утилизатор Г-образной конструкции.

Внутри вертикальной, наиболее горячей и длинной части аппарата расположены змеевики с охлаждаемой водой и в нижней, горизонтальной части котла, также расположены змеевики с охлаждаемой водой. Охлаждение газов от сгорания фосфора в котле-утилизаторе производится до температуры 450°C-480°C и образовавшийся фосфорный ангидрид находится в газообразном состоянии. Внутренняя поверхность котла-утилизатора футерована огнеупорным шамотным кирпичом, а в промежутке между корпусом аппарата и кирпичом находится шамотный порошок.

Из котла-утилизатора газы поступают в газоход-экономайзер с водоохлаждаемой рубашкой. Здесь газы подвергаются дальнейшему охлаждению до температуры 160-180°C с целью осаждения фосфорного ангидрида в кристаллическом виде P_2O_5 . Охлаждение газов производится циркуляционной водой из «рубашки» камеры сгорания.

После газохода-экономайзера газы с кристаллическим P_2O_5 поступают в циклон-осадитель. В нем под действием центробежных сил кристаллический P_2O_5 отделяется от газовой фазы и собирается в бункере циклона-осадителя. Газы направляются к вентилятору и далее возвращаются в камеру сгорания.

Незначительная часть газов отбирается на продувку для предотвращения увеличения в них количества азота и сохранения постоянного объема дутья. Кристаллический P_2O_5 из бункера циклона-осадителя через шлюзовой затвор поступает на течку, подающий фосфорный ангидрид на фасовку.

Основной особенностью в производстве сухого P_2O_5 является отвод большого количества тепла, выделяемого при сжигании фосфора. В зависимости от метода отвода тепла различают циркуляционный и испарительный способы производства фосфорного (и полифосфорной) ангидрида, возникшие одновременно в 30-х годах и подвергшиеся в дальнейшем значительному усовершенствованию.

На рисунке 1.1 представлена технологическая схема получения сухого P_2O_5 с применением одного аппарата (башни) для сжигания фосфора и поглощения фосфорного ангидрида.

Стоки, образующиеся в процессе работы ОППУ, погружным насосом из приемка перекачивается в существующий сборник кислых стоков. И далее по существующей схеме стоки перекачивают в цех №7 на нейтрализацию.

1.5 Общий подход к созданию интеллектуальных систем управления технологическими процессами

Как демонстрирует анализ работ в области теории и практики искусственного интеллекта в данное время созданы довольно результативные технологии искусственного интеллекта, которые употребляются в различных практических приложениях, в том числе и в управлении. Однако большинство авторов используют эти технологии для разработки, исследования и внедрения локальных систем управления, предназначенных в основном для решения задач стабилизации некоторых переменных технологического процесса.

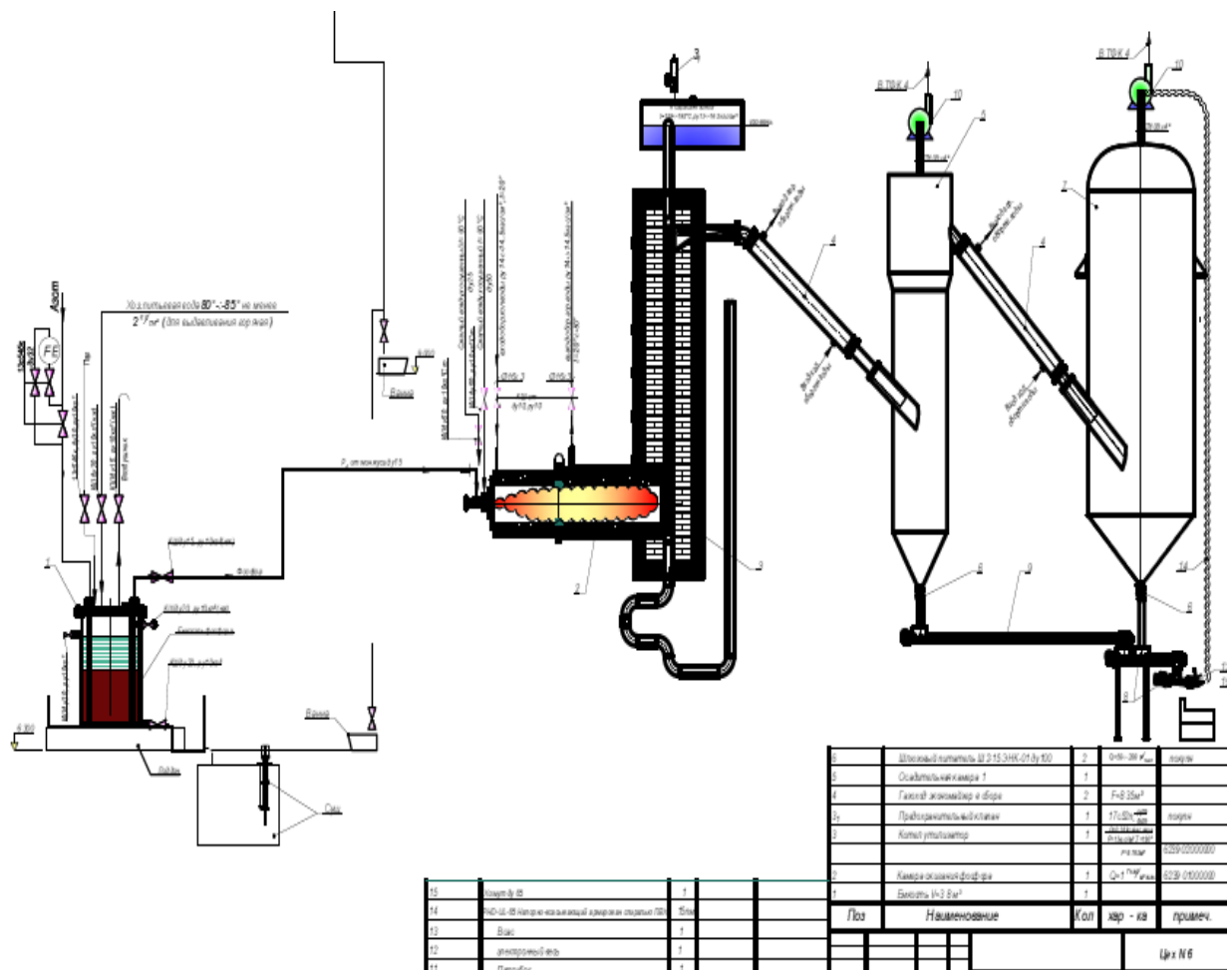


Рисунок 1.1 - Технологическая схема производства сухого P_2O_5

В ходе написания дипломной работы не удалось найти в литературе примеров использования интеллектуальных технологий (ИТ) для создания систем оптимального управления технологическими процессами. Как уже отмечалось выше, традиционные методы разработки достаточно адекватных

математических моделей процессов не позволили на практике внедрить какую-либо заметную систему управления (по крайней мере, в Казахстане).

В связи с чем, в настоящей работе была поставлена цель дальнейшего совершенствования и развития информационных технологий с учетом особенностей управления технологическими процессами. Для достижения этой цели, на основе обобщения опыта кафедры автоматизации и управления КазНИТУ по разработке интеллектуальных систем управления разработаны инструментальные средства интеграции моделей управления из Simulink в промышленные контроллеры [10].

Анализ некоторых публикаций показал, что ИТ можно использовать при разработке непосредственно модели оптимального управления процессом, а не модели самого технологического процесса. То есть рассматриваемые технологии позволяют разрабатывать сразу же алгоритмы управления, в отличие от традиционной цепочки: разработка структуры модели процесса → проведение экспериментальных исследований на объекте → идентификация модели → формулирование оптимизационной задачи → подбор метода оптимизации → разработка алгоритма оптимального управления. Традиционный подход предполагает длительный (порой несколько лет), дорогостоящий и не всегда успешный путь создания системы оптимального управления.

Использование ИТ позволяет решать аналогичные задачи сразу же, и как показал опыт достаточно успешно. Дело в том, что методы искусственного интеллекта предполагают использование знаний, опыта и интуиции людей-экспертов, хорошо знакомых с предметной областью. То есть здесь используется так называемый эффект «готовых знаний». В отличие от этого разработка математической модели (основного компонента системы) является процессом создания «новых знаний», и поэтому требует достаточно длительного времени на проведение теоретических исследований, а также больших материальных и трудовых затрат для проведения экспериментальных исследований и идентификации модели.

К тому же опытные операторы-технологи за время длительной работы научились вести технологический процесс в оптимальных режимах при различных исходных ситуациях (и у них зачастую это получается). Передача «готовых знаний» от людей-экспертов в базу знаний интеллектуальной системы значительно упрощает создание интеллектуальных систем, а их эксплуатация позволяет исключить эффект «человеческого фактора» при управлении процессом (это такие свойства человеческого организма как: усталость, недостаточно быстрая реакция, недостаточная психологическая устойчивость, сонливость при монотонной работе, незначительный опыт работы молодых операторов и другие причины).

Применяя основную идею работы (разработка вместо модели технологического процесса модели процесса управления им) и развивая имеющиеся методы ИТ, была предложена следующая трехэтапная процедура

создания систем оптимального управления технологическими процессами [13].

На начальном этапе выполняются априорные исследования технологических особенностей объекта управления по литературным источникам, публикациям в периодических изданиях и заводской технической документации. Как правило, действующие технологические процессы должны были пройти длительный этап научных исследований, опытно-промышленных и промышленных испытаний, прежде чем они были внедрены в производство. Наверняка остались материалы этих исследований, а также попытки создания математических моделей данного процесса. Необходим тщательный анализ всей этой информации с тем, чтобы использовать ее при разработке интеллектуальных систем управления. Особенно это важно при возможном создании гибридных систем управления (ГСУ).

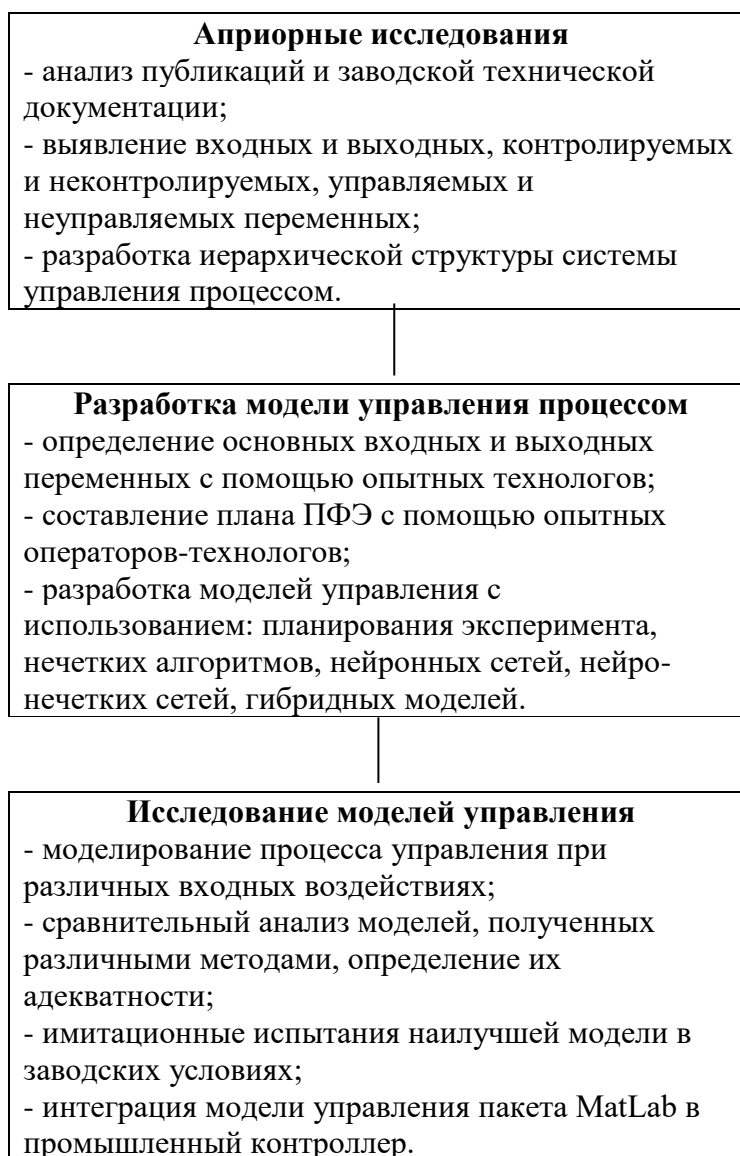


Рисунок 1.2 – Трехэтапная процедура создания гибридных и интеллектуальных систем управления технологическими процессами

На этой же стадии необходимо подвергнуть анализу, исследуемый процесс как объект управления с выявлением входных и выходных, контролируемых и неконтролируемых, управляемых и неуправляемых переменных. При этом обязательный является оценить инерционность объекта по различным каналам, класс объекта (непрерывный или дискретный), степень полноты информации о переменных объекта, рабочий диапазон изменения переменных объекта и т.д.

После тщательного рассмотрения имеющейся информации необходимо составить структуру будущей системы управления, что значительно облегчит дальнейшую работу.

На втором этапе создается модель процесса управления. С помощью опытных экспертов (операторы-технологи, либо ИТР цеха или завода) определяется основная цель управления (аналог целевой функции в оптимизационных задачах), которая, как правило, известна и которую обычно стремятся достичь опытные операторы. Затем методом ранжирования из общего перечня всех типов переменных определяются те, которые, по мнению экспертов, являются основными для данного объекта (процесса).

Главной целью второго этапа является составление матрицы планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ). С помощью матрицы ПФЭ создается модель управления объектом (процессом). При этом, например, для трехуровневых факторов полное число возможных сочетаний числа факторов при двух входных переменных равно $N=3^2=9$ [17]. При двух входных переменных составляется матрица планирования ПФЭ, приведенная в таблице 1.2. Таблицы вида 1.2 являются основой для разработки интеллектуальных систем, так как в них сосредоточен многолетний опыт, знания и интуиция людей-экспертов в конкретной предметной области. От качества матрицы ПФЭ будет зависеть эффективность работы всей системы управления.

Величины: 0,0; 0,5; 1,0 означают минимальное, среднее и максимальное значения входных переменных X_1 и X_2 . Нормализация в диапазоне от 0 до 1 входных и выходных переменных производится по формуле:

$$\bar{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (1.1)$$

где \bar{x} - нормализованное (от 0 до 1) значение входной или выходной переменной;

x – текущее значение переменной;

x_{\min} , x_{\max} – минимальное и максимальное значение переменной.

Таблица 1.2 – Матрица планирования ПФЭ

№ эксперимента	X_1	X_2	Y^o оценка эксперта
1	2	3	4
1	0,0	0,0	
2	0,0	0,5	

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4
3	0.0	1,0	
4	0.5	0,0	
5	0.5	0,5	
6	0.5	1,0	
7	1,0	0,0	
8	1,0	0,5	
9	1,0	1,0	

Создание матрицы планирования экспериментов гораздо более удобно для экспертов, нежели рекомендуемое во всех учебниках и публикациях составление правил нечетких продукций. При этом эксперту нет необходимости выдумывать бесконечные термы: («очень много», «очень-очень мало», «вполне нормально» и т.д.) – он просто ставит значение выходной (управляющей) переменной в диапазоне от 0,0 до 1,0. При этом матрица планирования ПФЭ может быть использована для четырех разных методов создания модели управления: планирования эксперимента, экспертные системы, нейронные сети, нейро-нечеткие алгоритмы.

В отличие от хорошо известного традиционного способа планирования эксперимента составление матрицы планирования ПФЭ с помощью экспертов значительно ускоряет и удешевляет эту процедуру. Эксперты проводят так называемые «мысленные эксперименты» вместо дорогостоящих, реально проводимых активных экспериментов. Кроме того, нужно учитывать, что проведение активных экспериментов в условиях действующего производства нереально из-за возможного возникновения аварийных ситуаций при изменении переменных процесса от минимальных их значений к максимальным значениям, и обратно. К тому же на многих предприятиях просто нет возможности изменять переменные, согласно матрице планирования ПФЭ.

Следует обратить внимание, что выходные значения Y_i являются на самом деле управляющими переменными, поэтому матрица планирования отображает модель управления процессом для всех запланированных экспертами сочетаний входных переменных. Для расчета значений в промежуточных сочетаниях входных переменных (например, для $X_1=0,21$ и $X_2=0,74$) необходимо синтезировать модель управления процессом, что является главной задачей второго этапа.

Важным считается и то, что матрица планирования ПФЭ может быть использована для создания модели управления четырьмя разными методами:

планирования эксперимента, нечетких алгоритмов, нейронных сетей, нейро-нечетких сетей, гибридных моделей.

Необходимо отметить, что наиболее эффективно совместно с интеллектуальными моделями использовать известные математические зависимости, выявленные на первом этапе исследований. При этом необходимо быть уверенным в том, что такие зависимости адекватно отражают те или иные физико-химические закономерности конкретного процесса.

На третьем этапе выполняется изучение созданных моделей управления. При этом выполняются следующие события.

Полученные модели подвергаются тщательному исследованию и анализу их чувствительности, устойчивости, однозначности. Для чего проводится моделирование процесса управления при различных изменениях входных переменных, строятся кривые изменения выходных переменных при изменении входных переменных, и производится их анализ совместно с экспертами.

После завершения исследования моделей, полученных разными методами, производится сравнительный анализ на их адекватность. Для чего с помощью моделей рассчитываются выходные переменные при значениях входных переменных, взятых из матрицы планирования ПФЭ и сравниваются с оценками, данными экспертом. После чего формируется матрица сравнения (см. таблицу 1.3), которая позволяет рассчитать величину ошибки моделирования различными способами. Например, абсолютная ошибка в процентах рассчитывается по формуле:

$$\delta = 100 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y^э - Y^р|, \quad (1.2)$$

где $Y^э$ и $Y^р$ - соответственно экспериментальные и расчетные значения выходных переменных.

Наиболее адекватная модель должна пройти имитационные испытания в условиях действующего производства. При этом на вход модели подают действительные входные переменные, снятые с измерительной аппаратуры промышленного агрегата, а результаты моделирования (выходная управляющая переменная) сравнивается со значением управления, реально осуществляемым опытным оператором-технологом. В случае удовлетворительного результата имитационных испытаний производится интеграция модели в промышленный контроллер. В противном случае, все начинается сначала – возврат к первому этапу, и уточнение всех параметров модели.

Таблица 1.3 – Матрица сравнений расчетных и экспериментальных значений выходной величины

№ эксперимента	X_1	X_2	$Y^р$ оценка модели	$Y^э$ оценка эксперта
----------------	-------	-------	---------------------	-----------------------

	1	2	3	4	5
1		0,0	0,0		
2			0,5		
3					
4	1	2	3	4	5
5		0,5	0,0		
6		0,5	0,5		
7		0,5	1,0		
8		1,0	0,0		
9		1,0	0,5		
	9	8	7	6	5
		1,0	1,0		

1.6 Концепция синтеза интеллектуальных алгоритмов управления технологическими процессами получения P_2O_5

В соответствии с предложенной трехэтапной процедуры (рисунок 1.2) вначале необходимо произвести априорные исследования, что и было сделано выше.

Последующим этапом является разработка моделей управления технологическим процессом, для чего вначале необходимо выявить все входные и выходные переменные протекающих процессов (рисунок 1.3).

Процесс отстаивания в дозаторе

В связи с этим, фосфор в дозаторе отстаивается при температуре $70^{\circ}C$ – $85^{\circ}C$. Соответственно, по химическим свойствам фосфор при температуре выше $+70^{\circ}C$ превращается в твердое состояние, а если ниже $+43^{\circ}C$, то превращается в жидкий вид фосфора. В дозаторе фосфор отстаивается вместе с водой и азотом, так как азот предотвращает появление ядовитого газа – фосфина. Плотность фосфора в дозаторе распределяется так, что он оседает на дне, в то время как вода при высокой температуре на 30 сантиметров заполняет верхнюю часть дозатора, а между ними в дозаторе содержится азот. Так как температура в дозаторе составляет $70^{\circ}C$, фосфор и вода не смешиваются.



Рисунок 1.3 – Этапы получения сухого P_2O_5

В связи с тем, что процесс оттаивания является периодическим, и в нем не протекают никакие химические превращения – он представляет собой простой объект с запаздыванием и служит в качестве дозатора, мы не будем рассматривать его как объект управления. В связи с чем, нам не потребуется проводить экспериментальные исследования с целью синтеза системы управления им.

Процесс сжигания в камере хранения

С дозатора в жидком виде выходит фосфор и подается к горелке. В горелку подается с двух сторон сжатый воздух, и из внешних сторон идет холодная вода, который по круговым потокам выходит горячим. Этот принцип длится непрерывно для того, чтобы держать температуру постоянной. А сжатый воздух проникает внутрь горелки с двух сторон: принцип действия первого – по центру распыляет фосфор, а второго – периферия, подобный вихревому образу зажигает фосфор. Это обеспечит полное качество фосфора. В горелке фосфор горит при температуре от 1500°C – 2000°C. После горения фосфор в газообразном виде направляется в котёл-утилизатор для того чтобы охладиться.

Процесс сжигания является основным процессом, в котором собственно и происходит получение ангидрида фосфора в газообразном состоянии. При опросе опытных технологов были определены следующие основные входные переменные:

X_1 – расход рециркуляционных газов;

X_2 - расход сжатого воздуха;

X_3 – расход технического кислорода O_2 ;

X_4 – расход желтого фосфора дозатора.

Основной выходной переменной, от которой зависит полнота сгорания фосфора является температура в горелке, в связи с тем, что температура внутри горелки очень высока (до 2000°C) – замерить ее очень сложно, косвенно о температуре в горелке можно судить по температуре на выходе из нее (до 600°C). Поэтому в качестве выходной переменной процесса сжигания нами выбрана температура на выходе из горелки (или на входе котла) – Y_1 .

Процесс охлаждения в котле-утилизаторе

Котёл-утилизатор состоит из футерованного кирпича (для усиления огнестойкости материалов) внутри которого находится труба. В этой трубе течёт холодная вода, и между кирпичом и трубой имеется пространство, через которое проходит газообразный фосфор. Вода проходящая внутри трубы охлаждает горячий фосфор. На верхней части котла-утилизатора установлен барабан, в котором уровень воды составляет половину его объема. Холодная вода способствует поддержанию температуры котла-утилизатора в равномерном состоянии. Вода проходящая сквозь трубы, совершив цикл обратно приводится в барабан. Вода при низкой температуре входит в котёл-утилизатор, а выходит при достаточно высокой температуре. Если в барабане имеется малый объем воды, то труба может расплавиться. Для избежания этого объем воды нужно всегда контролировать.

В качестве входных переменных с помощью опытных технологов были выбраны следующие входные переменные:

X_5 – расход отходящих из камеры сгорания газов. Так как этот расход измерить крайне сложно, косвенно можно его определить по общей сумме расходов: рециркуляционных газов, сжатого воздуха и технического кислорода, т.е $X_5 = X_1 + X_2 + X_3$;

X_6 – температура на входе в котел утилизатор, которая равна на температуре на выходе из камеры сгорания, т.е $X_6 = Y_1$;

X_7 – расход охлаждающей воды. В связи с тем, что расход воды не измеряется – косвенно его можно оценить по давлению вод на входе в котел-утилизатора, т.е $X_7 = P_{BK}$;

Выходными переменными процесса охлаждения в котле-утилизаторе являются: температура на выходе из котла – Y_2 и расход образовавшегося пара – Y_3 . В связи с тем, что расход пара не измеряется – косвенно его можно оценить по его давлению – P_d .

Процесс охлаждения в экономайзере

Процесс осаждения, или кристаллизации P_2O_5 происходит в экономайзере при его дальнейшем охлаждении до температуры ниже $160^\circ C$, а в циклоне происходит лишь отделение кристаллического P_2O_5 от рециркуляционных газов. Были определены следующие входные переменные:

X_8 – расход отходящих от котла-утилизатора газов, при этом $X_8 = X_1 + X_2 + X_3$;

X_9 – температура на входе в экономайзер, которая равна на температуре на выходе из котла утилизатора, т.е $X_9 = Y_2$;

X_{10} – расход охлаждающей экономайзером воды. В связи с тем, что расход воды не измеряется – косвенно его можно оценить по давлению воды на входе в экономайзер, т.е $X_{10} = P_{BЭ}$;

Выходными переменными процесса охлаждения отходящих газов в экономайзере являются: температура на выходе из экономайзера – Y_4 и расход образовавшегося твердого ангидрида фосфора – Y_5 .

Таким образом, предложенная концепция синтеза интеллектуальных моделей управления процессами получения ангидрида фосфора позволила выявить 10 входных и 5 выходных переменных для процессов: сжигания, охлаждения и осаждения твердого P_2O_5 .

2 Формирование матриц планирования ПФЭ для моделирования управления процессами: сжигания, охлаждения и осаждения сухого P_2O_5

В соответствии с предложенной трехэтапной процедуры на рисунок 1.2 синтеза интеллектуальных систем управления технологическими процессами в первом разделе, с помощью опытных операторов технологов были выявлены основные входные и выходные переменные процессов получения сухого ангидрида фосфора. Таким образом, результатом исследований, приведенных в разделе 1, является выполнение первого пункта второго этапа. Вторым пунктом второго этапа (рисунок 1.2) является формирование матриц планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) для отдельных процессов получения сухого ангидрида фосфора.

Основной задачей при разработке модели управления является составление матрицы планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ). От качества матрицы ПФЭ будет зависеть эффективность работы всей системы управления. Матрица планирования ПФЭ должна отражать опыт, знания и интуицию технологов-операторов, долгое время работавших на трехконтурных фосфорных печах.

Рассмотрим основные ведения процесса получения P_2O_5 .

2.1 Расчет материального и теплового балансов производства ангидрида фосфора

В основу расчета положены следующие показатели, принятые на основе практических данных действующего производства фосфорной кислоты.

1. Массовая доля P_4 в фосфоре, поступающем на сжигание 99,9%.
2. Коэффициент избытка воздуха на сжигание фосфора – 5,0.
3. Объемная доля в воздухе: кислорода – 21%, азота – 79%, (содержанием влаги в поступающем воздухе можно пренебречь).
4. Норма образования фосфорсодержащих стоков $0,9m^3$ на 1 т кислоты.
5. Массовая доля P_4 в стоках $0,274 \text{ кг}/m^3$.

При этом имеем следующие материальные потоки по цеху (таблица 2.1)

Таблица 2.1 – Материальные потоки по цеху №6

№	Наименование потока	Качественная характеристика	Расход (кг/час)
1	2	3	4
1	Фосфор технический	99,9%P4, 70-85°C	25-50
2	Вода хоз.питьевая	75-85°C	0,374
3	Вода циркуляционная	173-190°C	400,87
4	Сжатый воздух	15-30°C	≤2,02
5	Рециркуляционные газы		≤438,07

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
6	Топочные газы	1570-480°C	554,81
7	Фосфорный ангидрид газообразный	450-480°C	120,13
8	Пар	190°C; P=13кг/см ²	250-291
9	Фосфорный ангидрид кристаллический	160-180°C	
10	Вода дисталлированная		58,27
11	Азот		
12	Фосфорный ангидрид кристаллический товарный		57-114,12

Схематично материальные потоки представлены на рисунке 2.1

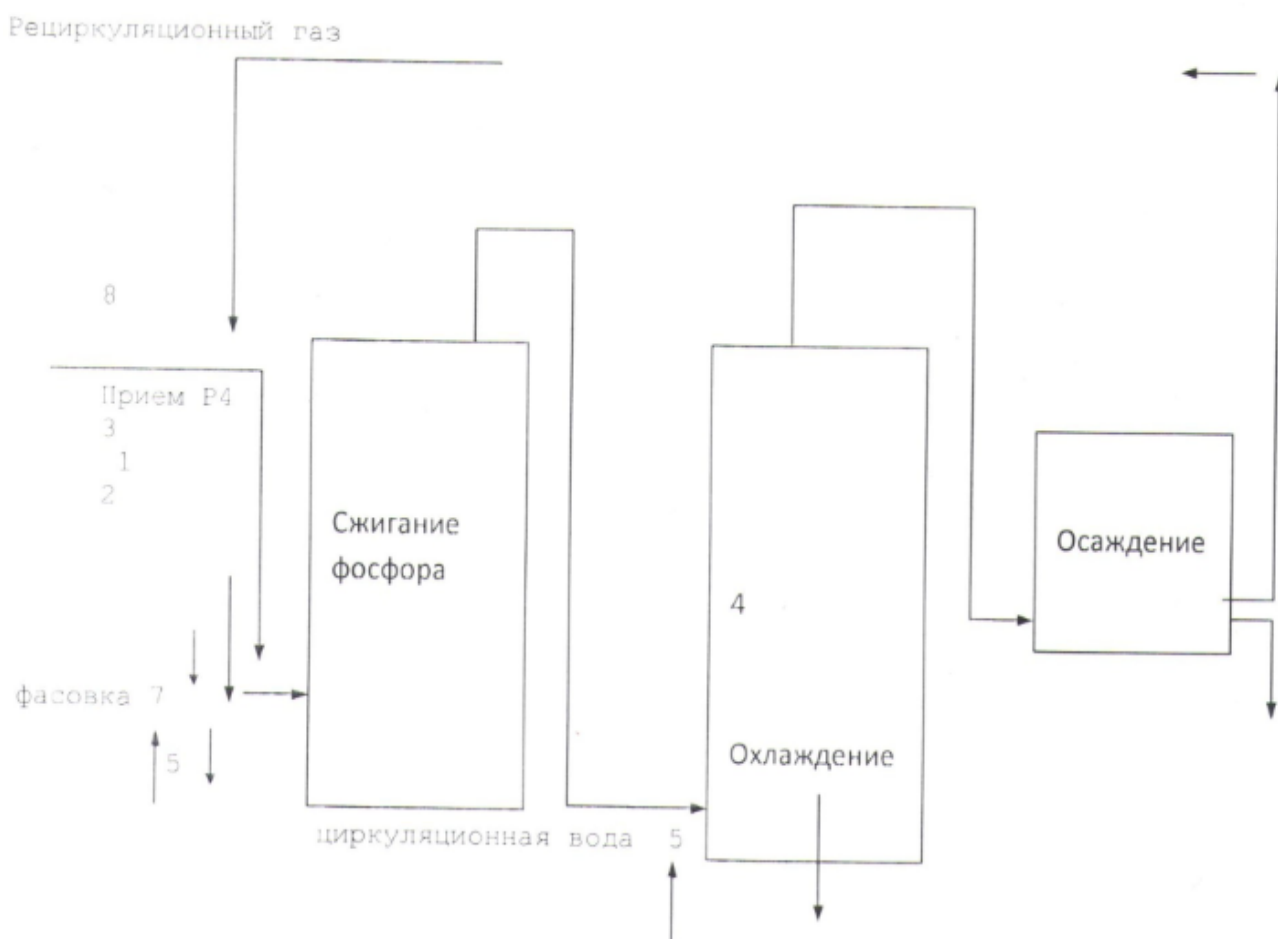


Рисунок 2.1 – Схема материальных потоков по цеху №6

Тогда материальный и тепловой балансы будут иметь вид, показанный в таблицах 2.2 и 2.3

Таблица 2.2 – Материальный баланс

ПРИХОД			РАСХОД		
Наименование сырья, продуктов и полупродуктов	количество		Наименование сырья, продуктов и полупродуктов	количество	
	кг	нм ³		кг	нм ³
1. Стадия сжигания фосфора					
1. Фосфор технич., в том числе:			1. Фосфорный ангидрид (P ₄ O ₁₀)	120,132	9,5245
- P ₄	<u>50,0</u>	-	2. Примеси		
- примеси	49,85	-	3. Топочные газы, в том числе:	0,1582	-
2. Сжатый воздух, в том числе:	0,15	-	- O ₂	434,521	340,819
- O ₂	<u>2,0295</u>	<u>1,5696</u>	- N ₂	51,4579	36,011
- N ₂	0,471	0,3296		383,063	304,808
3. Рециркуляционные газы, в том числе:	1,5582	<u>1,24</u>			
	<u>438,075</u>	<u>338,926</u>			

- O ₂	51,1728	35,8115			
- N ₂	380,935	303,115			
- P ₄ O ₁₀	2	0			
-примеси	5,959	-			
	0,0082	-			
4. Кислород технический, в том числе:	<u>64,7065</u>	<u>45,3372</u>			
- O ₂	64,1367	44,8838			
- N ₂	0,5698	0,4534			
Итого:	554,811	385,833	Итого:	554,811	350,343
3. Стадия осаждения P ₄ O ₁₀ в циклоне.					
1.Фосфорный ангидрид (P ₄ O ₁₀)	120,132	-	1.Фосфорный ангидрид (P ₄ O ₁₀) осажденный	114,12	-
2.Примеси		-	2.Примеси осажденные	0,1503	-
3.Топочные газы, в том числе:	0,1582	340,819	3.Топочные газы на продувку, в том числе:	2,4404	1,8929
- O ₂	434,521		- O ₂	0,2851	0,2
- N ₂	51,4579	36,011	- O ₂	2,1283	1,6929
	383,063	304,808	- N ₂	0,0269	-
			-P ₄ O ₁₀	0,0001	-
			-примеси	438,08	338,929
			4. Топочные газы на рециркуляцию:		
			- O ₂	51,172	35,8115
			- N ₂	380,93	303,115
			- P ₄ O ₁₀	5,9732	-
			- примеси	0,0078	-
Итого:	554,811	340,819	Итого:	554,80	340,819

Таблица 2.3 – Тепловой баланс

ПРИХОД		РАСХОД	
Наименование статей прихода	кДж/час	Наименование статей расхода	кДж/час
Камера сжигания фосфора			
1.Тепло, вносимое желтым фосфором	3424	1.Потери тепла через наружные поверхности камеры сжигания	37867,6
2.Тепло, вносимое сжатым воздухом	30,6	2.Вынос тепла испарительными поверхностями котла, установленными в камере	189337,8
3.Тепло, вносимое кислородом техническим	1187,9	3. Вынос тепла теплообменными поверхностями	100980,1
4.Тепло, вносимое рециркуляционными газами	58332,2	4. Тепло, расходуемое на испарение фосфора	21201,2
5.Тепло, вносимое реакцией горения фосфора	1199277,1		

		5. Тепло выносимое топочными газами в котле	912288,96
ИТОГО:	1262251,8	ИТОГО:	1261675,66
Котел-утилизатор			
1.Тепло, вносимое топочными газами в котел-утилизатор	912288,96	1.Потери тепла через наружные поверхности котла-утилизатора 2.Вынос утилизируемого тепла 3.Тепло выносимое топочными газами в газоход-экономайзер	36491,6 621915,1 253882,3
ИТОГО:	912288,96	ИТОГО:	912289
Газоход-экономайзер			
1.Тепло, вносимое топочными газами в газоход	253882,3	1.Потери тепла через наружные поверхности газохода 2.Вынос утилизируемого тепла из газохода 3.Тепло выносимое топочными газами из газохода-экономайзера	7616,5 156144,7 90121,1
ИТОГО:	253882,2	ИТОГО:	253882,2
Циклон-осадитель			
1.Тепло, вносимое топочными газами в циклон	90121,1	1.Потери тепла через наружные поверхности циклона 2.Вынос тепла осажденным в циклоне фосфорным ангидридом 3.Тепло выносимое топочными газами из циклона	10792 11830 67499,1
ИТОГО:	90121,1	ИТОГО:	90121,1

2.2 Нормы технологических режимов в цехе №6

Очень важными для успешного ведения процесса получения ангидрида фосфора является соблюдение технологических режимов, отработанных в цехе №6 в течение наладки и эксплуатации полупромышленной установки. Соблюдение этих норм, описанных в таблице 2.4 позволяет вести процесс получения ангидрида фосфора безопасно и эффективно.

Таблица 2.4 – Нормы технологического режима по цеху №6

Наименование параметра	Единицы измерения	Величина параметра	Примечание
1	2	3	4
1.Производительность по: -P4O10 -73%НЗРО4	кг/час	25-50 57-114.12 108-215.98	99.9%P4
2.Температура газов: - в камере сжигания фосфора	°C	1500-1900 1370-1590	

поз.2 - на входе в котел-утилизатор		450-480	
поз.3 - на выходе из котла-утилизатора поз.3		160-180 150-160	
- на входе в циклон-осадитель поз.5		140-150	
- на выходе из циклона-осадителя поз.5		120-140	
- перед вентилятором			
3. Коэффициент избытка кислорода в дутье для сжигания фосфора(£)		1.75-1.85	
4.Влагосодержание дутья на основе рециркуляционных газов	г/нм ³	Не более 0.00001	Влагосодержание сжатого воздуха осушенного ≤0.02г/нм
5. Влагосодержание кислорода технического	г/нм ³	Не более 1.6x10 ⁻²³	
6. Температура желтого фосфора на входе в камеру сжигания фосфора	°С	70-85	
7. Количество сжатого воздуха, подаваемого в дутьё	кг/час нм ³ /час	≤2.0295 ≤1.5696	
8. Температура сжатого воздуха на входе в камеру сжигания	°С	15-30	
9. Количество кислорода, подаваемого в дутьё	кг/час нм ³ /час	≤64.7065 ≤45.3372	
10. Температура кислорода на входе в камеру сжигания фосфора	°С	10-30	

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4
11. Количество рециркуляционного газа, подаваемого в дутьё	кг/час нм ³ /час	≤438.0751 ≤338.9265	
12. Температура 73% фосфорной кислоты, подаваемой на гидратацию и склад после теплообменников	°С	48-53	
13. Температура 73% фосфорной кислоты, подаваемой на теплообменник и в реактор	°С	72-77	
14. Количество воды, подаваемое в реактор для гидратации и разбавления	кг/час	≤105	

образующейся вновь кислоты			
15. Количество циркуляционной кислоты подаваемой в смеситель	кг/час	≤5410.5	
16. Количество оборотной воды для охлаждения циркуляционной кислоты	кг/час	≤3000	
17. Температура оборотной воды на входе в теплообменник	°С	28-30	
18. Температура оборотной воды на выходе из теплообменника	°С	38-40	
19. Разрежение в камере сжигания	мм.вод.ст.	1.5-3.5	
20. Температура воды на передавливание фосфора из монжуса	°С	75-85	
21. Давление воды на передавливание фосфора из монжуса	кг/час	не менее 2.0	

2.3 Автоматический контроль технологических режимов в цехе №6

С целью синтеза интеллектуальной системы управления процессами получения ангидрида фосфора весьма важно иметь возможность осуществлять контроль и регулировать действиями в автоматическом порядке. При этом внедрение интеллектуальной системы будет тем дешевле, чем более оснащен действующей приборный парк цеха №6.

2.4 Учет возможных аварийных ситуаций в цехе №6

При синтезе интеллектуальной системы управления процессом получения ангидрида фосфора очень важно учитывать возможность аварийных ситуаций и предусмотреть меры их ликвидации. Для чего рассмотрит имеющийся в цехе №6 список инцидентов, их причины и действия персонала в той или иной ситуации, который описан в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Перечень возможных инцидентов

Инциденты	Возможные причины возникновения инцидентов	Действия персонала и способ устранения инцидентов
1	2	3
Не поступает фосфор с дозатора на монжус	а) Не промыт трубопровод перекачки фосфора	а) Промыть горячей водой трубопровод
	б) Не подается пар в	б) Подать пар в паро-

	пароспутники	спутники
	в) Застывание фосфора	в) Обогревать арматуру
Наличие фосфорного ангидрида в воздухе рабочей зоны дозатора	Нарушение герметичности фосфоропроводов и арматуры	Устранить выявленные неплотности
Фосфор не поступает к форсунке	а) Не включен или неисправен насос подачи воды на выдавливание	а) Включить насос подачи воды и проверить его работу по манометру
	б) Не разогрет фосфоропровод	б) Разогреть фосфоропровод
Повышение температуры циркуляционной воды в камере-сгорания	а) Недостаточное количество охлаждающей воды	а) Включить насос подачи воды и проверить его работу по манометру
	б) Загрязнились трубопроводы	б) Промыть трубопроводы раствором щелочи и кислотой
Понижение разряжения на хвостовом вентиляторе	а) Загрязнились трубопроводы	а) Прекратить подачу фосфора и определить какие трубопроводы не работают, прочистить забитые трубопроводы
	б) Появление свища на трубопроводе охлаждения	б) Устранить свищ на трубопроводе
Повышение температуры циркуляционной воды в котле-утилизаторе	а) Недостаточное количество охлаждающей воды	а) Увеличить расход циркуляционной воды
	б) Загрязнились трубопроводы	б) Промыть трубопроводы раствором щелочи и кислотой

Продолжение таблицы 2.6

1	2	3
Загазованность рабочей зоны башни сжигания	а) Велика нагрузка на камеру	а) Снизить расход фосфора
	б) Снизилось разрежение в камере	б) Проверить исправность вентилятора, отрегулировать разрежение в башне сжигания
Повышение (понижение) объемной доли кислорода в рециркуляционных газах	Высокий (низкий) расход вторичного воздуха за счет изменения разрежения в камере	Отрегулировать разрежение в системе
Снижение напряжения на повышающих агрегатах, пробой изоляции	Нарушение центровки или обрыв электродов	Отрегулировать тягу в системе, отцентрировать или сменить электроды
Треск в изоляторных коробках: утечка электри-	Скопление конденсата кислоты на кварцевых	Остановить высоковольтный агрегат, проте-

чества, пробой высоко-вольтных агрегатов	трубах, выход из строя труб	реть и просушить трубы, при выходе их из строя произвести замену
--	-----------------------------	--

2.5 Формирование матрицы ПФЭ для синтеза интеллектуальных алгоритмов управлением процессом сжигания

Главной целью при разработке модели управления является создание матрицы планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ). От качества матрицы ПФЭ будет зависеть результативность работы качества системы управления. Матрица планирования ПФЭ должна отражать опыт, знания и интуицию технологов - операторов, долгое время работавших на трехконтурных фосфорных печах.

Как уже было отмечено выше, задачей подсистемы оптимального управления процесса является выявление оптимальных значений температуры газа после камеры сгорания (Y_1) в зависимости от расхода рециркуляционных газов (X_1), расхода сжатого воздуха (X_2), расхода технического кислорода (X_3) и расхода желтого фосфора из дозатора (X_4). Принципиально, такие расчеты следует производить постоянно (примерно один раз в течении 5-7 минут) в зависимости от ситуации. Анкетирование технологов цеха позволило составить матрицу планирования ПФЭ для 81 эксперимента при трехуровневой оценке (0,0; 0,5 и 1,0) и четырех входных переменных: $N=81$ (см. таблицу 2.7).

Нормализация в диапазоне от 0 до 1 входных и выходных переменных производилась по формуле (1.1). При этом нижние и верхние границы диапазонов, приведенные в таблице 2.4, были (по рекомендации опытных операторов технологов) расширены с учетом возможных колебаний входных переменных, не позволяющих переходить в аварийные режимы ведения процесса горения фосфора. Предусмотрена возможность управлять процессом в широком диапазоне изменения входных переменных, что позволит управлять процессом горения более эффективно. С учетом рекомендаций опытных оператора диапазон изменения входных переменных было решено расширить следующим образом:

$$238,0 \text{ нм}^3/\text{час} < X_1 < 438,0 \text{ нм}^3/\text{час};$$

$$1,0 \text{ нм}^3/\text{час} < X_2 < 2,0 \text{ нм}^3/\text{час};$$

$$40,0 \text{ нм}^3/\text{час} < X_3 < 50,0 \text{ нм}^3/\text{час};$$

$$10,0 \text{ кг}/\text{час} < X_4 < 60,0 \text{ кг}/\text{час};$$

$$350^\circ\text{C} < Y_1 < 550^\circ\text{C}.$$

В таблице 2.7 сосредоточен многолетний опыт работы технологов цеха №6.

Таблица 2.7 – Матрица планирования ПФЭ для процесса сжигания желтого фосфора

Входные переменные	Выходная
--------------------	----------

№	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	переменная
					Y ₁
1	2	3	4	5	6
1	0.0	0.5	0.0	0.5	0.76
2	0.5	0.5	0.0	0.5	0.53
3	1.0	0.5	0.0	0.5	0
4	0.0	0.0	0.0	0.5	0.72
5	0.5	0.0	0.0	0.5	0.49
6	1.0	0.0	0.0	0.5	0
7	0.0	1.0	0.0	0.5	0.81
8	0.5	1.0	0.0	0.5	0.58
9	1.0	1.0	0.0	0.5	0.046
10	0.0	0.5	0.5	0.5	0.81
11	0.5	0.5	0.5	0.5	0.58
12	1.0	0.5	0.5	0.5	0.046
13	0.0	0.0	0.5	0.5	0.76
14	0.5	0.0	0.5	0.5	0.53
15	1.0	0.0	0.5	0.5	0
16	0.0	1.0	0.5	0.5	0.86
17	0.5	1.0	0.5	0.5	0.63
18	1.0	1.0	0.5	0.5	0.092
19	0.0	0.5	1.0	0.5	0.87
20	0.5	0.5	1.0	0.5	0.66
21	1.0	0.5	1.0	0.5	0.1
22	0.0	0.0	1.0	0.5	0.81
23	0.5	0.0	1.0	0.5	0.6
24	1.0	0.0	1.0	0.5	0.07
25	0.0	1.0	1.0	0.5	0.9
26	0.5	1.0	1.0	0.5	0.72
27	1.0	1.0	1.0	0.5	0.15
28	0.0	0.5	0.0	0.0	0.81
29	0.5	0.5	0.0	0.0	0.61
30	1.0	0.5	0.0	0.0	0.07

Продолжение таблицы 2.7

№	1	2	3	4	5
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
32	0.5	0.0	0.0	0.0	0.58
33	1.0	0.0	0.0	0.0	0.046
34	0.0	1.0	0.0	0.0	0.87
35	0.5	1.0	0.0	0.0	0.4
36	1.0	1.0	0.0	0.0	0.09
37	0.0	0.5	0.5	0.0	0.84
38	0.5	0.5	0.5	0.0	0.64
39	1.0	0.5	0.5	0.0	0.12
40	0.0	0.0	0.5	0.0	0.84
42	1.0	0.0	0.5	0.0	0.046
43	0.0	1.0	0.5	0.0	0.9
44	0.5	1.0	0.5	0.0	0.69
45	1.0	1.0	0.5	0.0	0.15

46	0.0	0.5	1.0	0.0	0.87
48	1.0	0.5	1.0	0.0	0
49	0.0	0.0	1.0	0.0	0.8
50	0.5	0.0	1.0	0.0	0.64
51	1.0	0.0	1.0	0.0	0.07
52	0.0	1.0	1.0	0.0	1
53	0.5	1.0	1.0	0.0	0.76
54	1.0	1.0	1.0	0.0	0.2
55	0.0	0.5	0.0	1	0.72
56	0.5	0.5	0.0	1	0.6
57	1.0	0.5	0.0	1	0.046
58	0.0	0.0	0.0	1	0.67
59	0.5	0.0	0.0	1	0.49
60	1.0	0.0	0.0	1	0
61	0.0	1.0	0.0	1	0.76
62	0.5	1.0	0.0	1	0.58
63	1.0	1.0	0.0	1	0.03
64	0.0	0.5	0.5	1	0.76
66	1.0	0.5	0.5	1	0
67	0.0	0.0	0.5	1	0.72
68	0.5	0.0	0.5	1	0.49
69	1.0	0.0	0.5	1	0
70	0.0	1.0	0.5	1	0.81
71	0.5	1.0	0.5	1	0.58
72	1.0	1.0	0.5	1	0.8
74	0.5	0.5	1.0	1	0.56
75	1.0	0.5	1.0	1	0
76	0.0	0.0	1.0	1	0.75
77	0.5	0.0	1.0	1	0.6
78	1.0	0.0	1.0	1	0.04
79	0.0	1.0	1.0	1	0.78
80	0.5	1.0	1.0	1	0.63
81	1.0	1.0	1.0	1	0.07

2.6 Формирование матрицы ПФЭ для синтеза интеллектуальных алгоритмов управлением процессом охлаждения

Как сказалось, задачей подсистемы оптимального управления процессом является определение оптимальных значений температуры газа после котла-утилизатора (Y_2) и количества образовавшегося пара (Y_3) в зависимости от расхода отходящих из камеры сгорания газов (X_5), температуры на входе котла-утилизатора (X_6) и расхода давления охлаждающей воды (X_7). Опрос технологов цеха позволил составить матрицу планирования ПФЭ для 27 экспериментов при трехуровневой оценке (0.0; 0.5 и 1,0) и трех входных переменных: $N=27$ (см. таблицу 2.8).

Стандартизация в диапазоне от 0 до 1 входных и выходных переменных производилась по формуле (1.1). В таблице 2.8 все переменные приведены к стандартной форме в диапазоне от 0.0 до 1,0 . При этом нижние и верхние границы диапазонов, приведенные в таблице 2.4, были (по

рекомендации опытных операторов технологов) расширены с учетом возможных колебаний входных переменных, не позволяющих переходить в аварийные режимы ведения процесса горения фосфора. С учетом рекомендаций опытных оператора диапазон изменения входных переменных было решено расширить следующим образом:

$$280,0 \text{ нм}^3/\text{час} < X_5 < 500,0 \text{ нм}^3/\text{час};$$

$$350^\circ\text{C} < X_6 < 550^\circ\text{C};$$

$$11 \text{ кг/см}^2 < X_7 < 18 \text{ кг/см}^2;$$

$$160^\circ\text{C} < Y_2 < 220^\circ\text{C};$$

$$10,0 \text{ кг/час} < Y_3 < 60,0 \text{ кг/час}.$$

В таблице 2.8 сосредоточен многолетний опыт работы технологов цеха №6.

Таблица 2.8 – Матрица планирования ПФЭ для процесса охлаждения

№	X_5	X_6	X_7	Y_2	Y_3
1	1.0	1.0	1.0	0.68	1
2	1.0	1.0	0.0	0.68	1
3	1.0	1.0	0.5	0.68	1
4	1.0	0.5	1.0	0.33	0.9
5	1.0	0.5	0.0	0.33	0.9
6	1.0	0.5	0.5	0.33	0.9
7	1.0	0.0	1.0	0.16	0.37
8	1.0	0.0	0.0	0.16	0.37
9	1.0	0.0	0.5	0.16	0.37
10	0.0	1.0	1.0	0.32	0.16
11	0.0	1.0	0.0	0.32	0.16
12	0.0	1.0	0.5	0.32	0.16
13	0.0	0.5	1.0	0.2	0.18
14	0.0	0.5	0.0	0.2	0.18
15	0.0	0.5	0.5	0.2	0.18

Продолжение таблицы 2.8

№	1	2	3	4	5
16	0.0	0.0	1.0	0.05	0.3
17	0.0	0.0	0.0	0.05	0.3
18	0.0	0.0	0.5	0.05	0.3
19	0.5	1.0	1.0	0.6	0.33
20	0.5	1.0	0.0	0.6	0.33
21	0.5	1.0	0.5	0.6	0.33
22	0.5	0.5	1.0	0.52	0.35
23	0.5	0.5	0.0	0.52	0.35
24	0.5	0.5	0.5	0.52	0.35
25	0.5	0.0	1.0	0.2	0.6
26	0.5	0.0	0.0	0.2	0.6
27	0.5	0.0	0.5	0.2	0.6

2.7 Формирование матрицы ПФЭ для синтеза интеллектуальных алгоритмов управлением процесса осаждения

Целью подсистемы оптимального управления процессом осаждения кристаллического ангидрида в экономайзере является определение оптимальных значений температуры газа после экономайзера (Y_4) и расход образовавшегося твердого ангидрида фосфора (Y_5) в зависимости от расхода отходящих из котла-утилизатора газов (X_8), температуры на входе в экономайзер (X_9) и расхода давления охлаждающей экономайзером воды (X_{10}).

Опрашивание технологов цеха позволил составить матрицу планирования ПФЭ для 27 экспериментов при трехуровневой оценке (0,0; 0,5 и 1,0) и трех входных переменных: $N=27$ (см. таблицу 2.9).

Нормализация в диапазоне от 0 до 1 входных и выходных переменных производилась по формуле (1.1). В таблице 2.9 все переменные приведены к нормализованной форме в диапазоне от 0,0 до 1,0. При этом нижние и верхние границы диапазонов, приведенные в таблице 2.4, были (по рекомендации опытных операторов технологов) расширены с учетом возможных колебаний входных переменных, не позволяющих переходить в аварийные режимы ведения процесса горения фосфора следующим образом:

$$150,0 \text{ нм}^3/\text{час} < X_8 < 500,0 \text{ нм}^3/\text{час};$$

$$160^\circ\text{C} < X_9 < 220^\circ\text{C};$$

$$10 \text{ кг/см}^2 < X_{10} < 19 \text{ кг/см}^2;$$

$$140^\circ\text{C} < Y_4 < 200^\circ\text{C};$$

$$10 \text{ кг/см}^2 < Y_5 < 16 \text{ кг/см}^2.$$

С учетом принятых диапазонов изменения входным переменных была составлена матрица планирования ПФЭ опытными операторами-технологами с помощью «мысленного» эксперимента. В таблице 2.9 сосредоточен многолетний опыт работы технологов цеха.

Таблица 2.9 – Матрица планирования ПФЭ для процесса осаждения

№	X_8	X_9	X_{10}	Y_4	Y_5
1	1.0	1.0	1.0	0.48	1
2	1.0	1.0	0.0	0.52	1
3	1.0	1.0	0.5	0.61	1
4	1.0	0.5	1.0	0.31	0.88
5	1.0	0.5	0.0	0.36	0.91
6	1.0	0.5	0.5	0.17	0.91
7	1.0	0.0	1.0	0.18	0.35
8	1.0	0.0	0.0	0.18	0.37
9	1.0	0.0	0.5	0.33	0.39
10	0.0	1.0	1.0	0.34	0.18
11	0.0	1.0	0.0	0.37	0.15

12	0.0	1.0	0.5	0.21	0.18
13	0.0	0.5	1.0	0.23	0.17
14	0.0	0.5	0.0	0.21	0.19
15	0.0	0.5	0.5	0.2	0.21
16	0.0	0.0	1.0	0.06	0.4
17	0.0	0.0	0.0	0.07	0.5
18	0.0	0.0	0.5	0.08	0.4
19	0.5	1.0	1.0	0.71	0.35
20	0.5	1.0	0.0	0.82	0.39
21	0.5	1.0	0.5	0.65	0.31
22	0.5	0.5	1.0	0.57	0.39
23	0.5	0.5	0.0	0.51	0.36
24	0.5	0.5	0.5	0.52	0.39
25	0.5	0.0	1.0	0.21	0.56
26	0.5	0.0	0.0	0.23	0.59
27	0.5	0.0	0.5	0.27	0.62

Полученные данные от опытных экспертов-технологов в дальнейшем подвергнутся исследованию методом искусственного интеллекта. С помощью этих данных будет обучена нейро-сетевая система для дальнейшего применения в производстве в следующем разделе.

3 Синтез нечеткой модели управления процессами сжигания, охлаждения и осаждения

3.1 Синтез нечеткой модели управления процессом сжигания

Разработку нечеткой модели будем выполнять с использованием графических средств системы Matlab [15]. Затем определяем функции принадлежности для двух входных и одной выходной переменной, для чего воспользуемся редактором функций принадлежности системы Matlab. Вид графического интерфейса редактора функций принадлежности показан на рисунке 3.1, где приведены функции принадлежности для четырех входных переменных: расхода рециркуляционных газов (X_1), расхода сжатого воздуха (X_2), расхода технического кислорода (X_3) и расхода желтого фосфора из

дозатора (X_4), а также одной выходной переменной – температуры газа после камеры сгорания (Y_1).

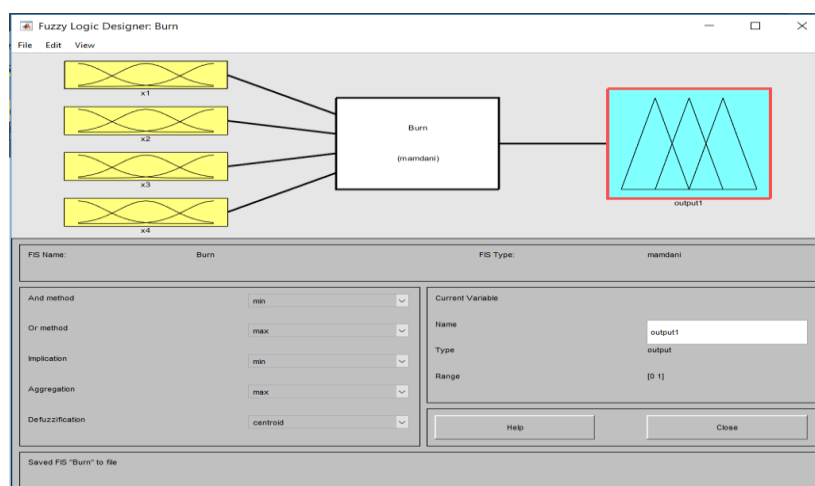


Рисунок 3.1 - Графический интерфейс редактора функций принадлежности для четырех входных и одной выходной переменной для процесса сжигания

Затем формируются правила нечеткой продукции, т.е. каждому эксперименту из таблицы 2.7 соответствует свое правило продукции, например [12]:

ПРАВИЛО 1: «ЕСЛИ X_1 РАВНО 0» И « X_2 РАВНО 0» ТО « Y РАВЕН 0,86».

ПРАВИЛО 2:: «ЕСЛИ X_1 РАВНО 0» И « X_2 РАВНО 0.5» ТО « Y РАВЕН 0,6».

ПРАВИЛО 3:: «ЕСЛИ X_1 РАВНО 0» И « X_2 РАВНО 1» ТО « Y РАВЕН 0.56».

ПРАВИЛО 4:: «ЕСЛИ X_1 РАВНО 0.5 » И « X_2 РАВНО 0 » ТО « Y РАВЕН 0,1».

Аналогично составляются правила продукции для всех 81 экспериментов из таблицы 2.7, как это приведено на рисунке 3.2.

После того, как Matlab произведет все необходимые процедуры в соответствии с выбранным алгоритмом нечеткого вывода (например, алгоритмом Mamdani), в графическом интерфейсе просмотра правил будет представлена нечеткая модель оптимального управления процессом сжигания фосфора (рисунок 3.3). Таким образом, интерфейс, показанный на рисунке 3.3, представляет собой модель (алгоритм) оптимального управления, с помощью которой можно промоделировать различные режимы при всевозможных сочетаниях значений входных переменных.

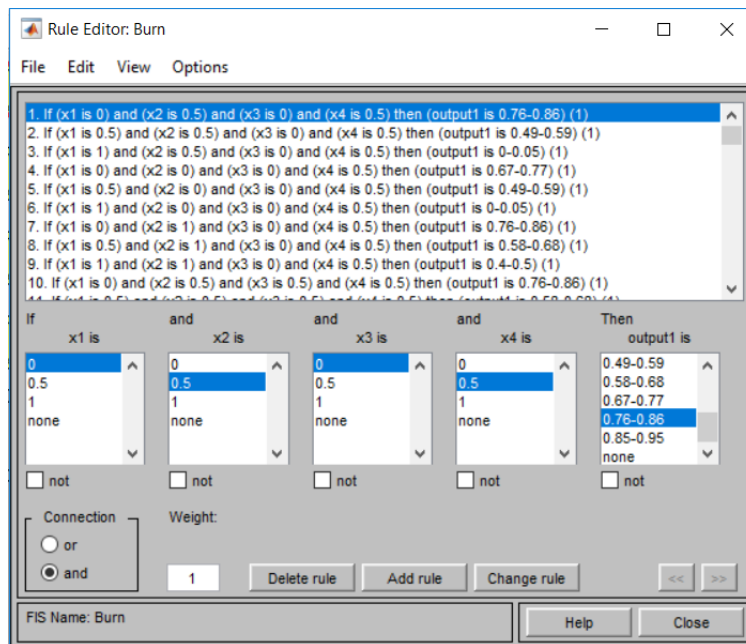


Рисунок 3.2 - Графический интерфейс редактора правил после задания базы правил для данной системы нечеткого вывода



Рисунок 3.3 – Нечеткая модель управления процессом.

3.2 Синтез нечеткой модели управления процессом охлаждения

Аналогично весь процесс выполняется для процесса охлаждения. Вид графического интерфейса редактора функций принадлежности показан на рисунке 3.4, где приведены функции принадлежности переменных: в зависимости от расхода отходящих из камеры сгорания газов (X_5), температуры на входе котла-утилизатора (X_6) и расхода давления охлаждающей воды (X_7), а также двух выходных переменных – температуры газа после котла-утилизатора (Y_2) и количества образовавшегося пара (Y_3).

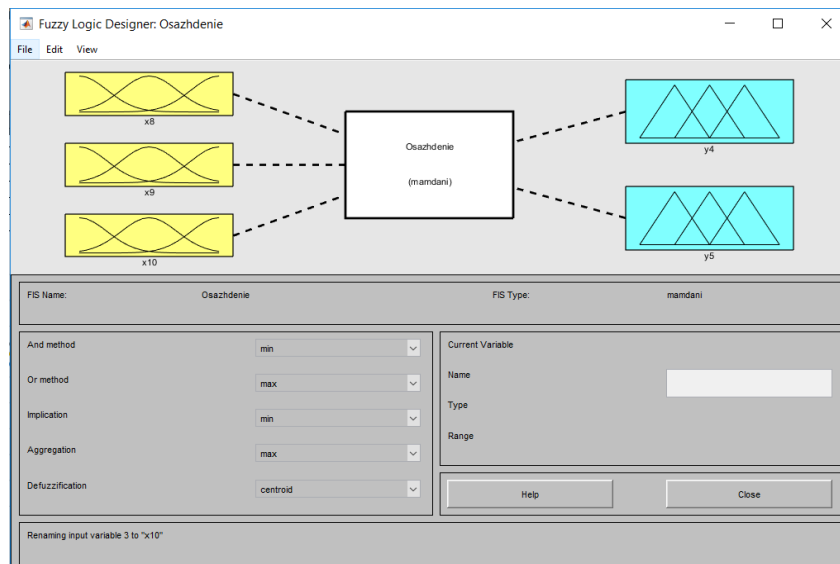


Рисунок 3.4 - Графический интерфейс редактора функций принадлежности для трех входных и двух выходных переменных

Таким же образом составляются правила продукции для всех 27 экспериментов из таблицы 2.8, как это приведено на рисунке 3.5.

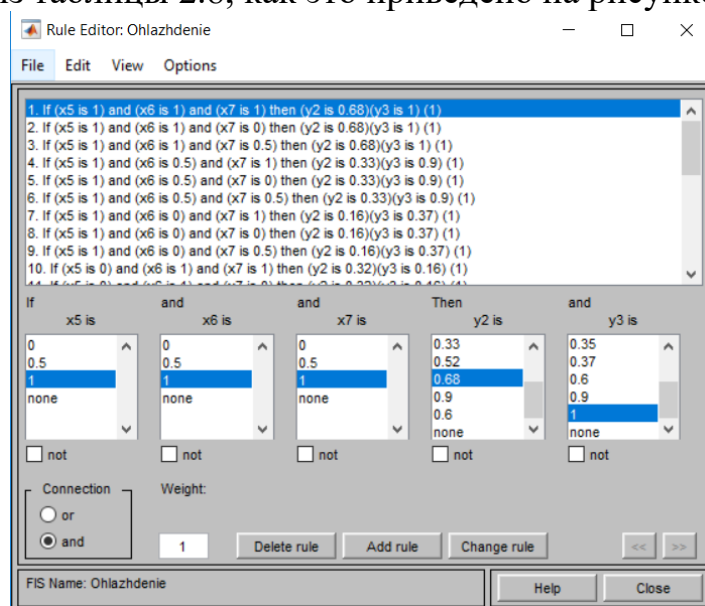


Рисунок 3.5 - Графический интерфейс редактора правил после задания базы правил для данной системы нечеткого вывода

После того, как Matlab произведет все необходимые процедуры в соответствии с выбранным алгоритмом нечеткого вывода (например, алгоритмом Mamdani), в графическом интерфейсе просмотра правил будет представлена нечеткая модель оптимального управления процессом сжигания фосфора (рисунок 3.6).

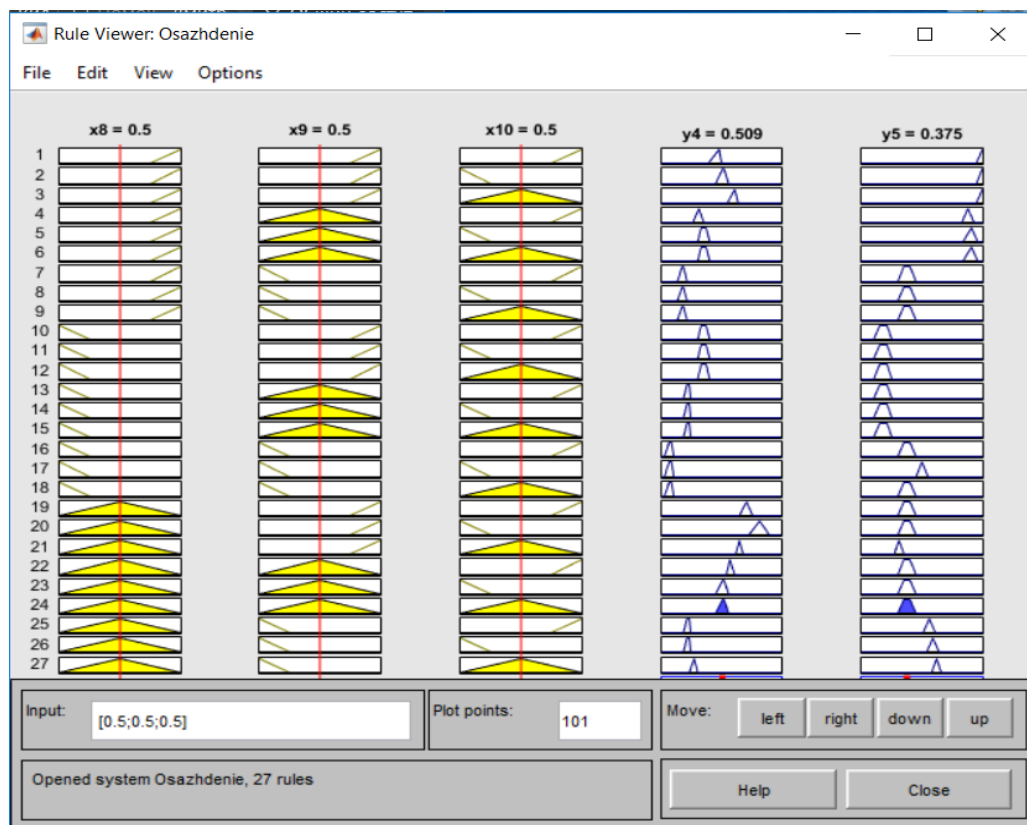


Рисунок 3.6 – Нечеткая модель управления процессом.

3.3 Синтез нечеткой модели управления процессом осаждения

Нечеткая модель создается таким же образом, как и отмечалось выше для процесса осаждения.

Вид графического интерфейса редактора функций принадлежности показан на рисунке 3.7, где приведены функции принадлежности для трех входных переменных: в зависимости от расхода отходящих из котла-утилизатора газов (X_8), температуры на входе в экономайзер (X_9) и расхода давления охлаждающей экономайзером воды (X_{10}), а также двух выходных переменных – температуры газа после экономайзера (Y_4) и расход образовавшегося твердого ангидрида фосфора (Y_5).

Составляются правила продукций для всех 27 экспериментов из таблицы 2.9, как это приведено на рисунке 3.8.

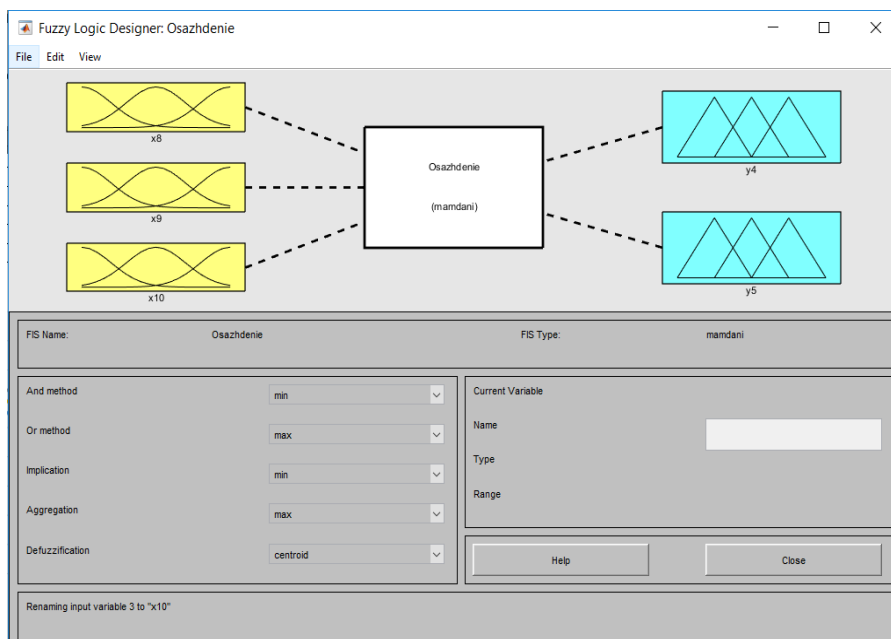


Рисунок 3.7 - Графический интерфейс редактора функций принадлежности для трех входных и двух выходных переменных

В графическом интерфейсе просмотра правил будет представлена нечеткая модель оптимального управления процессом осаждения фосфора (рисунок 3.8). Таким образом, интерфейс, показанный на рисунке 3.9, представляет собой модель (алгоритм) оптимального управления, с помощью которой можно промоделировать различные режимы при всевозможных сочетаниях значений входных переменных.

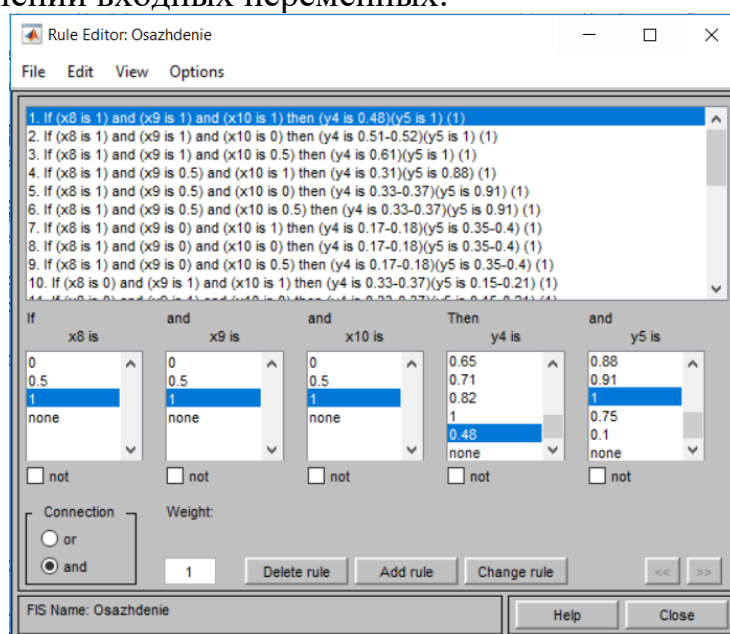


Рисунок 3.8 - Графический интерфейс редактора правил после задания базы правил для данной системы нечеткого вывода для процесса осаждения

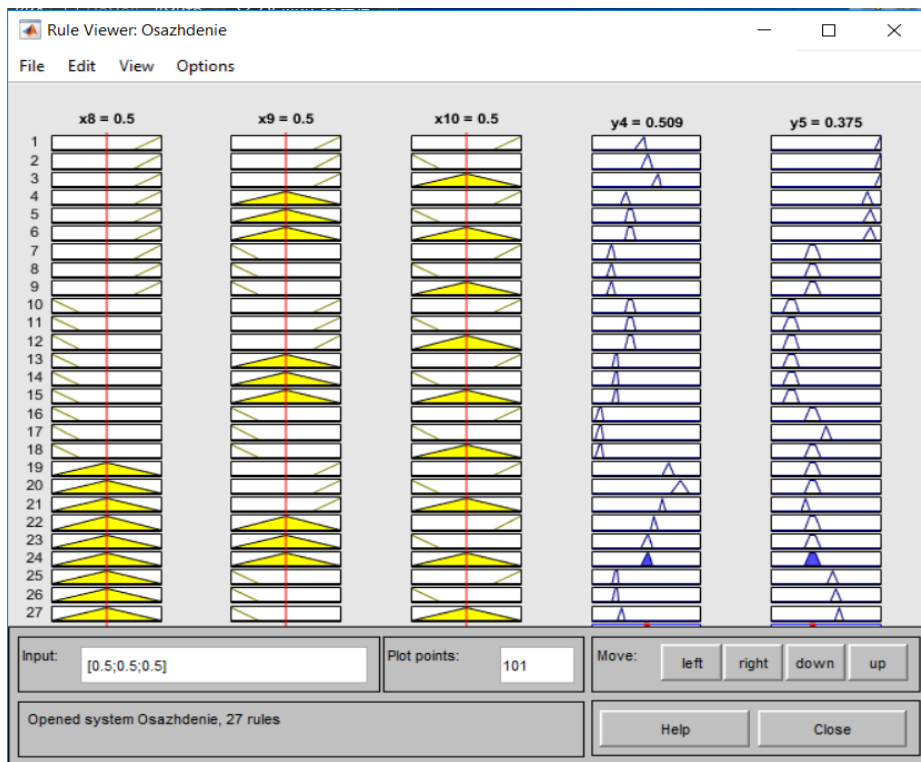


Рисунок 3.9 – Нечеткая модель управления процессом осаждения.

4 Синтез нейро-сетевой модели управления процессами сжигания, охлаждения и осаждения

4.1 Синтез нейро-сетевой модели управления процессом сжигания

Вместо нечетких моделей для моделирования процесса управления можно так же использовать нейронные сети. Для обучения нейронной сети надо ввести результаты 81 эксперимент из матрицы планирования ПФЭ (см. таблицу 2.7). В программе MATLAB R2014b имеется графический интерфейс, который позволяет ввести необходимые данные для выбора архитектуры сети и метода ее обучения.

Для обучения нейронной сети вводим исходные данные из матрицы планирования ПФЭ (таблица 2.7), пример такого ввода приведен на рисунке 4.1.

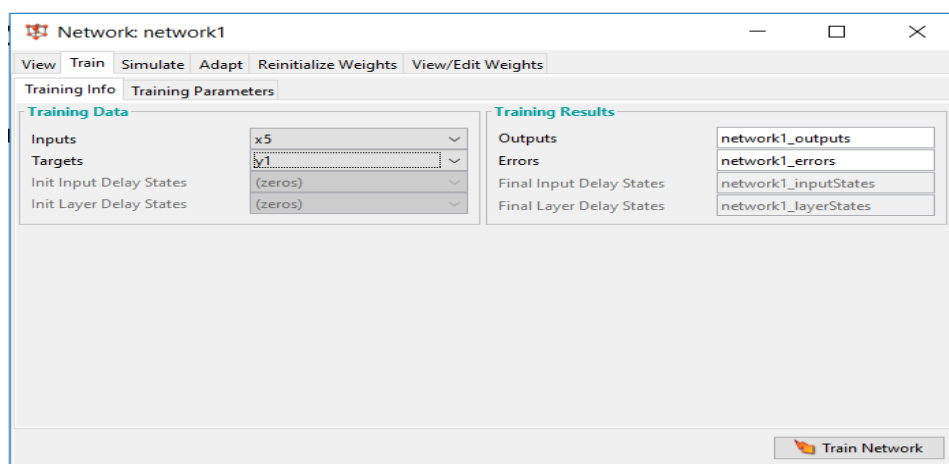


Рисунок 4.1 - Ввод входных данных

Далее создаем нейронную сеть (см. рисунок 4.2).

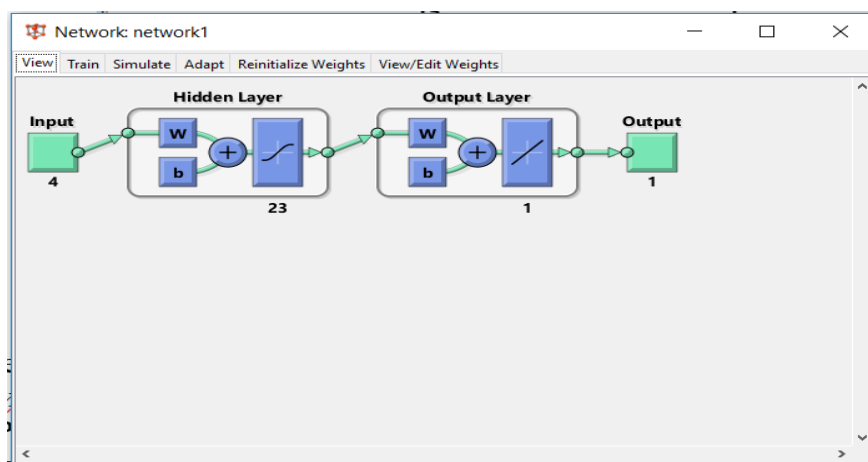


Рисунок 4.2 – Нейро-сетевая модель управления

В поле входные данные указываем заранее созданные данные, задаем тип нейронной сети, выберем персептрон (Feed-ForwardBackPropa-gation) с 10 сигмоидными (TANSIG) нейронами скрытого слоя и одним линейным (PURELIN) нейроном выходного слоя. Обучение будем производить, используя алгоритм Левенберга-Маркардта (Levenberg-Mar-quardt), который реализует функция TRAINLM. Функция ошибки – MSE [15].

Программа покажет прогресс и итог обучения, как показано на рисунке 4.3. На рисунке 4.4 можно увидеть графически сравнение экспериментальных значений и расчетных значений.

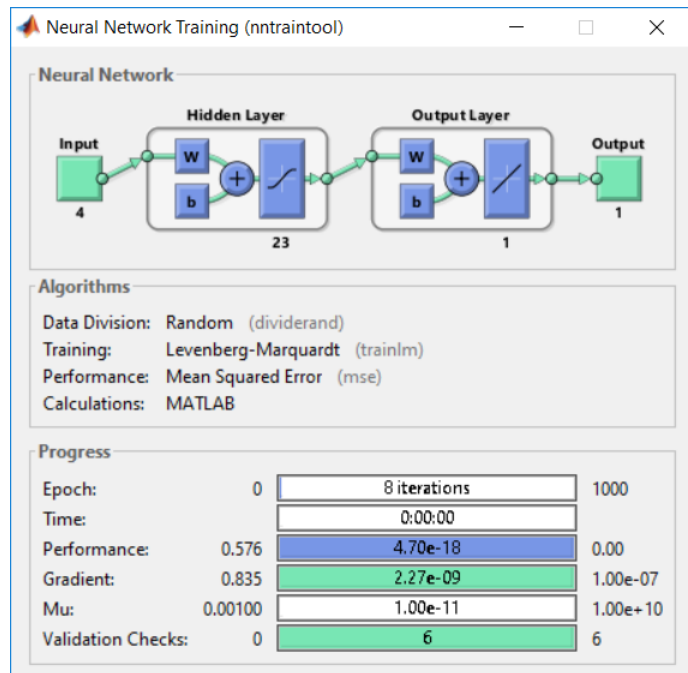


Рисунок 4.3 - Обучение нейронов по эпохам

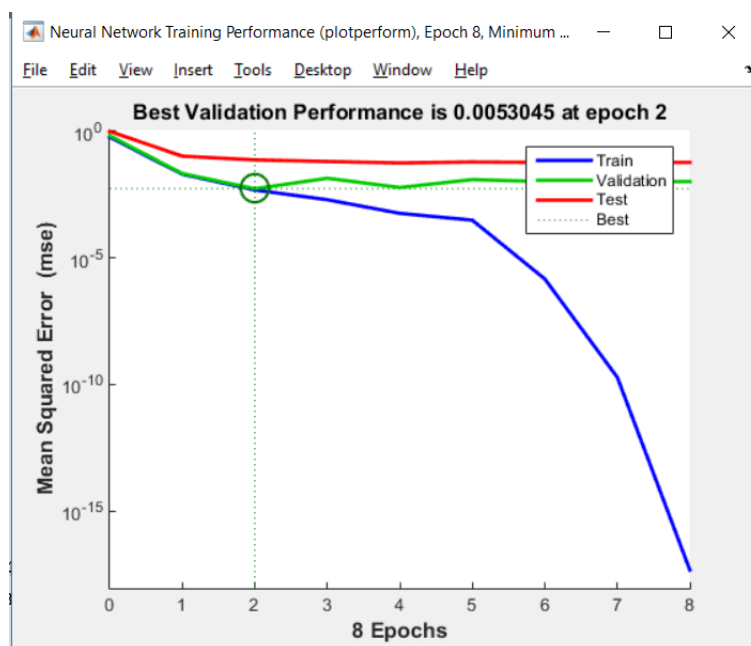


Рисунок 4.4 –Прогресс обучения нейронной сети.

4.2 Синтез нейро-сетевой модели управления процессом охлаждения

Для обучения нейронной сети вводим исходные данные из матрицы планирования ПФЭ (таблица 2.8), пример такого ввода приведен на рисунке 4.5.

Что бы обучить данную сеть выбираем входные и выходные данные с таблицы планирования.

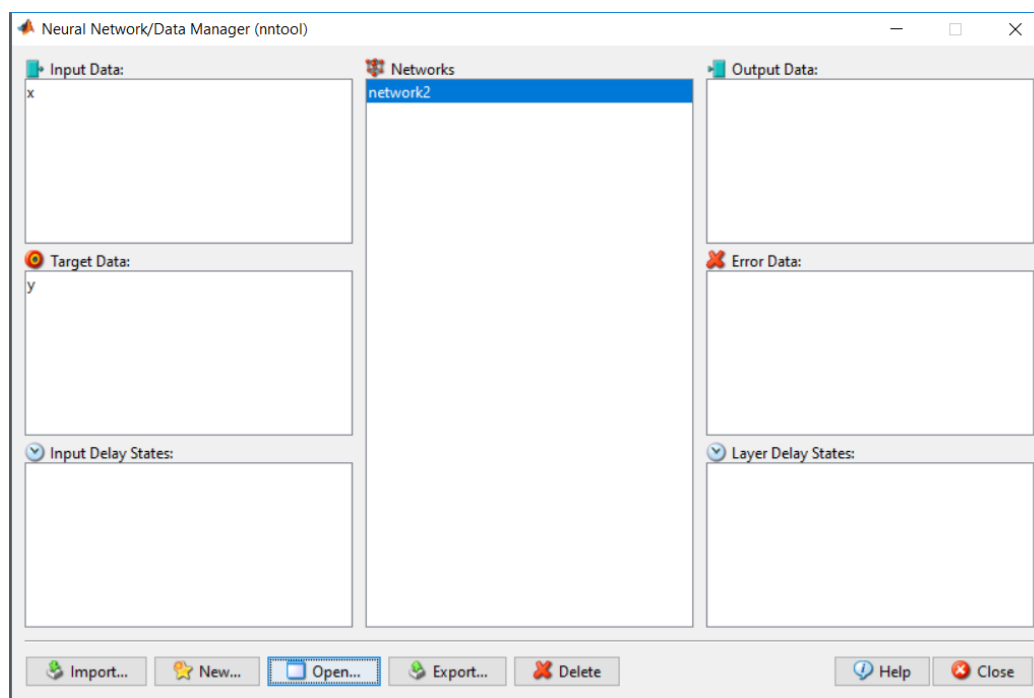


Рисунок 4.5 - Ввод входных данных

Далее создаем нейронную сеть (см. рисунок 4.6).

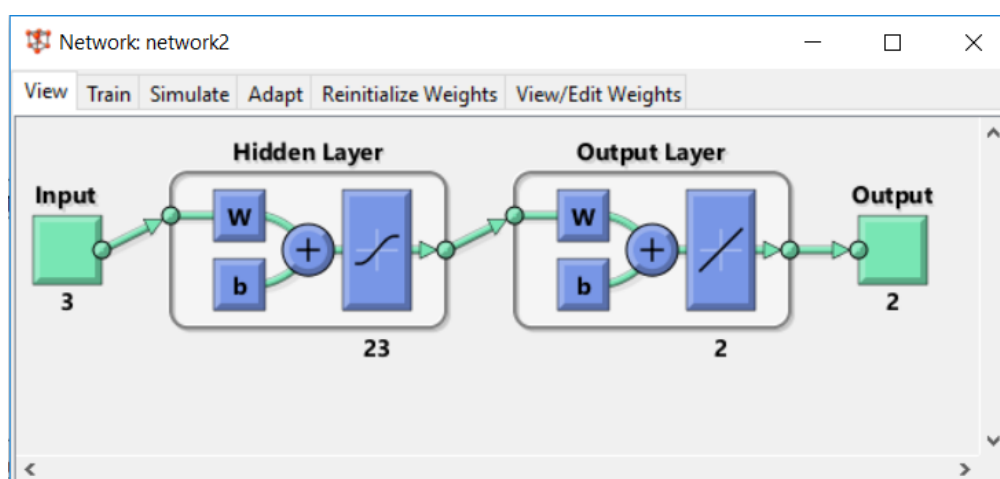


Рисунок 4.6 – Нейро-сетевая модель управления

Программа покажет прогресс и итог обучения, как показано на рисунке 4.7. На рисунке 4.8 можно увидеть графически сравнение экспериментальных значений и расчетных значений.

Нейронная структура выглядит так:

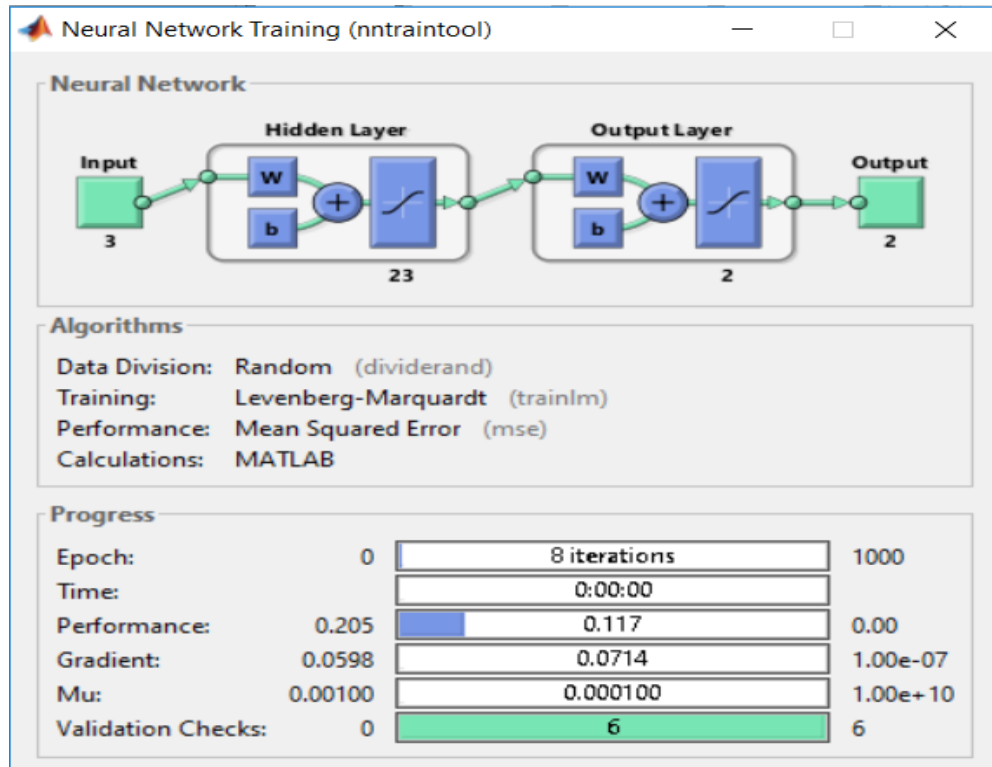


Рисунок 4.7 - Обучение нейронов по эпохам

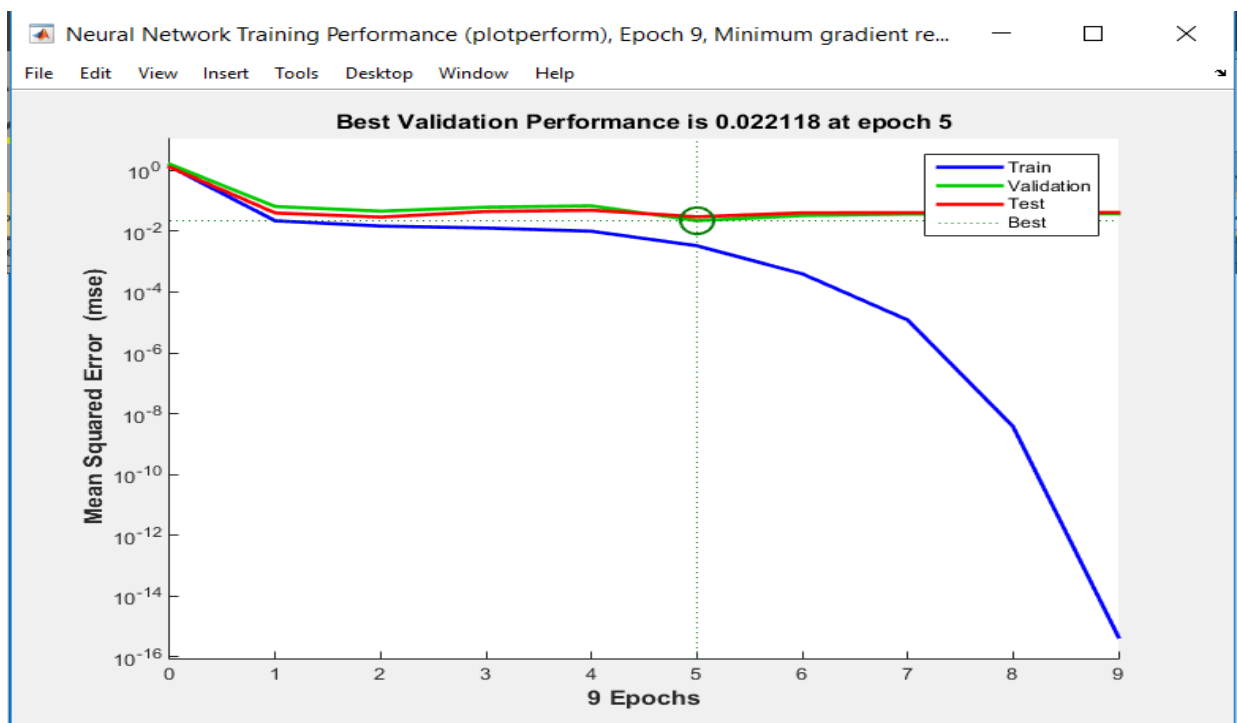


Рисунок 4.8 –Прогресс обучения нейронной сети.

4.3 Синтез нейро-сетевой модели управления процессом осаждения

Для обучения нейронной сети вводим исходные данные из матрицы планирования ПФЭ (таблица 2.9), пример такого ввода приведен на рисунке 4.9.

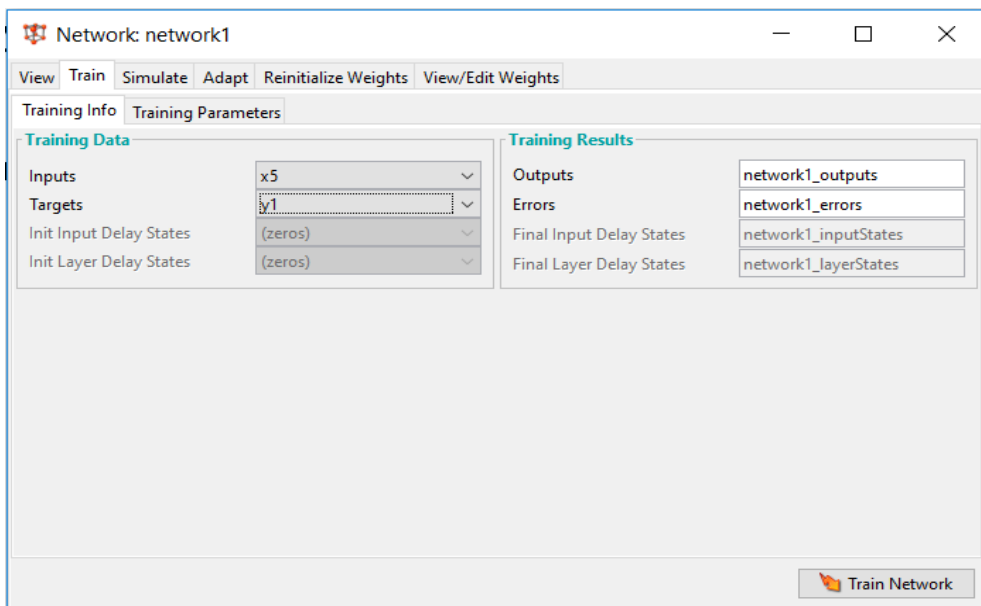


Рисунок 4.9 - Ввод входных данных

Далее создаем нейронную сеть (см. рисунок 4.10).

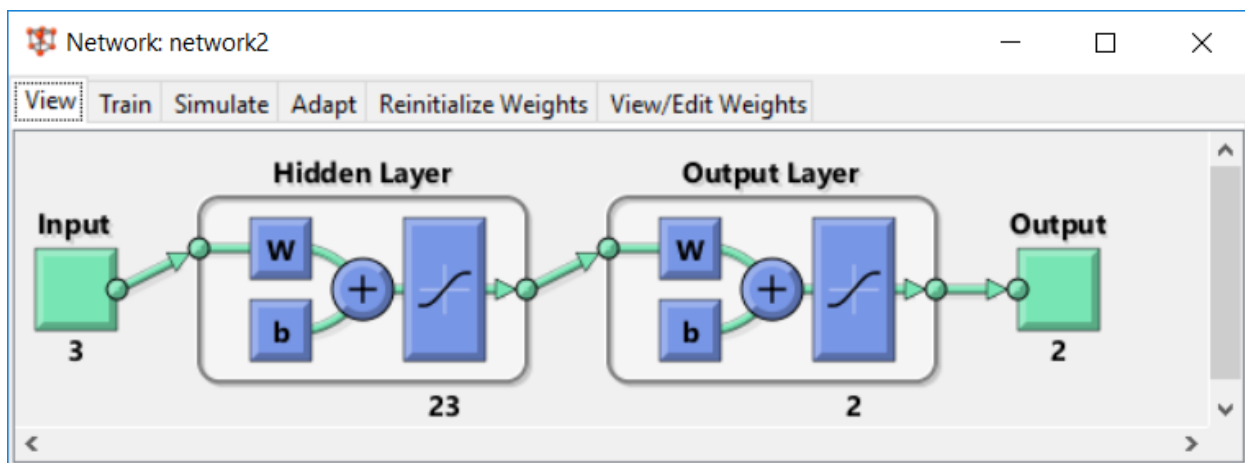


Рисунок 4.10 – Нейро-сетевая модель управления

Программа покажет прогресс и итог обучения, как показано на рисунке 4.11. На рисунке 4.12 можно увидеть графически сравнение экспериментальных значений и расчетных значений. Для того чтобы программа показала эти данные необходимо загрузить туда входные параметры и выходные параметры. В дальнейшем процесс обучения будет осуществляться с эпохами для обучения.

Обучение по эпохам выглядит так:

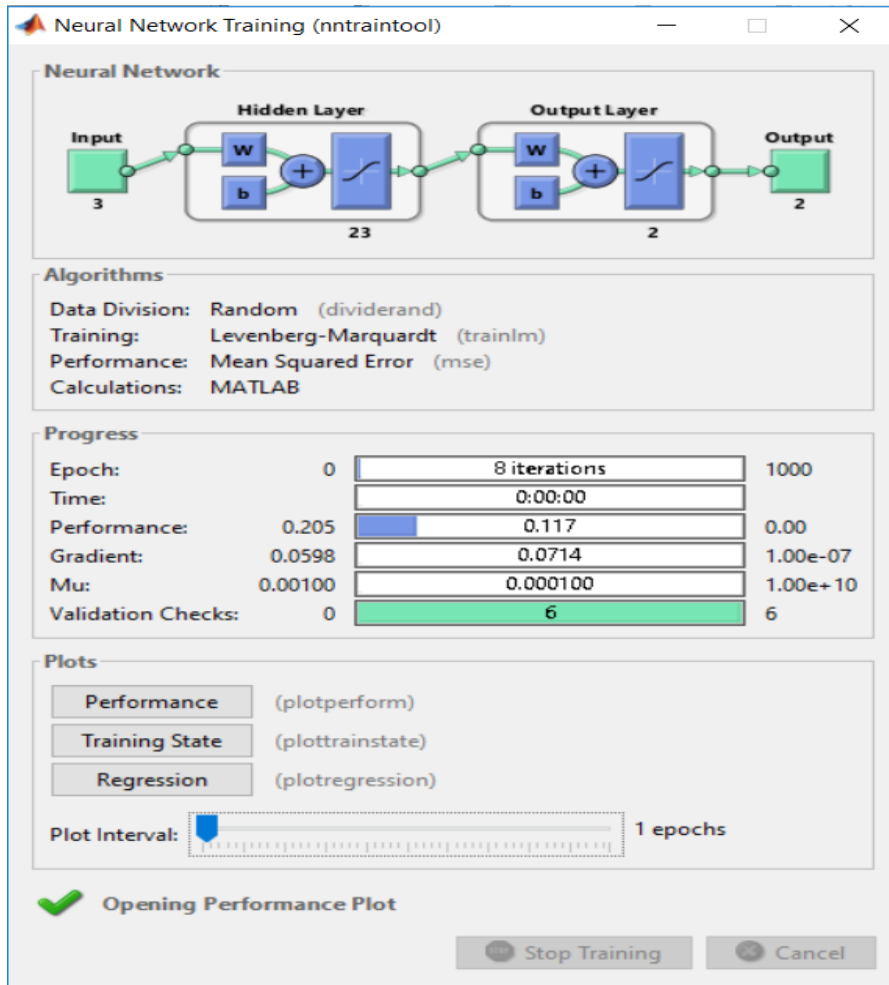


Рисунок 4.11 - Обучение нейронов по эпохам

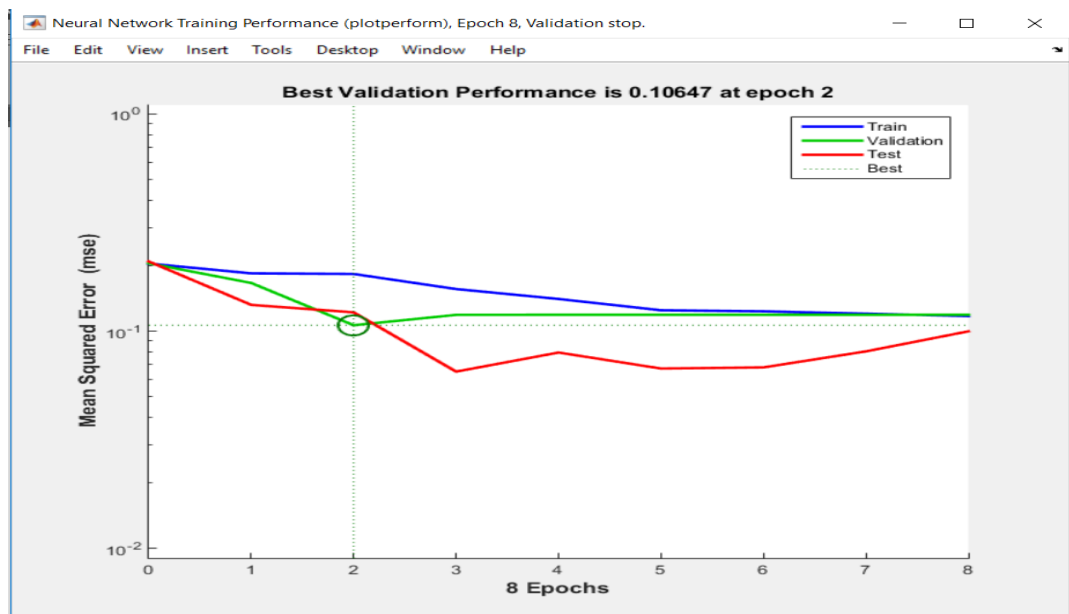


Рисунок 4.12 –Прогресс обучения нейронной сети.

5 Синтез нейро-нечеткой модели управления процессами сжигания, охлаждения и осаждения

5.1 Синтез нейро-нечеткой модели управления процессом сжигания

Вместо нечетких моделей и нейронных сетей можно применять гибридные модели, такие как нейро-нечеткие сети, которые по замыслу должны сочетать все достоинства двух выше перечисленных методов. Возможности MATLAB позволяют провести эти исследования. Для этого в MATLAB существует редактор ANFIS, который позволяет создавать или загружать, конкретную модель адаптивной системы нейро-нечеткого вывода, выполнять ее обучение, визуализировать ее структуру, изменять и настраивать ее параметры, а так же использовать настроенную сеть для получения результатов нечеткого вывода.

Вводим в главном окне команд программы MATLAB *anfisedit* и нажмем enter - открывается окно как на рисунке 5.1.

Надо заметить, что в MATLAB версии 2008 года и выше нет необходимости этого делать, так как этот редактор запускается, как и все программы через кнопку Start. Открывается редактор *anfis* как показано на рисунке 5.2.

Каждой строке данных соответствует отдельная точка графика, которая для обучающих данных изображена кружком. На горизонтальной оси указываются порядковый номер (индекс) отдельной строки данных, а вертикальная ось служит для указания значений выходной переменной. Следующим этапом создания гибридной сети является генерирование структуры системы нечеткого вывода. На данном этапе можно просмотреть архитектуру сети рисунок 5.3

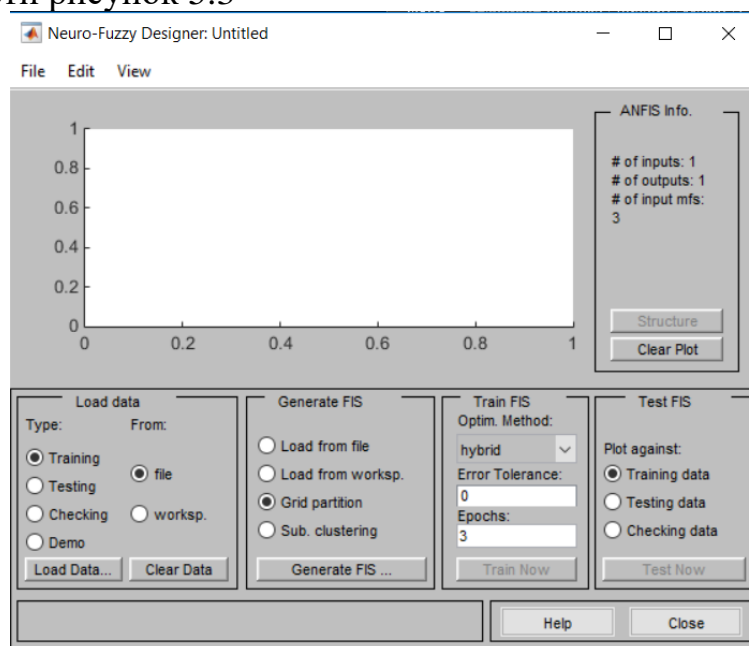


Рисунок 5.1 - Запуск редактора *anfisedit*

Чтобы посмотреть архитектуру сети, необходимо задать эпохи. Как будет задана эпоха программа отобразит процесс.

Просмотр архитектуры сети:

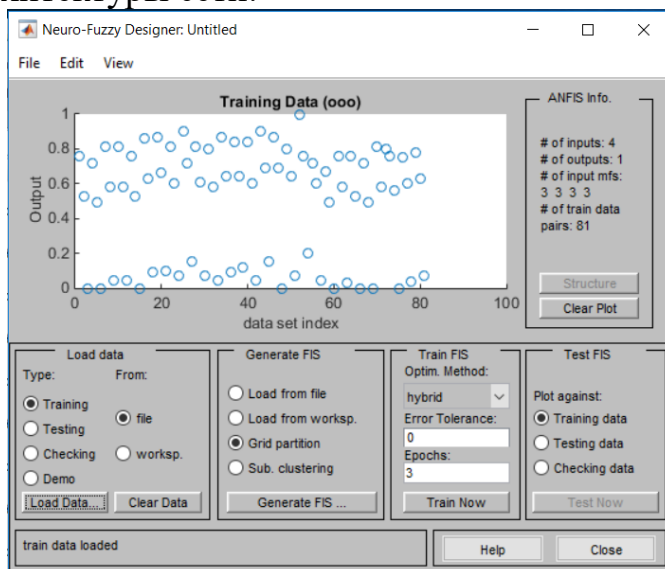


Рисунок 5.2 - AnfisEdit после загрузки данных нейронной сети

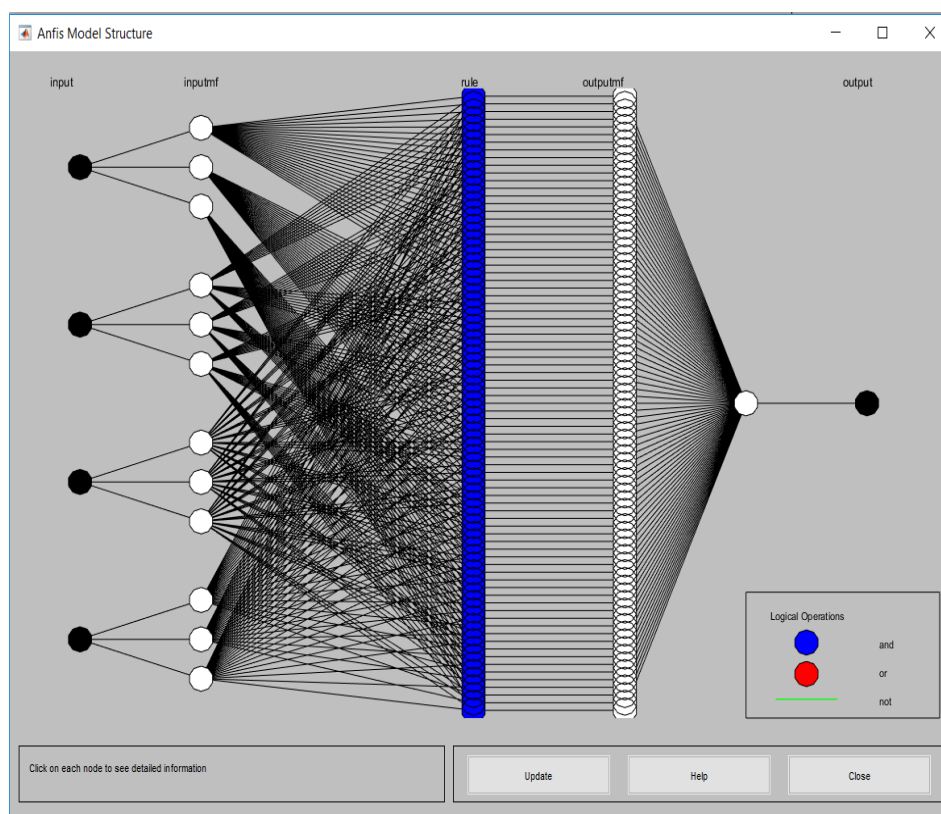


Рисунок 5.3 - Структура гибридной сети

Теперь необходимо выбрать метод обучения гибридной сети, например, метод оптимизации, количество эпох обучения, и допустимую ошибку (см. рисунок 5.4).

Представленная на рисунке 5.3 сеть представляет собой модель управления на верхнем уровне иерархии с использованием нейро-нечетких

алгоритмов. В дальнейшем эту модель можно использовать для расчета выходных переменных при любых изменениях входных.

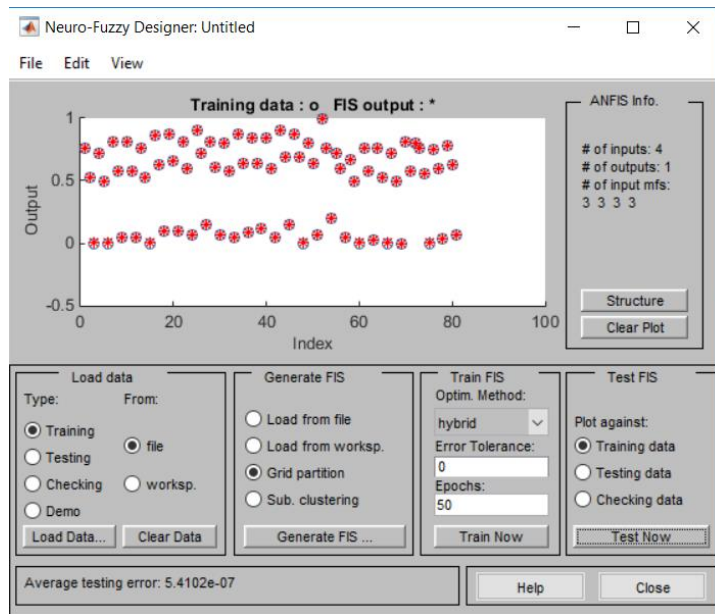


Рисунок 5.4 - Графический интерфейс редактора, после задания параметров обучения гибридной сети

После завершения обучения сети (рисунок 5.5), ее можно протестировать, загрузить проверочные данные или просмотреть и задать любые допустимые значение в FIS редакторе RuleViewer, так же как и в нечеткой логике рисунок 5.6, который представляет собой нейро-нечеткую модель управления на среднем уровне АСУТП.

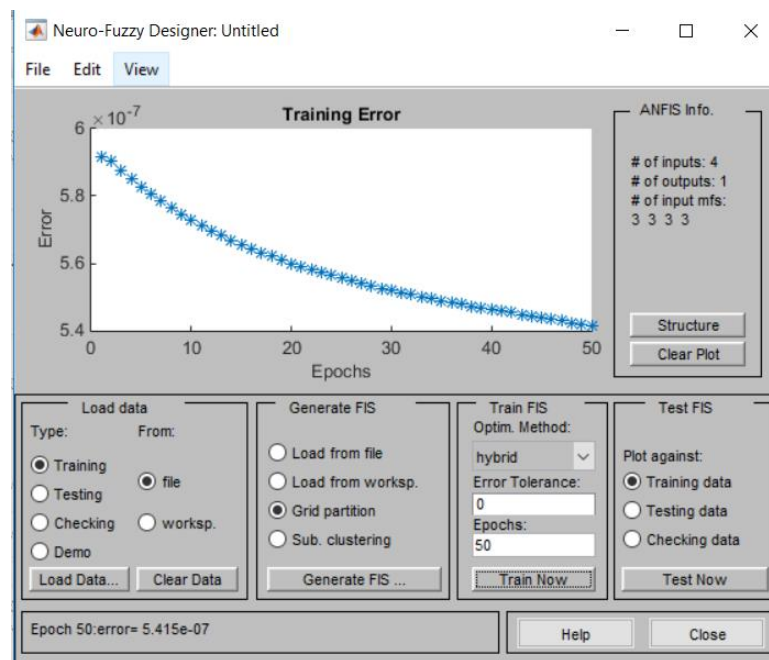


Рисунок 5.5 - Нейро-нечеткая сеть для процесса сжигания обучена

После обучения данной сети в правилах будет отображена обученная структура. Эта структура соответствует правильному и адекватному обучению.

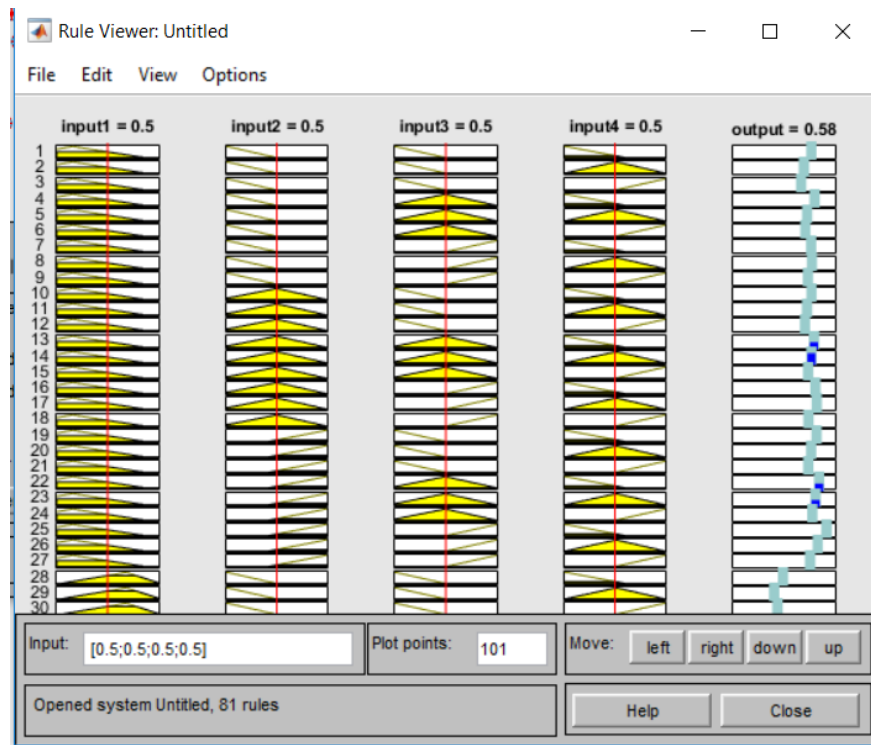


Рисунок 5.6 – Нейро-нечеткая модель управления процесса сжигания.

5.2 Синтез нейро-нечеткой модели управления процессом охлаждения

Аналогичным образом сеть строится для процесса охлаждения. На данном этапе можно просмотреть архитектуру сети рисунок 5.7-8

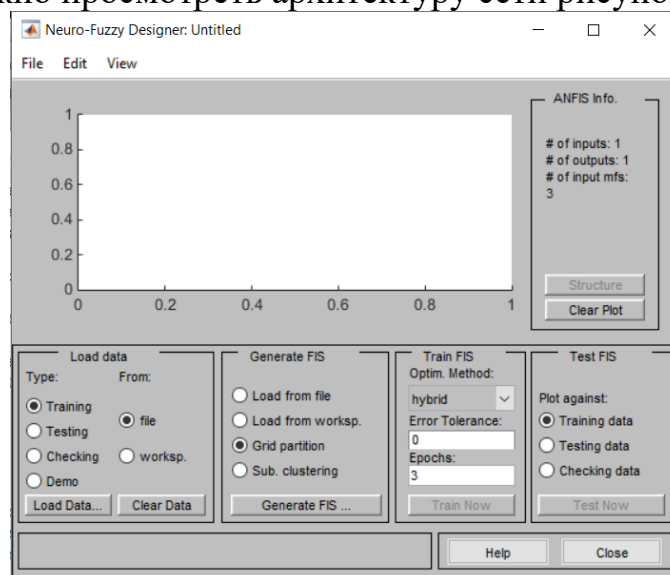


Рисунок 5.7 - Запуск редактора anfisedi

Просмотр архитектуры сети:

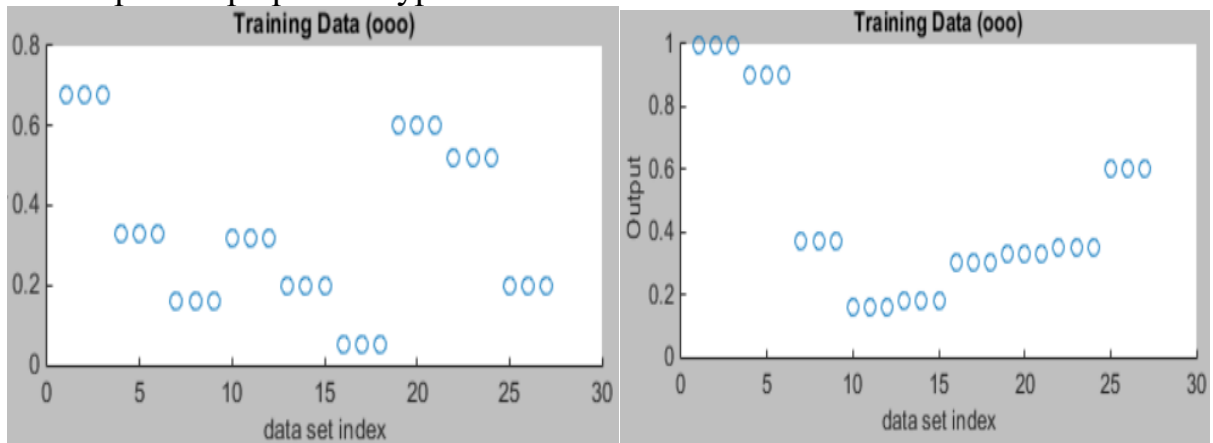


Рисунок 5.8 - AnfisEdit после загрузки данных нейронной сети

Anfis model structure:

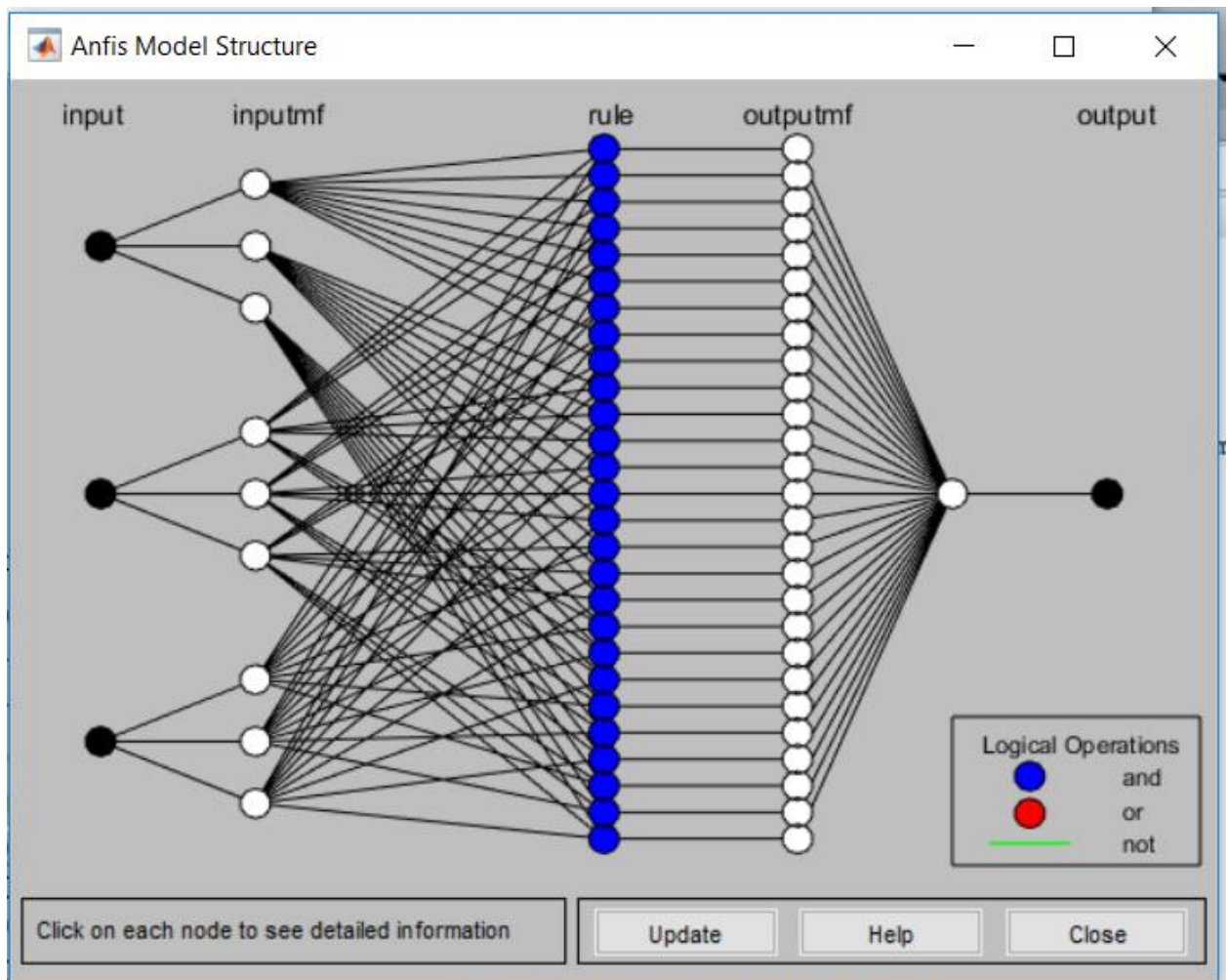


Рисунок 5.9 - Структура гибридной сети

Теперь необходимо выбрать метод обучения гибридной сети, например, метод оптимизации, количество эпох обучения, и допустимую ошибку (см. рисунок 5.10).

Представленная на рисунке 5.9 сеть представляет собой модель управления на верхнем уровне иерархии с использованием нейро-нечетких алгоритмов. В дальнейшем эту модель можно использовать для расчета выходных переменных при любых изменениях входных.

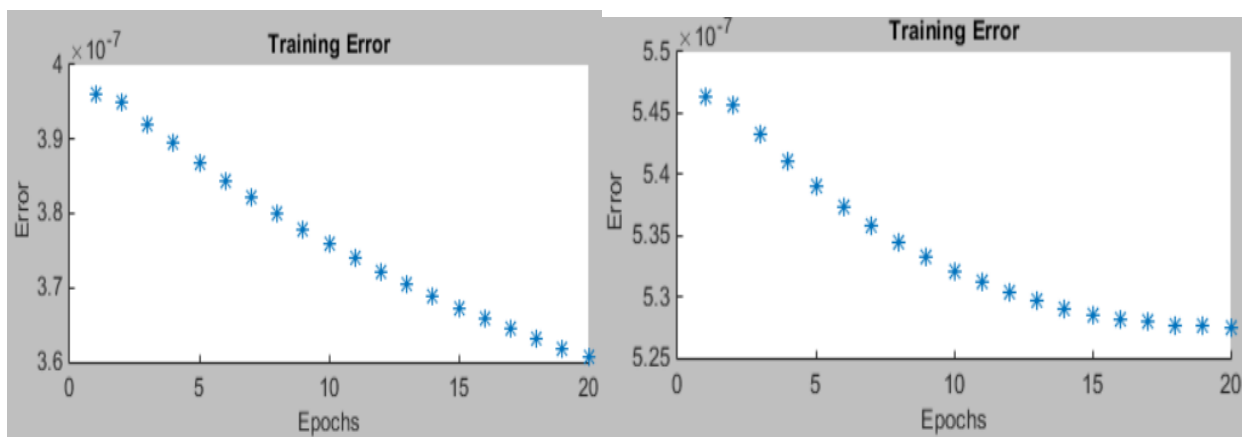


Рисунок 5.10 - Графический интерфейс редактора, после задания параметров обучения гибридной сети

После завершения обучения сети (рисунок 5.11), ее можно протестировать, загрузить проверочные данные или просмотреть и задать любые допустимые значение в FIS редакторе RuleViewer, так же как и в нечеткой логике рисунок 5.12, который представляет собой нейро-нечеткую модель управления на среднем уровне АСУТП.

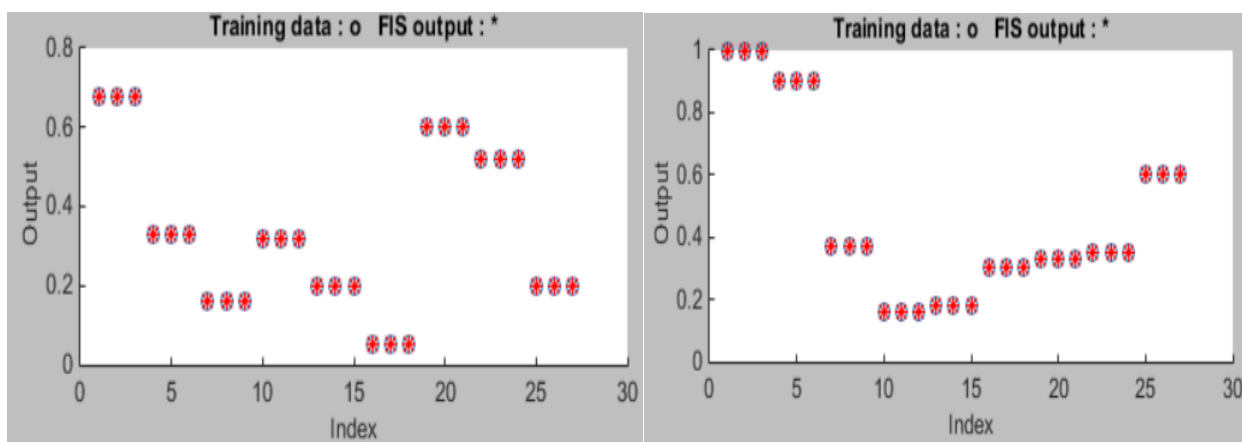


Рисунок 5.11 - Нейро-нечеткая сеть для процесса охлаждения обучена

После обучения данной сети:

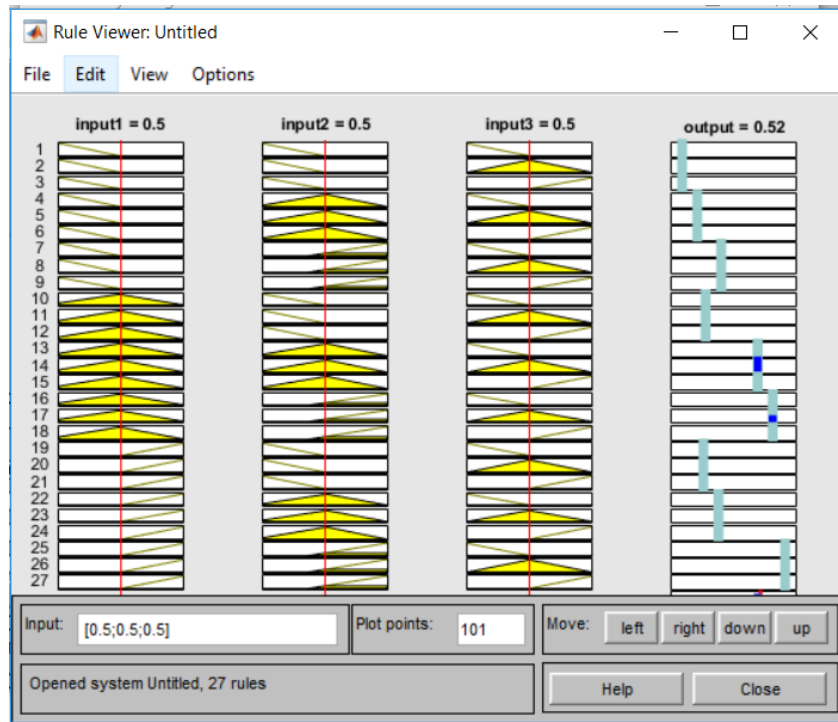


Рисунок 5.12 – Нейро-нечеткая модель управления процесса охлаждения.

5.3 Синтез нейро-нечеткой модели управления процессом осаждения

Таким же образом построим сеть для осаждения. В данном этапе можно посмотреть архитектуру сети рисунок 5.13-14.

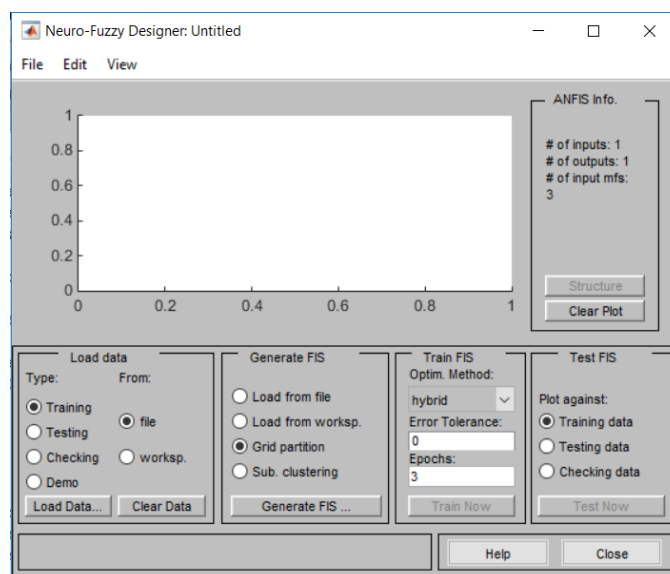


Рисунок 5.13 - Запуск редактора anfisedit

Просмотр архитектуры сети:

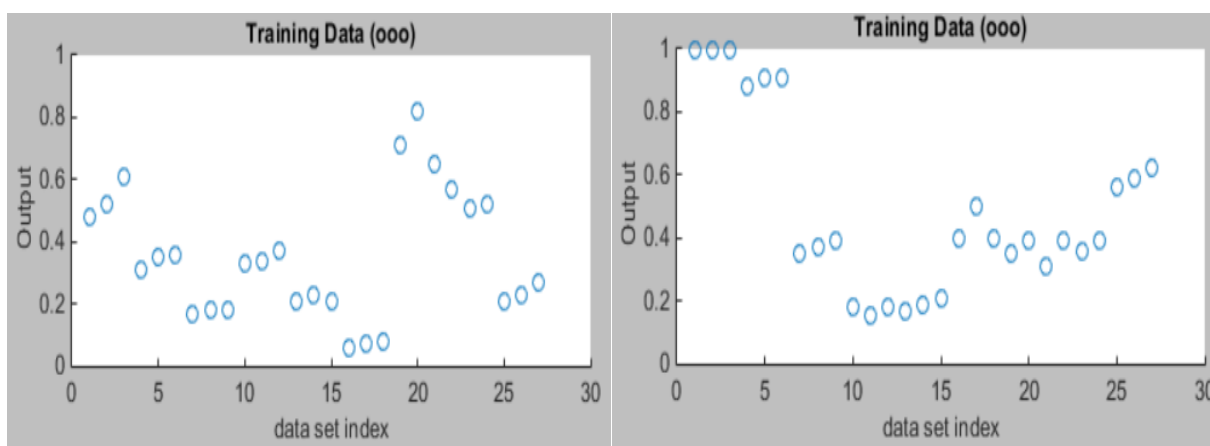


Рисунок 5.14 - AnfisEdit после загрузки данных нейронной сети

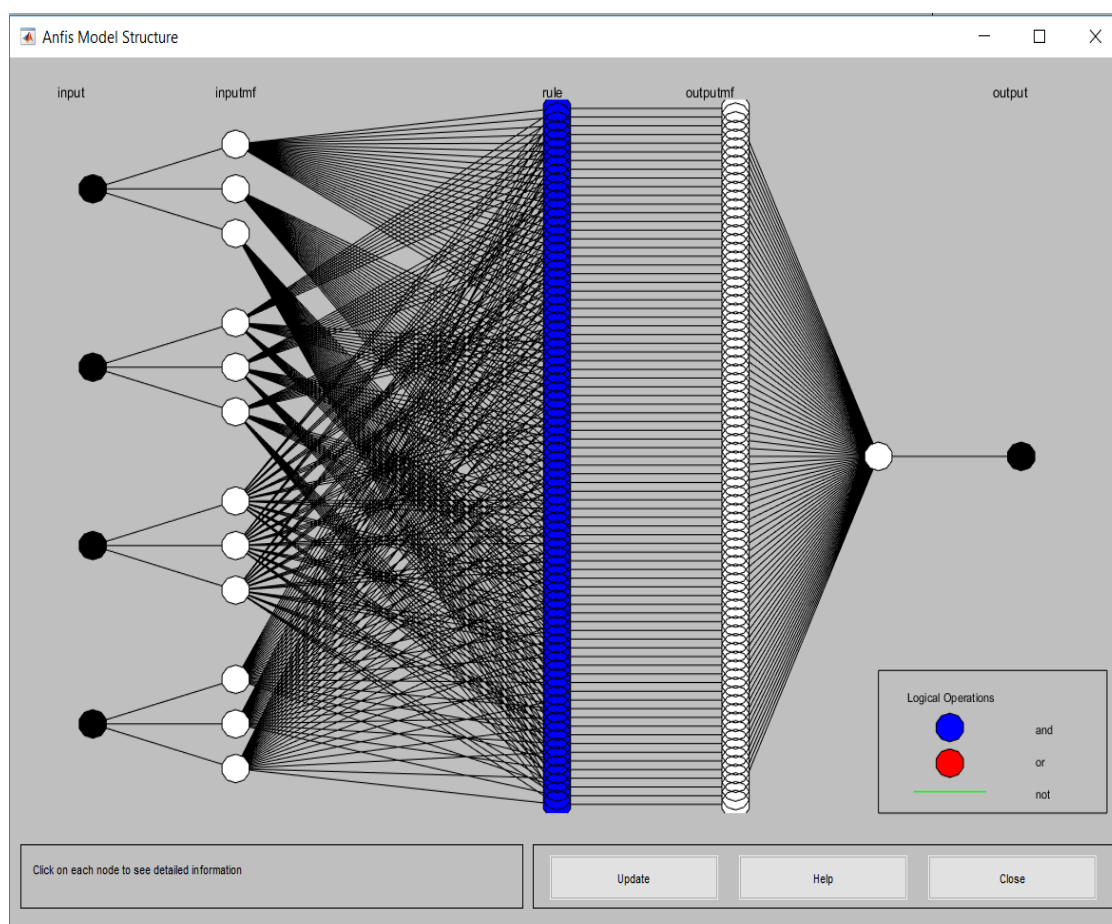


Рисунок 5.15- Структура гибридной сети

Теперь необходимо выбрать метод обучения гибридной сети (см. рисунок 5.16). Представленная на рисунке 5.15 сеть представляет собой модель управления на верхнем уровне иерархии с использованием нейро-нечетких алгоритмов. В дальнейшем эту модель можно использовать для расчета выходных переменных при любых изменениях входных.

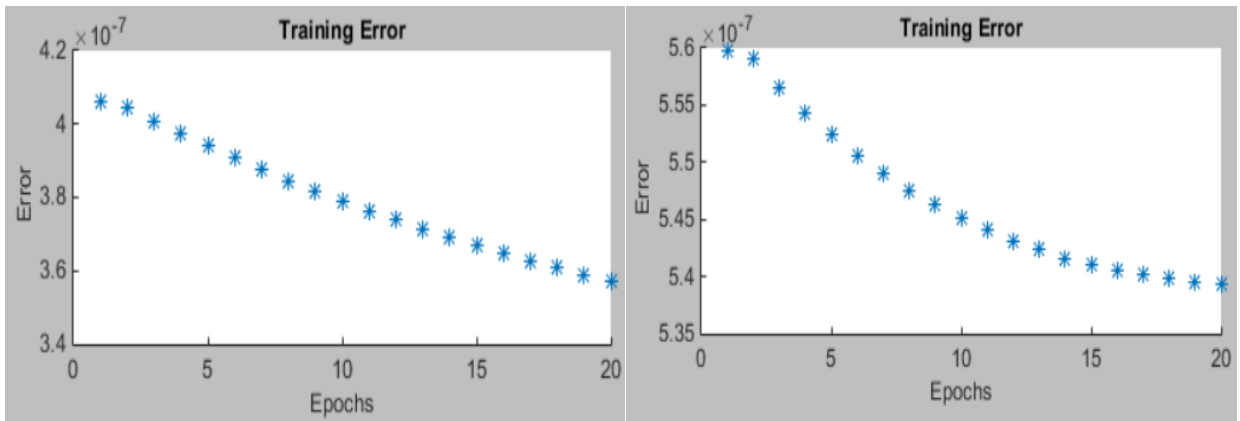


Рисунок 5.16 - Графический интерфейс редактора, после задания параметров обучения гибридной сети (осаждение)

После завершения обучения сети (рисунок 5.17), ее можно протестировать, загрузить проверочные данные или просмотреть и задать любые допустимые значение в FIS редакторе RuleViewer, так же как и вчеткой логике рисунок 5.18, котрый представляет собой нейро-нечеткую модель управления на среднем уровне АСУТП.

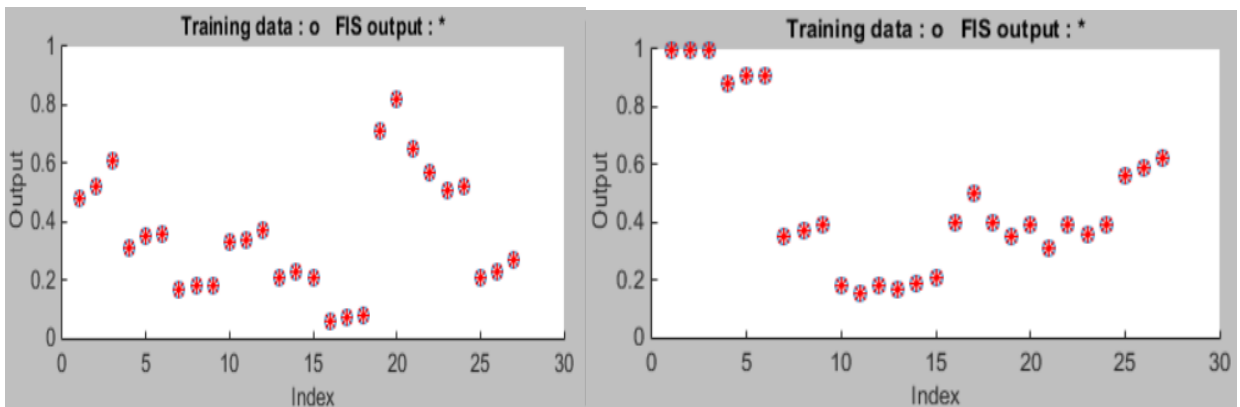


Рисунок 5.17 - Нейро-нечеткая сеть для процесса осаждения обучена

После обучения данной сети:



Рисунок 5.18 – Нейро-нечеткая модель управления для процесса осаждения

При обучении сети применялись всевозможные методы для успешного обучения. Для оценки произведенной работы необходимо исследовать модель на адекватность. В дальнейшем исследование нейро-нечеткой модели на адекватность, однозначность, чувствительность и устойчивость показывают её эффективность и возможность применения на практике.

6 Исследование полученных моделей на адекватность

6.1 Оценка адекватности моделей управления процессами сжигания, охлаждения и осаждения

В общем случае под *адекватностью* понимают степень соответствия модели тому реальному явлению или объекту, для описания которого она строится. Создаваемая модель ориентирована на исследование определенного подмножества свойств этого объекта. Поэтому можно считать, что адекватность модели определяется степенью ее соответствия не столько реальному объекту, сколько целям исследования. В наибольшей степени это утверждение справедливо относительно моделей проектируемых систем (т. е. в ситуациях, когда реальная система вообще не существует). Тем не менее, во многих случаях полезно иметь формальное подтверждение (или обоснование) адекватности разработанной модели. Один из наиболее распространенных способов такого обоснования – использование методов математической статистики. Суть этих методов заключается в проверке выдвинутой гипотезы (в данном случае об адекватности модели) на основе некоторых статистических критериев. При этом следует заметить, что при проверке гипотез методами математической статистики необходимо иметь в виду, что статистические критерии не могут доказать ни одной гипотезы – они могут лишь указать на отсутствие опровержения. Процедура оценки основана на сравнении измерений на реальной системе и результатов экспериментов на модели и может проводиться различными способами.

Наиболее распространенные из них:

- по средним значениям откликов модели и системы;
- по дисперсиям отклонений откликов модели от среднего значения откликов системы;
- по максимальному значению относительных отклонений откликов модели от откликов системы;
- по средней абсолютной ошибке.

6.2 Оценка моделей управления на адекватность процессам сжигания

В связи с тем, что метод планирования эксперимента показал nepозволительно высокое значение абсолютной ошибки – свыше 14%, мы не будем проводить его дальнейшие исследования. Проведем сравнительный анализ на адекватность интеллектуальных.

Результаты исследований интеллектуальных моделей управления приведены в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты моделирования интеллектуальных моделей

№ эксперимента	Нечеткая логика	Нейронная сеть	Нейро-нечеткая сеть	Правильный ответ Y
1	0,74	0,733	0,75	0,76
2	0,525	0,522	0,552	0,53
3	0,001	0,003	0	0
4	0,7177	0,7089	0,719	0,72
5	0,4964	0,4816	0,49	0,49
6	0,017	0,013	0,02	0
7	0,8099	0,80	0,81	0,81
8	0,578	0,543	0,589	0,58
9	0,037	0,042	0,049	0,046
10	0,823	0,8234	0,81	0,81
11	0,57	0,5953	0,58	0,58
12	0,0234	0,0345	0,043	0,046
13	0,7498	0,745	0,76	0,76
14	0,54	0,5689	0,531	0,53
15	0,01	0,022	0,01	0
16	0,85	0,812	0,86	0,86
17	0,6156	0,6123	0,6234	0,63
18	0,087	0,082	0,094	0,092
19	0,859	0,834	0,86	0,87
20	0,643	0,642	0,66	0,66
21	0,12	0,11	0,1	0,1
22	0,85	0,8588	0,83	0,81
23	0,6158	0,5782	0,6008	0,6
24	0,064	0,063	0,068	0,07
25	0,87	0,84	0,9	0,9
26	0,7190	0,7145	0,7199	0,72
27	0,1466	0,1398	0,1484	0,15
28	0,8012	0,8017	0,8093	0,81
29	0,6028	0,6056	0,6065	0,61
30	0,09	0,011	0,08	0,07
31	0,7913	0,7926	0,795	0,8
32	0,5756	0,5716	0,58	0,58
33	0,027	0,023	0,045	0,046
34	0,85	0,8571	0,8602	0,87
35	0,6476	0,6312	0,6398	0,64
36	0,078	0,083	0,09	0,09
37	0,8523	0,8567	0,8419	0,84
38	0,6238	0,6221	0,63	0,64

Продолжение таблицы 6.1

39	0,13	0,1345	0,128	0,12
40	0,8217	0,8239	0,8256	0,84
41	0,56	0,61	0,6	0,6
42	0,028	0,0219	0,034	0,046
43	0,85	0,83	0,9	0,9
44	0,68	0,7228	0,69	0,69
45	0,1476	0,1399	0,1417	0,15
46	0,8662	0,8643	0,8679	0,87
47	0,6713	0,6744	0,6818	0,69
48	0,003	0,01	0	0
49	0,7892	0,7913	0,796	0,8
50	0,6347	0,6324	0,6398	0,64
51	0,067	0,065	0,068	0,07
52	0,99	0,9914	0,999	1
53	0,7567	0,7612	0,7601	0,76
54	0,197	0,2305	0,2	0,2
55	0,7062	0,7104	0,7222	0,72
56	0,58	0,5803	0,69	0,6
57	0,029	0,023	0,037	0,046
59	0,4782	0,4407	0,48	0,49
60	0,0019	0,0013	0	0
61	0,759	0,7553	0,7596	0,76
62	0,5861	0,5899	0,573	0,58
63	0,07	0,06	0,02	0,03
65	0,5273	0,5489	0,5308	0,53
66	0,006	0,004	0,001	0
67	0,736	0,7405	0,7215	0,72
68	0,49	0,4862	0,49	0,49
69	0,01	0,03	0,01	0
70	0,8059	0,8015	0,81	0,81
71	0,5741	0,5813	0,5784	0,58
72	0,7825	0,7845	0,8002	0,8
73	0,76	0,7519	0,7608	0,76
74	0,5603	0,5599	0,56	0,56
75	0,008	0,01	0	0
76	0,742	0,7378	0,75	0,75
77	0,5689	0,6	0,6	0,6
78	0,023	0,039	0,038	0,04
79	0,7741	0,7826	0,7897	0,78
80	0,63	0,6229	0,6304	0,63
81	0,05	0,09	0,068	0,07

Результаты моделирования и величины ошибок различных моделей были сведены в таблицу 6.2. При этом величина абсолютной ошибки рассчитывалась по формуле 1.2.

Таблица 6.2 - Сравнительная оценка абсолютной ошибки для различных методов

Метод моделирования	Величина абсолютной ошибки %
	Y
1. Нечеткие алгоритмы	1,3
2. Нейросетевые алгоритмы	2,4
4. Нейро-нечеткие сети	0,6

Анализ таблицы 6.2 показал, что интеллектуальные модели показали свое преимущество: от 0,6 % до 2,4%, при этом наилучшим оказался метод нейро-нечетких сетей (0,6%).

Таким образом, проведенные исследования показали высокую эффективность алгоритмов управления, полученных с помощью методов искусственного интеллекта. По сравнению с классическими методами построения аналитико-статистических моделей методы, основанные на знаниях, опыте интуиции людей-экспертов позволяют создавать системы оптимального управления сложными технологическими процессами значительно легче, быстрее и эффективнее. При этом оценка адекватности интеллектуальных моделей на порядок выше, чем при традиционном моделировании.

На рисунке 6.1 показаны изменение температуры после расхода рециркуляционных газов (X_1), расхода сжатого воздуха (X_2), расхода технического кислорода (X_3) и расхода желтого фосфора из дозатора (X_4). Каждая кривая была получена при значении остальных входных переменных, равными по 0,5 – т.е. при номинальных значениях. Значения точек на кривых рисунка 6.1 были взяты из матрицы планирования ПФЭ, сформированные экспертами – операторами и ИТР цеха №6 НДФЗ.

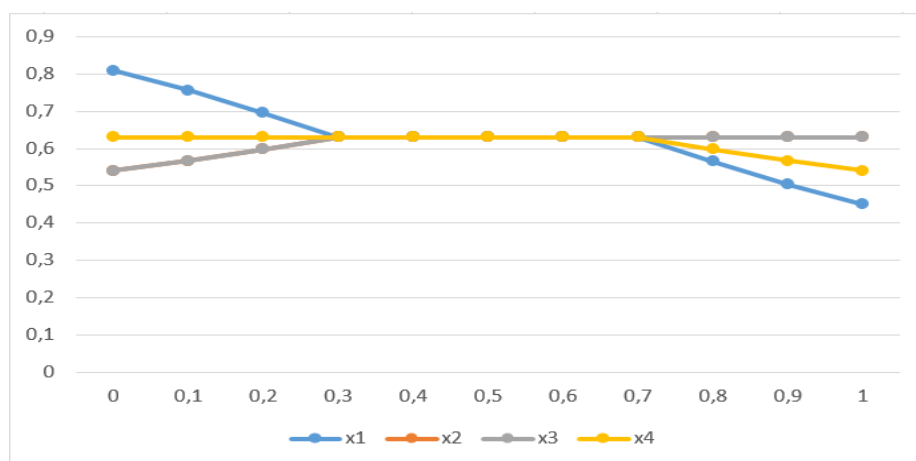


Рисунок 6.1 – Кривые, полученные по матрице планирования ПФЭ

Результаты моделирования тремя типами моделей приведены на рисунках 6.2 – 6.3.

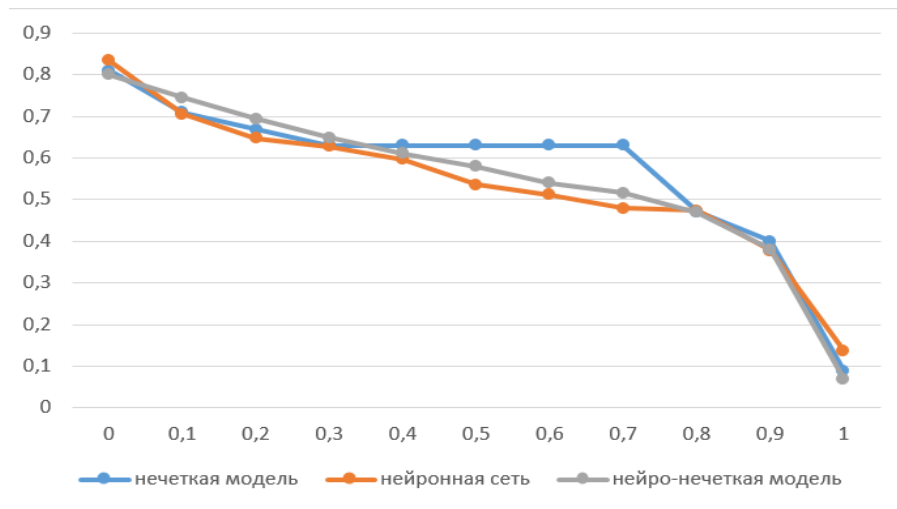


Рисунок 6.2 – Результаты моделирования тремя типами моделей при изменении X_2 и при номинальных значениях $X_{1,3,4}=0,5$

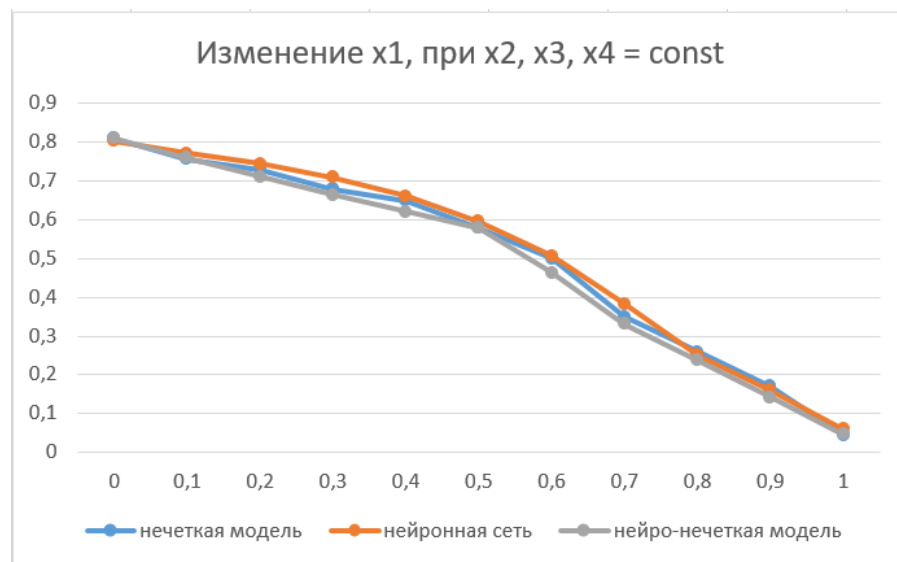


Рисунок 6.3–Результаты моделирования тремя типами моделей при изменении X_1 и при номинальных значениях $X_{2,3,4}=0,5$

6.3 Оценка моделей управления на адекватность процессам охлаждения

Результаты оценки интеллектуальной модели управления процесса охлаждения для переменной y_2 приведены в таблицу 6.3.

Таблица 6.3

№ эксперимента	Нечеткая логика	Нейронная сеть	Нейро-нечеткая сеть	Правильный ответ Y_2
1	0,6823	0,6827	0,6813	0,68
2	0,6746	0,6783	0,6807	0,68
3	0,6753	0,6812	0,68	0,68
4	0,3347	0,3341	0,33	0,33
5	0,33	0,3331	0,33	0,33
6	0,3242	0,3234	0,3288	0,33
7	0,1632	0,1665	0,16	0,16
8	0,1625	0,1643	0,1602	0,16
9	0,1607	0,1621	0,1604	0,16
10	0,3166	0,3145	0,3179	0,32
11	0,3187	0,3165	0,3199	0,32
12	0,3162	0,3104	0,32	0,32
13	0,2132	0,21	0,2	0,2
14	0,1909	0,1892	0,198	0,2
15	0,2023	0,2043	0,2	0,2
16	0,07	0,07	0,058	0,05
17	0,047	0,043	0,0497	0,05
18	0,04	0,039	0,05	0,05
19	0,6088	0,6025	0,6	0,6
20	0,614	0,623	0,6078	0,6
21	0,6087	0,6073	0,601	0,6
22	0,5127	0,5111	0,5173	0,52
23	0,4938	0,4921	0,5001	0,52
24	0,5217	0,5235	0,522	0,52
25	0,2026	0,2043	0,2	0,2
26	0,2032	0,21	0,2	0,2
27	0,1969	0,1942	0,1987	0,2

Результаты оценки интеллектуальной модели управления процесса охлаждения для переменной u_3 приведены в таблицу 6.4.

Таблица 6.4

№ эксперимента	Нечеткая логика	Нейронная сеть	Нейро-нечеткая сеть	Правильный ответ Y_3
1	0,9916	0,9954	0,9989	1
2	0,9812	0,9803	0,9907	1
3	0,98	0,9872	0,99	1
4	0,9046	0,9083	0,9007	0,9
5	0,89	0,8922	0,8978	0,9
6	0,8938	0,8921	0,9001	0,9

Продолжение таблицы 6.4

7	0,3687	0,3735	0,3679	0,37
8	0,367	0,3634	0,3702	0,37
9	0,3642	0,3643	0,3704	0,37
10	0,1607	0,1621	0,1604	0,16
11	0,1632	0,1665	0,16	0,16
12	0,1632	0,1665	0,16	0,16
13	0,1783	0,1797	0,1806	0,18
14	0,1809	0,1792	0,18	0,18
15	0,1742	0,1734	0,1788	0,18
16	0,3017	0,3019	0,3002	0,3
17	0,2906	0,2945	0,2967	0,3
18	0,29	0,2922	0,2978	0,3
19	0,3262	0,3204	0,33	0,33
20	0,3287	0,3265	0,3299	0,33
21	0,3266	0,3245	0,3279	0,33
22	0,3447	0,3441	0,35	0,35
23	0,3576	0,3554	0,3516	0,35
24	0,35	0,3478	0,35	0,35
25	0,6087	0,6073	0,601	0,6
26	0,614	0,623	0,6078	0,6
27	0,6088	0,6025	0,6	0,6

Результаты моделирования и величины ошибок различных моделей были сведены в таблицу 6.5. Величина абсолютной ошибки была рассчитана по формуле 1.2.

Таблица 6.5 - Сравнительная оценка абсолютной ошибки для различных методов

Метод моделирования	Величина абсолютной ошибки %
	У
1. Нечеткие алгоритмы	1,1
2. Нейросетевые алгоритмы	2,5
4. Нейро-нечеткие сети	0,5

Анализ таблицы 6.5 показал, что интеллектуальные модели показали свое преимущество: от 0,5 % до 2,5%, при этом наилучшим оказался метод нейро-нечетких сетей (0,5%).

Таким образом, проведенные исследования показали высокую эффективность алгоритмов управления, полученных с помощью методов искусственного интеллекта. По сравнению с классическими методами построения аналитико-статистических моделей методы, основанные на знаниях, опыте интуиции людей-экспертов позволяют создавать системы

оптимального управления сложными технологическими процессами значительно легче, быстрее и эффективнее. При этом оценка адекватности интеллектуальных моделей на порядок выше, чем при традиционном моделировании.

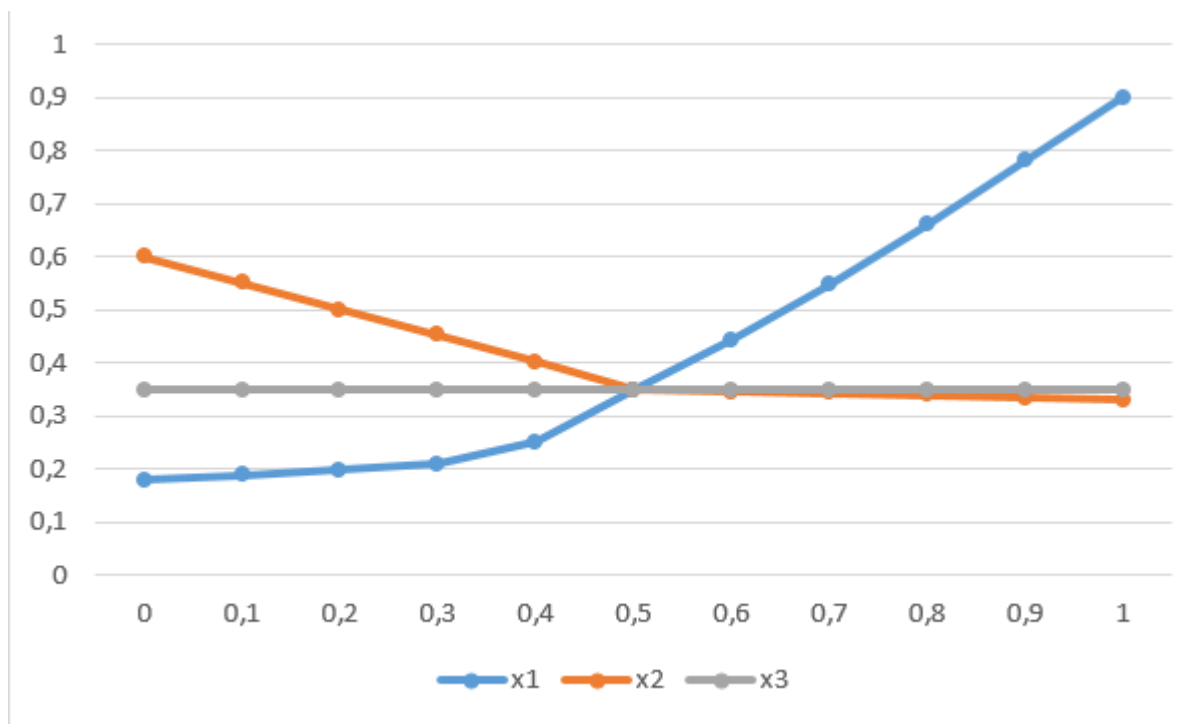


Рисунок 6.4 – Кривые, полученные по матрице планирования ПФЭ для переменной y_4

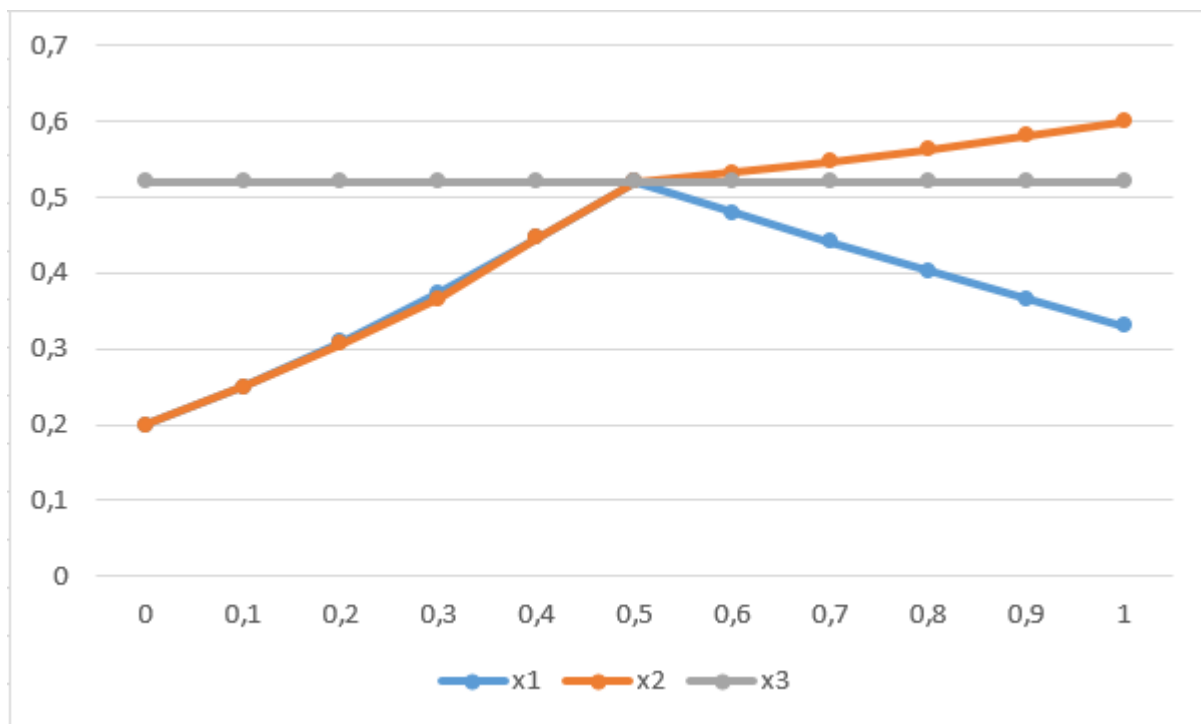


Рисунок 6.5 – Кривые, полученные по матрице планирования ПФЭ для переменной y_5

Результаты моделирования тремя типами моделей приведены на рисунках 6.6 – 6.7.

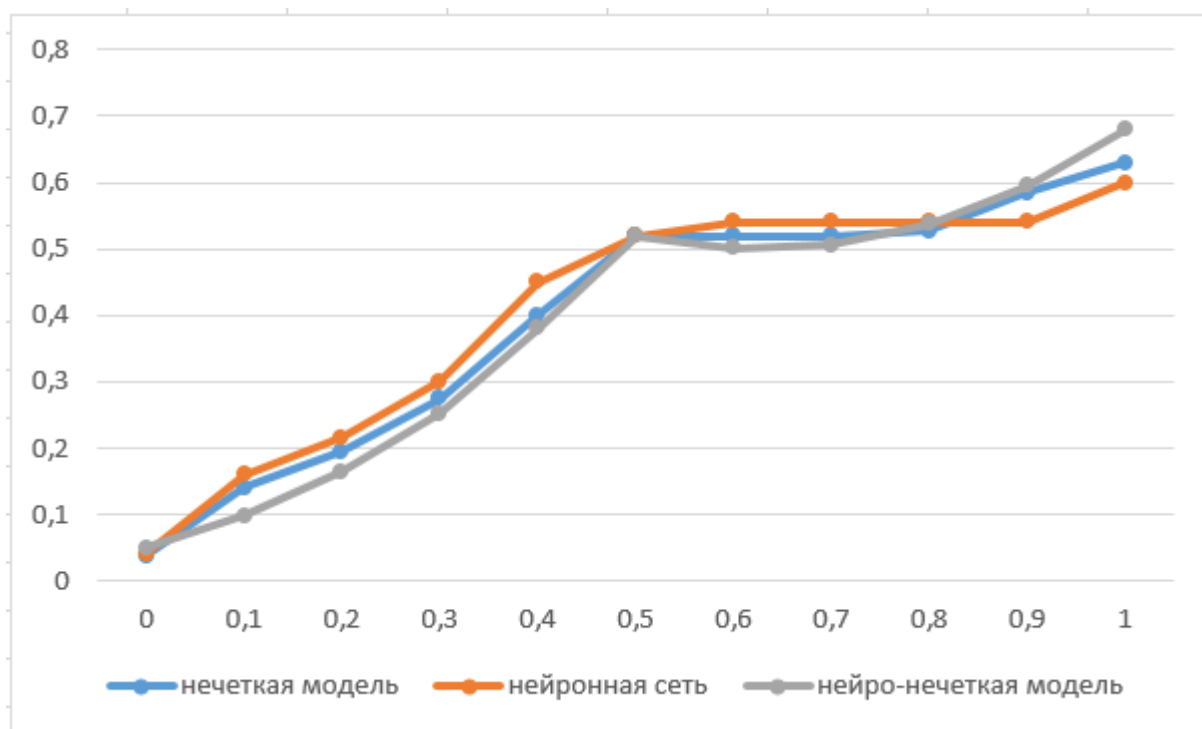


Рисунок 6.6 – Результаты моделирования разными типами моделей для переменной y_4

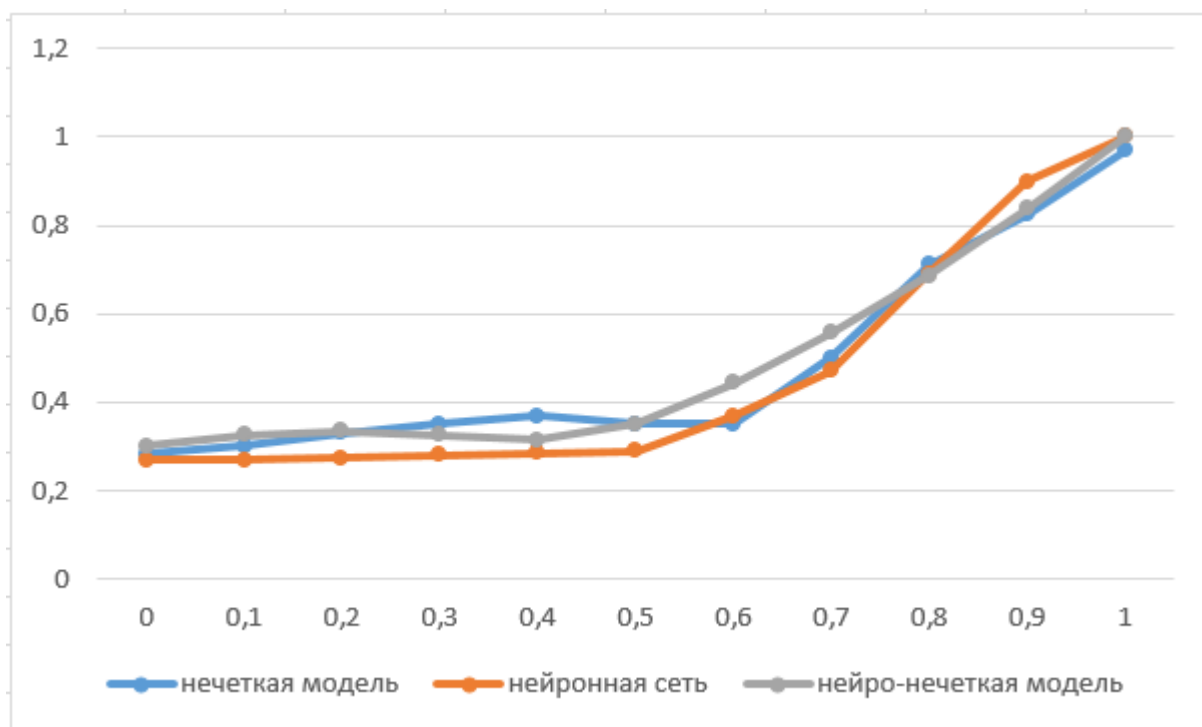


Рисунок 6.7 – Результаты моделирования разными типами моделей для переменной y_5

6.5 Оценка моделей управления на адекватность процессом осаждения

Итоги оценки интеллектуальной модели управления процесса осаждения для переменной Y_4 приведены в таблицу 6.6. В таблице указаны каждая из моделей управления исследованные разными методами.

Таблица 6.6 – Оценки моделей управления процессом осаждения для Y_4

№ эксперимента	Нечеткая логика	Нейронная сеть	Нейро-нечеткая сеть	Правильный ответ Y_4
1	0,472	0,468	0,479	0,48
2	0,5127	0,5111	0,5173	0,52
3	0,6088	0,6025	0,61	0,61
4	0,3117	0,3119	0,3102	0,31
5	0,35	0,3478	0,35	0,35
6	0,3562	0,3604	0,36	0,36
7	0,167	0,1634	0,1702	0,17
8	0,1783	0,1797	0,1806	0,18
9	0,1809	0,1792	0,18	0,18
10	0,3206	0,3245	0,3267	0,33
11	0,3476	0,3454	0,3416	0,34
12	0,3687	0,3735	0,3679	0,37
13	0,2056	0,2054	0,2078	0,21
14	0,2387	0,2366	0,23	0,23
15	0,2132	0,22	0,21	0,21
16	0,07	0,07	0,068	0,06
17	0,09	0,011	0,07	0,07
18	0,1	0,1	0,09	0,08
19	0,714	0,723	0,7078	0,71
20	0,8245	0,8267	0,8212	0,82
21	0,6483	0,6437	0,6488	0,65
22	0,5621	0,5645	0,5632	0,57
23	0,5167	0,5174	0,5092	0,51
24	0,5187	0,5172	0,52	0,52
25	0,2023	0,2043	0,21	0,21
26	0,2367	0,2286	0,2301	0,23
27	0,2642	0,2643	0,2704	0,27

Следствия оценки интеллектуальной модели управления процесса осаждения для переменной Y_5 приведены в таблицу 6.7.

Таблица 6.7 - Оценки моделей управления процессом осаждения для Y_5

№ эксперимента	Нечеткая логика	Нейронная сеть	Нейро-нечеткая сеть	Правильный ответ Y_5
1	0,98	0,9872	0,99	1
2	0,9812	0,9803	0,9907	1
3	0,9916	0,9954	0,9989	1
4	0,8721	0,8713	0,878	0,88
5	0,9146	0,9183	0,9107	0,91
6	0,9112	0,9123	0,9102	0,91
7	0,3447	0,3441	0,35	0,35
8	0,3703	0,623	0,3709	0,37
9	0,39	0,3831	0,39	0,39
10	0,1742	0,1734	0,1788	0,18
11	0,1532	0,1465	0,15	0,15
12	0,1807	0,1821	0,1804	0,18
13	0,1725	0,1743	0,1702	0,17
14	0,1853	0,1857	0,1823	0,19
15	0,21	0,2056	0,21	0,21
16	0,39	0,3922	0,3978	0,4
17	0,4938	0,4921	0,5001	0,5
18	0,3909	0,3895	0,3967	0,4
19	0,3478	0,3487	0,3489	0,35
20	0,3967	0,3912	0,39	0,39
21	0,3154	0,3157	0,3107	0,31
22	0,3895	0,39	0,39	0,39
23	0,3623	0,3589	0,36	0,36
24	0,3828	0,3852	0,3903	0,39
25	0,56	0,5702	0,56	0,56
26	0,5933	0,5924	0,59	0,59
27	0,6217	0,6235	0,622	0,62

Результаты моделирования и величины ошибок различных моделей были сведены в таблицу 6.8. Чтобы вычислить величину абсолютной ошибки была использована формула 1.2.

Таблица 6.8 - Сравнительная оценка абсолютной ошибки для различных методов

Метод моделирования	Величина абсолютной ошибки %
	Y
1. Нечеткие алгоритмы	0,9
2. Нейросетевые алгоритмы	2,1
4. Нейро-нечеткие сети	0,4

Анализ таблицы 6.8 указывает, что интеллектуальные модели выявили свое преимущество: от 0,4 % до 2,1%, при этом наилучшим оказался метод нейро-нечетких сетей (0,4%).

Следовательно, проведенные исследования показали высокую эффективность алгоритмов управления, полученных с помощью методов искусственного интеллекта. В отличие от классических методов построения аналитико-статистических моделей методы, основанные на знаниях, опыте интуиции людей-экспертов дают создавать системы оптимального управления сложными технологическими процессами значительно легче, быстрее и эффективнее. У этих моделей оценка адекватности интеллектуальных моделей на порядок выше, чем при традиционном моделировании.

На рисунке 6.8 показаны изменение расхода отходящих из котла-утилизатора газов (X_8), температуры на входе в экономайзер (X_9) и расхода давления охлаждающей экономайзером воды (X_{10}).

Значения точек на кривых рисунка 6.8 были взяты из матрицы планирования ПФЭ, сформированные экспертами – технологами.

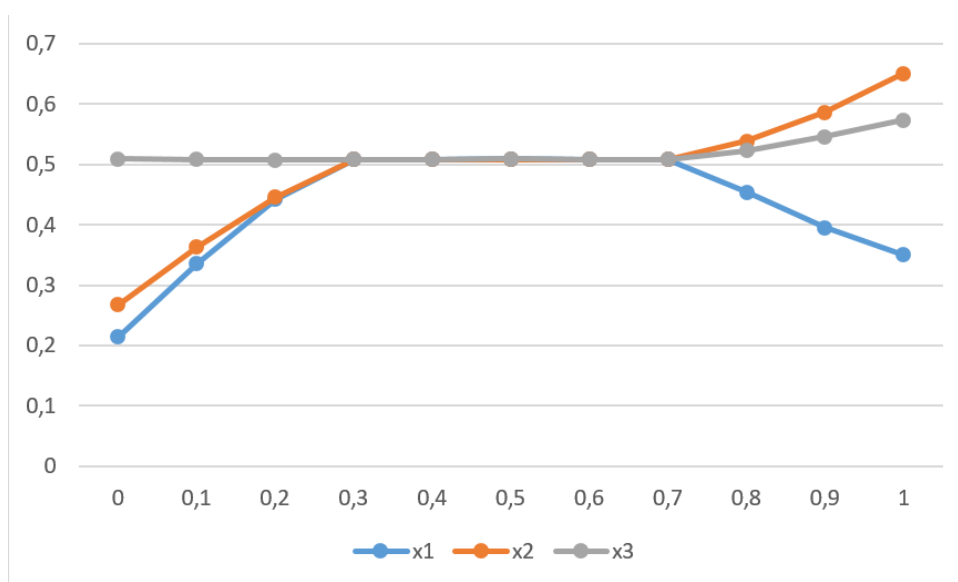


Рисунок 6.8 – Кривые, полученные по матрице планирования ПФЭ для переменной Y_4

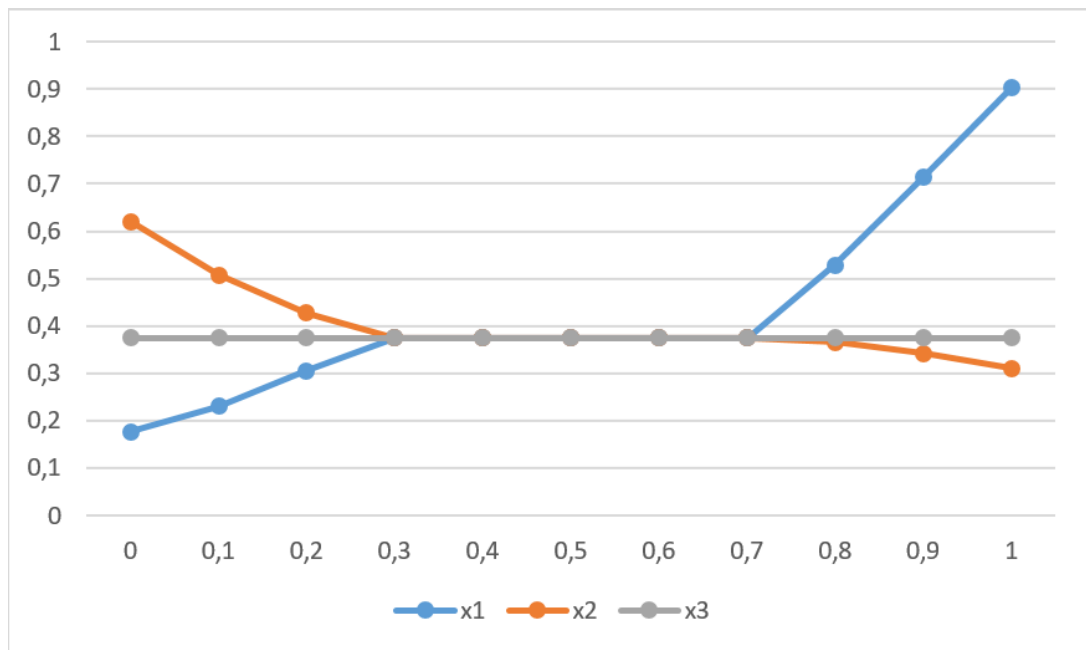


Рисунок 6.9 – Кривые, полученные по матрице планирования ПФЭ для переменной Y_5

Результаты моделирования тремя типами моделей приведены на рисунках 6.10 – 6.11.

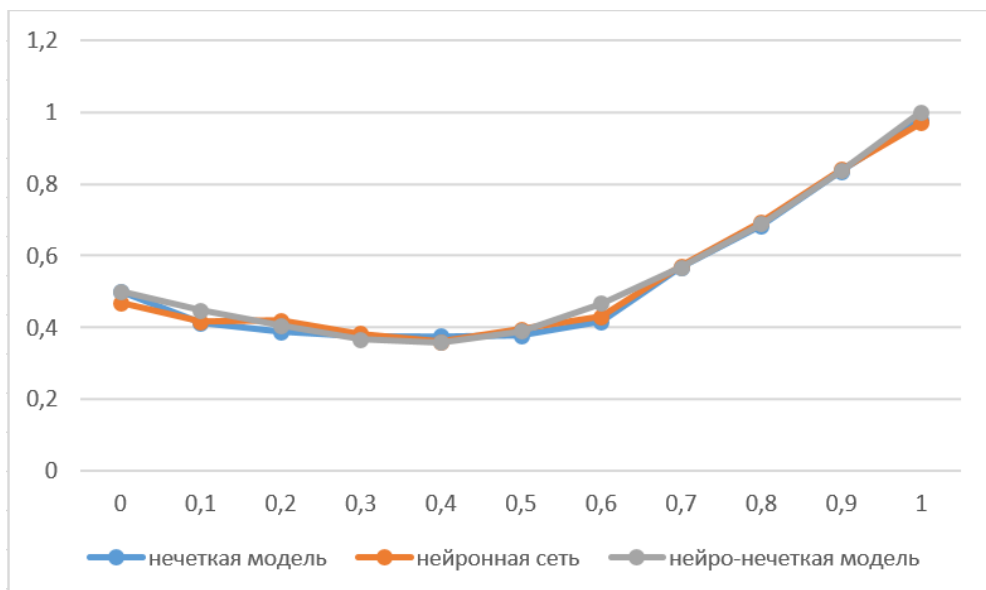


Рисунок 6.10 – Результаты моделирования тремя типами моделей для переменной u_4

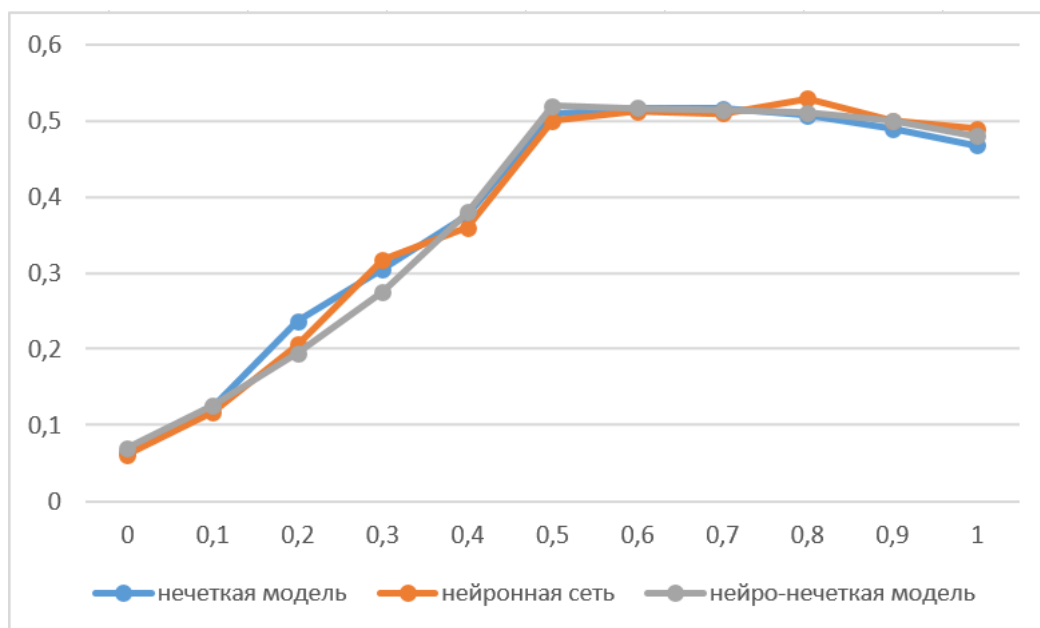


Рисунок 6.11 – Результаты моделирования тремя типами моделей для переменной y_5

Проведенные имитационные исследования трех интеллектуальных моделей с получением соответствующих кривых не противоречат физико-химическим закономерностям процессов. Наилучший результат получен с использованием нейро-нечетких алгоритмов. Также результаты показали, что интеллектуальные модели достаточно чувствительны, и хорошо реагируют на небольшие изменения входных переменных. Все результаты однозначны и устойчивы, независимо от количества расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование теории планирования эксперимента обеспечивает:

- минимизацию, т.е. предельное сокращение необходимого числа опытов;
- одновременное варьирование всех факторов;
- выбор четкой стратегии, что позволяет принимать обоснованные решения после каждой серии опытов;
- минимизацию ошибок эксперимента за счет использования специальных проверок.

Системы нечеткого вывода предназначены для реализации процесса нечеткого вывода. Достигнутые успехи в применении этих систем для решения широкого класса задач управления послужили основой становления нечеткой логики как прикладной науке с богатым спектром приложений. Системы нечеткого вывода позволяют решать задачи автоматического управления, классификации, распознавания образов, принятие решений, машинного обучения и многие другие.

Нейронные сети исключительно мощный метод моделирования, позволяющий воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости. В частности, нейронные сети нелинейны по своей природе. На протяжении многих лет линейное моделирование было основным методом моделирования в большинстве областей, поскольку для него хорошо разработаны процедуры оптимизации. В задачах, где линейная аппроксимация неудовлетворительна, линейные модели работают плохо. Кроме того, нейронные сети справляются с «проклятием размерности», которое не позволяет моделировать линейные зависимости в случае большого числа переменных.

Были разработаны модели управления создания желтого фосфора 4 различными методами: планирования эксперимента, нечеткого моделирования, нейросетевого и нейро-нечеткого моделирования. Проведен сравнительный анализ разработанных моделей, при этом наилучший результат получен с использованием нейро-нечетких алгоритмов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. История Новоджамбульского Завода // электронная версия на сайте http://www.kazphosphate.kz/stru_podr/ndfz/ndfz_muzey.php.
2. Бородин И.Ф., Судник Ю.А. Автоматизация технологических процессов. М: - «Колос» 2005.-с. 26-115.
3. Дудников В.Г., Казаков А.В., Софиева Ю.Н., Софиев А.Э., Цирлин А.М. Автоматическое управление в химической промышленности. Учебник для вузов. – М.: Химия., 1987 г.,-с. 368-409.
4. Жантасов К.Т., Бажирова К.Н., Толтебаева З.д. Современное состояние, проблемы и перспективы развития фосфорной отрасли Казахстана // Химическая промышленность сегодня.-Москва, 2013.- №5.-С. 4-6.
5. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной, его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир. - 1976. - 77 с.
6. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. – М.: ИПРЖР. - 2000. - 415 с.
7. 4
8. Сулейменов Б.А., Шуватов Т.Т. Методика построения систем диагностики ГПА. // Инженерно-технический журнал «Вестник автоматизации». – 2010. - №30. – С. 12-16.
9. Б.А. Сулейменов, Г.М. Мутанов, А.Б. Сулейменов. Интеллектуальные системы управления: теория, методы, средства. – Алматы: Казак университеті, 2012. - 223 с.
10. Сулейменов Б. А. Интеллектуальные и гибридные системы управления технологическими процессами. – Алматы: Шикула. - 2009. – 304 с.
11. Корнеев В.В., Гареев А.Ф., Васютин С.В., Райх В.В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. - М.: Нолидж. - 2000. - 352 с.
12. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzTECH. – СПб.: БХВ-Петербург. - 2003. – 736 с.
13. Смит Д., Риз Ч., Стюарт Дж. и др. Искусственный интеллект: применение в химии. - М.: Мир. - 1998. - 430 с.
14. Рыков А.С. Методы системного анализа: оптимизация. — М.: Экономика. - 1999. - 255 с.
15. Рыков А.С. Методы системного анализа: многокритериальная и нечеткая оптимизация, моделирование и экспертные оценки. - М.: Экономика. - 1999. - 191 с.
16. Технические средства автоматизации химических производств: Справ. Изд./В.С. Балакирев, Л.А. Барский и др. М.: Химия, 1991.
17. <http://bibliofond.ru>
18. <http://conference.kazntu.kz/>

СПИСОК СОКРАЩЕННЫХ СЛОВ

АСУ	– Автоматизированная система управления;
АСУП	– Автоматизированная система управления предприятием;
АСУТП	– Автоматизированная система управления технологическими процессом;
ГСУ	– Гибридная система управления;
ИСОУ	– Интеллектуальная система оперативного управления;
ИТ	– Интеллектуальная технология;
ИИ	– Искусственный интеллект
ОПУ	– Опытно-промышленная установка;
ПФЭ	– Полный факторный эксперимент;
САР	– Система автоматического регулирования;
САУ	– Система автоматического управления;
ТФК	– Термическая фосфорная кислота;
ЭВМ	– Электро-вычислительная машина.