

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ

На правах рукописи

ШУМОВА ЛАРИСА АЛЕКСАНДРОВНА

УДК 004.896

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ КРУПНОТОННАЖНОГО
ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 05.13.06 – Информационные технологии

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
Скарга-Бандурова Инна Сергеевна

Северодонецк – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНОТОННАЖНОГО ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	16
1.1. Современное состояние задач повышения безопасности функционирования крупнотоннажных промышленных объектов	16
1.1.1. Краткая характеристика крупнотоннажного химического производства как потенциально опасного объекта управления.....	17
1.1.2. Актуальные задачи предотвращения аварийных остановок крупнотоннажного химического агрегата.....	20
1.1.2.1. Технологический аспект	20
1.1.2.2. Экономический аспект	25
1.1.2.3. Экологический аспект	28
1.2. Анализ подходов к обеспечению безопасности химических производств.....	31
1.2.1. Методы моделирования безопасности сложных систем.....	31
1.2.2. Модели и методы прогнозирования аварийных ситуаций	36
1.2.3. Проблемы безаварийного управления технологическими процессами.....	40
1.3. Формулирование проблемы исследования и задач работы	41
Выводы к разделу 1	43
РАЗДЕЛ 2 МОДЕЛИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	44

2.1. Определение параметров для прогнозирования аварийных ситуаций в производстве аммиака.....	44
2.2. Модели оценки и прогнозирования динамических характеристик аммиачного производства.....	50
2.3. Алгоритм изменения маркировок нечеткой сети Петри с приоритетами C_{fPR}	53
2.3.1. Определение текущей маркировки	54
2.3.2. Определение активности перехода	54
2.3.3. Условие существования устойчиво активного перехода	55
2.3.4. Нечеткое срабатывание перехода.....	56
2.4. Формализация прогнозных оценок по результатам моделирования	58
Выводы к разделу 2	67

РАЗДЕЛ 3 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙНОЙ ДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЗНАЧЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ..... 69

3.1. Методы раннего обнаружения тренда.....	69
3.1.1. Постановка задачи раннего обнаружения опасной тенденции.....	71
3.1.2. Анализ известных методов обнаружения тренда в рядах динамики технологических параметров	72
3.1.2.1. Метод серий	72
3.1.2.2. Метод инверсий	74
3.2. Метод раннего обнаружения опасной тенденции (модифицированный метод серий).....	75...
3.3. Эффективность модифицированного метода серий	83
3.3.1. Оценка эффективности метода серий	85
3.3.2. Оценка эффективности метода инверсий.....	90

3.3.3. Сравнительное тестирование разработанного метода по сравнению с методом инверсий	92
Выводы к разделу 3	97
РАЗДЕЛ 4 РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	98
4.1. Информационная технология поддержки принятия решений оператора в предаварийных ситуациях.....	98
4.1.1. БД параметров технологического процесса	
4.1.1.1. Структура и связи	99
4.1.1.2. Сущности предметной области.....	101
4.2. Программное обеспечение СППР при управлении производством аммиака.....	103
4.2.1. Структурные компоненты системы	103
4.2.2. Интеграция системы прогнозирования аварийных ситуаций в систему управления производством аммиака	106
4.2.2.1. Интеграция на основе стандарта OPC	106
4.2.2.2. Реализации модели прогнозирования аварийной ситуации с помощью приложения Control Builder.....	110
4.3. Компоненты настройки модуля прогнозирования	115
4.3.1. Моделирование предаварийной динамики технологических параметров.....	115
4.3.2. Краткое описание моделирующей среды	124
4.4 Оценка эффективности информационного обеспечения при использовании в контуре операторского управления автоматизированной системы прогнозирования.....	129
4.5 Оценка результативности внедрения автоматизированной системы прогнозирования аварийных ситуаций в производстве аммиака.....	130

Выводы к разделу 4	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	141
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	160
Приложение А	161
Приложение Б.....	168
Приложение В.....	174

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСУ	– автоматизированная система управления
АСУ ТП	– автоматизированная система управления технологическими процессами
КГ	– конвертированный газ
ПАЗ	– противоаварийная защита
ПГ	– природный газ
РСУ	– распределительная система управления
САР	– система автоматического регулирования
СППР	– система поддержки принятия решений
ТП	– технологические параметры
ЦПУ	– центральный пульт управления

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Важным фактором безаварийного управления крупнотоннажным химическим производством является способность выявления предаварийного состояния химического агрегата и предотвращения его аварийной остановки, что является актуальной и достаточно сложной проблемой, имеющей технологический, экономический и экологический аспекты.

При этом экономические потери связаны как с незапланированными остановками, так и с последующими после остановок регламентированными запусками многостадийных технологических линий. Длительности отдельных запусков могут достигать 12 суток. Так, при остановке синтеза аммиака природный газ идёт на факел, при этом, за 2 часа расход дорогостоящего сырья достигает 72 тонны, а последующий запуск всего процесса составляет 7 суток. При этом объём потребляемого газа достигает 1 млн. кубических метров в сутки.

Очевидно, что не запланированные остановки и последующие запуски производства значительно усиливают экологический ущерб. В течение всего пускового периода технологический поток в виде смеси материальных компонентов выводится из процесса, как промышленный выброс, до момента выхода на регламентируемые параметры на последней технологической стадии. До 70% его объёма составляют вредные выбросы окислов азота, углерода и серы после сжигания части природного газа в пусковом и дополнительном котлах агрегата. Все это обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение неустойчивых режимов, выявление причин, приводящих к аварийным остановкам, поиск методов и технологий, снижающих риск аварийных остановок производства.

Обеспечение безаварийности химико-технологических процессов, как правило, достигается за счет автоматизации управления на этапах наблюдения, сбора, обработки информации средствами пакетов

математического анализа данных, внедрения автоматизированных систем управления технологическими процессами. Тем не менее, автоматизации сбора, хранения и анализа данных недостаточно для того, чтобы оперативный персонал смог принимать эффективные решения по предотвращению аварийной ситуации. При этом одной из основных задач предупреждения аварийных остановок остаётся получение качественного прогноза возникновения аварийной ситуации для поддержки принятия решений оператором-технологом о возможных нарушениях технологического процесса и выработки управляющих воздействий в виде советов оператору. Для предупреждения аварийных ситуаций производств повышенного риска необходимы дополнительные средства информационной поддержки оперативного персонала, работающие в контуре АСУ ТП в режиме реального времени.

Диссертационное исследование посвящено совершенствованию подходов к предупреждению аварийных ситуаций в крупнотоннажном химическом производстве и созданию средств анализа технологических данных и поддержки принятия решений в реальном времени.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась на кафедре компьютерной инженерии Технологического института ВНУ им. В. Даля в период с 2003 по 2015 гг. в рамках научного направления «Информационные технологии в промышленности, экологии, медицине», по тематике научно-исследовательских работ: «Средства поддержки принятия решений в критических системах» (№ 0111U001749), «Разработка программно-технического комплекса химического производства» (№ 0104U000391), «Интегрированная информационная система природоохранной деятельности промышленных предприятий» (№ 0113U002235).

При выполнении НИР автором предложены методы моделирования аварийных ситуаций в химическом производстве: метод раннего обнаружения опасной тенденции в динамических рядах значений

технологических параметров; метод комплексной оценки негативной тенденции технологического процесса в условиях неопределённости с учетом влияния различных факторов на основе ситуационной модели, модели реализации опасной тенденции в динамике контролируемых технологических параметров, а также методы поддержки принятия решений для повышения безопасности функционирования крупнотоннажных промышленных объектов.

Целью диссертационной работы является повышение сроков безаварийной работы крупнотоннажного химического производства аммиака и снижение убытков от аварийных остановок путем создания дополнительных средств информационной поддержки оперативного персонала, работающих в контуре АСУ ТП в режиме реального времени на основе комплексной оценки негативных тенденций технологических параметров.

Для решения этой *важной научно-практической проблемы*, в диссертации сформулированы и решены следующие **задачи**:

- 1) анализ существующих подходов к повышению безопасности крупнотоннажного химического производства;
- 2) разработка моделей для оценки и прогнозирования значений параметров, инициирующих аварийные ситуации в производстве аммиака;
- 3) разработка методов комплексной оценки негативной тенденции технологических параметров с учетом влияния различных факторов на основе ситуационной модели;
- 4) синтез системы информационной поддержки оператора химического производства при управлении предаварийными режимами с использованием разработанных моделей и методов, практическая реализация системы в контуре АСУ ТП производства аммиака и оценка эффективности её внедрения.

Объектом исследования являются процессы создания автоматизированных систем поддержки принятия решений при управлении технологическим объектом.

Предметом исследования – модели и методы оценки и прогнозирования аварийных ситуаций в крупнотоннажном химическом производстве.

Методы исследования. Методология исследований основывается на принципах системного анализа (иерархичности, декомпозиции и др.). При решении поставленных задач использовались: методы математической статистики (экстраполяции, анализа временных рядов, регрессии) для моделирования опасной динамики значений технологических параметров, теория нечётких множеств и математического аппарата расширенных нечётких сетей Петри – при создании ситуационной модели предаварийной динамики аммиачного агрегата. При разработке структуры информационной системы обеспечения оперативной поддержки в управлении химическим производством использовались общие принципы создания информационных систем и методы принятия решений в условиях неопределённости.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1) *впервые* предложен метод раннего обнаружения опасной тенденции в динамике технологических параметров, инициирующих аварийную ситуацию, на основе численного анализа временного ряда, что позволяет автоматизировать выявление предпосылок к предаварийным ситуациям в реальном времени;

2) *усовершенствована* модель для прогнозирования критических значений технологического параметра в виде кубического сплайна, позволяющая учитывать различия скорости изменения прогнозируемого параметра на начальном и конечном участках его предаварийной динамики;

3) *получили дальнейшее развитие* методы ситуационного моделирования на основе механизма расширенных сетей Петри, которые позволяют повысить достоверность прогноза аварийных остановок

химического агрегата за счёт комплексной оценки влияния различных факторов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке информационной технологии прогнозирования аварийных ситуаций химического производства, позволяющей обрабатывать в реальном времени данные различной природы и обеспечивающей поддержку принятия решений в предаварийных ситуациях.

Научные и практические результаты диссертации использованы при разработке специального программного модуля прогнозирования в составе АСУ ТП производства аммиака ЗАТ «Северодонецкое объединение «Азот». При этом было достигнуто сокращение количества аварийных остановок производства аммиака на 25%, сокращение количества простоев цеха за счёт снижения трудоёмкости на поиск неисправности до 30%.

Представленные в диссертационной работе методы моделирования аварийных ситуаций в химическом производстве и модели опасной тенденции в динамике контролируемых технологических параметров, инициирующих аварийные ситуации в производстве аммиака, были использованы при разработке тренажерного комплекса для операторов-технологов аммиачного агрегата ЗАТ «Северодонецкое объединение «Азот» г. Северодонецк (акт внедрения от 25.02.2010).

Методические и теоретические результаты представленных в работе исследований используются в учебном процессе на кафедре компьютерной инженерии ВНУ им. В. Даля в учебных курсах «Технология проектирования компьютерных систем», «Автоматизированные информационные системы», «Теория принятия решений», «Автоматизированные системы организационного управления» (акт внедрения от 14.01.2016).

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались на 11 международных и всеукраинских научно-технических конференциях:

- Международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований» (Днепропетровск, 2002);
- II Международной научно-практической конференции «Современные научные исследования - 2006» (Днепропетровск, 2006);
- Международной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы в промышленности и образовании-2007» (Сумы, 2007);
- I Всеукраинской научно-методической конференции «Развитие науки и образования в региональных образовательных учреждениях в контексте Болонского процесса» (Северодонецк, 2007);
- X Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в образовании и управлении» (Новая Каховка, 2008);
- V Международной научно-практической интернет-конференции «Наука и жизнь: украинские тенденции, интеграция в мировую научную мысль» (Киев, 2009);
- VI Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и безопасность управления» (АР Крым, сентябрь 2009),
- VI Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании» (Варна, Болгария, 2010);
- VII Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и безопасность в управлении» (Одесса, 2010);
- V Международной научно-методической конференции «Развитие науки и образования в учебных заведениях Украины в контексте Болонского процесса» (Северодонецк, 20011);
- VI Международной научно-методической конференции «Развитие науки и образования в учебных заведениях Украины в контексте Болонского процесса» (Северодонецк, 2012);

– Международной научной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI'2013)» (Евпатория, 20013);

– Международной научно-технической конференции «Устойчивое развитие промышленности и общества» (Кривой Рог, 2014).

Личный вклад соискателя заключается в разработке новых моделей, методов и инструментальных средств, которые обеспечивают решение поставленных в диссертации задач. Все основные результаты диссертационного исследования получены непосредственно автором. Работы [137, 139, 140, 143-147] опубликованы без соавторов. В печатных трудах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит: выделение субоптимальных режимов производства формальдегида на основе статистических данных, разработка одномерных и мозаичных моделей технологического процесса производства формальдегида, практическая реализация метода идентификации [60], апробация методики оперативного технологического аудита на крупнотоннажном производстве аммиака: сбор и обработка статистического материала [118]; анализ существующих средств, методов и моделей, используемых для прогнозирования рисков [104]; постановка и решение задачи аппроксимации предаварийной динамики по значениям технологических параметров для прогнозирования аварийных остановок крупнотоннажного производства аммиака, разработка прогнозных регрессионных моделей [106]; построена ситуационная модель аварийных остановок крупнотоннажного аммиачного агрегата на основе оценок параметров технологического процесса с учётом неопределённостей, реализованная на базе нечёткой сети Петри [109]; проверка адекватности оценок, полученных с помощью осторожных критериев оптимальности для прогнозирования риска по значениям выделенного технологического параметра производства аммиака - температуры конвертированного газа [102]; разработка модели и методов получения, структурирования и извлечения знаний из данных о технологических параметрах для реализации

подсистемы генерации решения [108]; адаптация модели оценки состояний ТП в виде нечёткой, ординарной сети Петри с приоритетами к аммиачному агрегату, описание алгоритма и условий устойчивой активности переходов [107]; постановка и решение задачи автоматизации оценки фактического технического состояния оборудования для поддержки процедур прогнозирования его состояния на примере расчетов остаточного ресурса промышленных трубопроводов [113]; выбор и обоснование способа решения проблемы интеграции разнородных АСУ действующего химического производств и специально разработанной для конкретного технологического процесса системы аналитической поддержки принятия решений (СППР) технолога оператора с целью предотвращения аварийных ситуаций [138]; разработка метода для раннего обнаружения опасной тенденции технологических параметров производства аммиака [174]; постановка и решение задачи оценки и анализа текущей опасности технологического процесса в реальном времени, разработка математических моделей прогнозирования риска возникновения аварийных ситуаций, основанные на представлении процесса с применением методов многомерного анализа данных [105]; разработана структура компьютерного обучающего комплекса оператора химического производства [117]; выбор и обоснование методики тестирования динамики значений технологических параметров с целью выявления опасной тенденции на основе известных статистических критериев [141]; формализация критерия для раннего обнаружения опасной тенденции в технологическом процессе на основе анализа временных рядов значений контролируемых параметров [142], проведен анализ подходов к повышению безопасности химических производств, разработана схема прогнозирующей модели, которая обеспечивает прием разнородных данных и комплексную оценку ситуации [116].

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 24 научных трудах международных и отечественных изданий (из них 8 без соавторов), в том числе: 13 работ в научных

профессиональных изданиях Украины, 1 работа в зарубежном научном издании; 10 тезисов докладов в сборниках трудов конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 176 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 15 таблиц. Библиографический список включает 181 наименований на 19 страницах.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНОТОННАЖНОГО ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Приведены результаты исследования задач повышения безопасности химических производств. Проанализированы различные аспекты безаварийного управления действующим технологическим процессом производства аммиака. Выполнен анализ методов, моделей и информационных технологий, используемых для прогнозирования и предупреждения аварийных ситуаций в технологических процессах. Определены задачи разработки аналитических средств поддержки принятия решений в критических и предаварийных ситуациях и внедрения их в систему управления технологическим процессом. Сформулирована решаемая в процессе исследований проблема и определены задачи исследований.

1.1. Современное состояние задач повышения безопасности функционирования крупнотоннажных промышленных объектов

Непрерывно действующие крупнотоннажные химические производства являются опасными промышленными объектами, функционирующими в условиях неопределенности, связанной с отсутствием или неполнотой информации о процессах возникновения и развития аварийных ситуаций [132]. Для большинства таких производств характерна высокая стоимость незапланированных остановок технологического процесса, связанная с риском аварии, тяжелыми экологическими и экономическими последствиями. Основные опасности химических производств подробно рассмотрены в [75]. В настоящей работе акцент сделан на снижение опасностей аварийных ситуаций для крупнотоннажного химического производства аммиака.

1.1.1. Краткая характеристика крупнотоннажного химического производства как потенциально опасного объекта управления

Крупнотоннажные химические производства ориентированы на выпуск стабильного ассортимента продукции в больших масштабах и, как правило, основаны на непрерывных технологических процессах, функционирующих в круглосуточном стационарном режиме. Непрерывные производства, в свою очередь, отличаются сложностью и спецификой аппаратного оформления, переработкой значительной массы исходного сырья, потреблением больших количеств энергии. Естественным фактором является их чрезвычайная опасность для окружающей среды, в связи с возможными авариями и большим количеством отходов.

Большинство крупнотоннажных химических производств в Украине обладают рядом специфических особенностей:

- сложность технологической установки, включающей в себя конструктивно- и функционально различные механизмы и аппараты, а также средства автоматического регулирования и контроля;
- непрерывность технологического процесса, включающего последовательность жёстко связанных технологических операций, при отсутствии промежуточных ёмкостей;
- высокая производительность отдельных аппаратов, обеспечиваемая полной мощностью агрегата;
- территориальная рассредоточенность рабочих мест аппаратчиков;
- высокая энерго-, материало- и фондоёмкость;
- потенциальная экологическая опасность.

Стоит отметить, что большая мощность и последовательная структура крупнотоннажных агрегатов задают дополнительные требования к безопасности, ведь выход из строя отдельного элемента инициирует полную остановку агрегата и связанные с этим существенные экономические и экологические потери.

Чтобы предотвратить чрезвычайные последствия, вызванные ошибками операторов, системы управления и контроля таких производств должны быть полностью автоматизированы.

Вместе с тем, анализ действующих крупнотоннажных химических производств показал, что:

- 1) далеко не все химические предприятия Украины полностью оснащены автоматическими системами управления производством;
- 2) исключение п.1 составляют системы противоаварийной защиты (ПАЗ), без которых производство не может быть запущено в эксплуатацию;
- 3) большинство производств работают не в оптимальных режимах и могут быть существенно улучшены по экономическим и экологическим критериям [60].

Наиболее реальной возможностью совершенствования крупнотоннажных химических производств является поиск безаварийного управления и реализация этого управления с помощью существующих автоматизированных систем, обеспечивающих контроль и регулирование сложных технологических процессов, а так же, противоаварийную защиту [144]. В настоящей работе рассматриваются подходы к повышению безаварийного функционирования крупнотоннажного производства аммиака с использованием информационных технологий. Далее рассмотрены некоторые особенности данного производства на ЗАТ «Северодонецкое объединение «Азот».

Для производства аммиака характерны многостадийность, непрерывность, высокая скорость протекания химико-технологических процессов и чувствительность к отклонениям параметров от норм технологического режима, высокая энергоёмкость и ресурсоёмкость, а так же наличие опасных производственных факторов, требующих применения надёжной ПАЗ. Современные технологические схемы синтеза аммиака, функционирующие в Украине, СНГ и в ведущих фирмах мира, а так же

варианты модернизации действующих производств, рассмотрены в [5, С. 6-16].

Исходя из требований промышленной безопасности, конкурентоспособности, критерии эффективности работы крупнотоннажного производства должны отражать стабильность технологического процесса и минимизацию себестоимости вырабатываемой продукции [82]. Для рассматриваемой технологической схемы выделены следующие специфические факторы безаварийности:

- стабильность технологического процесса;
- вероятность возникновения устраняемого отказа/неисправности;
- возможность выявления предаварийного состояния химического агрегата и предотвращения аварийной остановки;
- время на принятие решения и устранение неисправности/отказа оператором;
- вероятность безошибочной работы оператора;
- вероятность безотказной работы технологической схемы (без влияния человеческого фактора и при условии, что отказ неустраняемый).

Таким образом, важным фактором безаварийного управления крупнотоннажным химическим производством является способность выявления предаварийного состояния химического агрегата и предотвращения аварийной остановки, что является достаточно сложной проблемой, имеющей технологический, экономический и экологический аспекты [115, 118].

Исследуемое производство является объектом повышенной опасности [47]. Принципиальная технологическая схема анализируемого производства аммиака приведена в Приложении А, рис. А.1. Безопасность технологических процессов определяется способом производства, его аппаратным оформлением, квалификацией персонала. Производство аммиака характеризуется следующими опасными производственными факторами:

– наличие токсичных веществ (аммиак, оксид углерода, диоксид углерода, природный газ, пятиокись ванадия, гидразингидрат, соединения никеля, катализаторная пыль), удушающих веществ (азот, азото-водородная смесь), горючих веществ и материалов, а также больших объемов газов, которые с кислородом воздуха образуют взрывоопасные смеси (технологические блоки 1-ой категории);

– возможность воздействия на человека химикатов (жидкий аммиак, аммиачная вода, каустик, едкий калий, диэтанолламин, гидразингидрат) и высокотемпературных сред;

– эксплуатация оборудования под высоким давлением (до 300 атм.).

Наличие опасных производственных факторов требует применения надежной системы управления с выделенной подсистемой ПАЗ, гарантирующей защиту персонала и оборудования даже в случае выхода из строя какого-либо отдельного элемента ПАЗ.

Исследуемое производство смонтировано в виде одной технологической линии. Краткая характеристика системы автоматического регулирования, блокировок и сигнализации для основных контролируемых технологических параметров рассматриваемого объекта приведена в Приложении А, табл. А.1.

Метод производства непрерывный, в течение 331 суток, после чего технологическая линия останавливается для проведения ремонта. Контроль и управление технологическим процессом осуществляется из ЦПУ со станцией управления распределительной системы управления (PCY) TDC-3000. PCY и независимо от нее работающая система ПАЗ реализованы на микропроцессорных контроллерах. Пультом управления является операторский пункт, объединяющий шесть расширенных операторских станций - рабочие места операторов.

Возникновение аварийных ситуаций предупреждается принудительной сигнализацией (табл.1.1).

Таблица 1.1

Основные инструменты обеспечения безопасности производства аммиака

№ п/п	Задача	Инструменты управления
1.	Поддержание стабильной работы технологического процесса	PCY (TDC-3000)
2.	Выявление предаварийного состояния	Операторское управление
3.	Предотвращение аварийной остановки	Операторское и административное управление
4.	Возникновение аварийных ситуаций	Автоматическая сигнализация
5.	Перевод агрегата в безопасное состояние ПАЗ	Автоматический режим (ПАЗ)
6.	Возврат ПАЗ в рабочее состояние	Операторское и административное управление
7.	Блокировки по группам "АА", "В", "А", локальные	Автоматический режим (ПАЗ) Операторское управление

Перевод агрегата в безопасное состояние ПАЗ осуществляется в автоматическом режиме, возврат ПАЗ в рабочее состояние выполняется непосредственно технологическим персоналом. В автоматическом режиме срабатывает блокировка [124] – всего производства (по группе "АА"), отдельных стадий (по группам "В" и "А") или отдельных блоков (локальные блокировки), что вызывает различную степень причиняемого экономического и экологического ущерба. При необходимости, согласно технологическому регламенту, срабатывание любой группы блокировок можно произвести нажатием соответствующей кнопки на щите блокировок.

1.1.2. Актуальные задачи предотвращения аварийных остановок крупнотоннажного химического агрегата

В настоящем исследовании проблема предотвращения аварийных остановок крупнотоннажного химического производства аммиака рассматривалась в трех аспектах: технологическом, экономическом и экологическом.

1.1.2.1. Технологический аспект

Как видно из табл. 1.1, система обеспечения безопасности в исследуемом производстве, как и в большинстве функционирующих производств, позволяет лишь зафиксировать отказ и остановить технологический процесс для предотвращения аварии. При этом частым явлением становится ложное срабатывание систем контроля, что приводит к значительным экономическим и экологическим потерям.

В то же время, зарубежный опыт показывает, что включение в состав АСУ ТП систем автоматизированной оценки и прогнозирования состояний позволяет существенно сократить незапланированные остановки химических производств и связанные с ними потери. Особое внимание при разработке прогнозирующих систем приходится уделять вопросам учета неопределенности технологической информации для обеспечения достоверного прогноза. Это связано как с неточностью или невозможностью измерений отдельных характеристик технологического процесса, так и с неоднозначностью интерпретаций имеющихся знаний для оценки состояния таких сложных объектов, какими являются химико-технологические производства. Поэтому, для учета взаимосвязанного влияния контролируемых параметров на состояние системы в реальном масштабе времени, необходимы специальные методы и соответствующие технические и программные средства [104, 114, 116].

К настоящему времени в различных отраслях промышленности накоплен достаточно большой опыт внедрения эффективных программно-управляемых производственных процессов. Были отдельные попытки создания таких процессов и в производстве аммиака, но они оказались безуспешными из-за опасений пожаро- и взрывоопасности этих производств. Автоблокировка нарушений большого числа технологических параметров многостадийного производственного процесса делала неизбежными частые аварийные остановки с огромными последующими пусковыми расходами. Поэтому в мировой практике управление технологическим процессом крупнотоннажных производств аммиака осуществляется частично автоматизированным на основе организации коллективного трудового процесса бригады операторов центрального пульта управления (ЦПУ) агрегатом.

С целью систематизации оперативной технологической информации, существующие технические системы контроля и автоматического регулирования оснащаются программно-алгоритмическими комплексами.

Проведенный анализ возникновения и последствий аварийных остановок за период 1996-2006 выявил следующие особенности (табл. 1.2, рис.1.1):

- 1) важным фактором стабильности исследуемого технологического процесса является состояние оборудования; большая часть аварийных остановок связана с отказами оборудования, вследствие износа [113];
- 2) еще одним фактором аварийности являются организационные недостатки обслуживания;
- 3) решающая роль в критических ситуациях до момента срабатывания блокировки отводится оператору, когда в результате грамотно проведенных операций возможно вернуть процесс в нормальный режим и предотвратить аварийную остановку.

Таблица 1.2

**Анализ причин, вызвавших аварийные остановки
(данные за период 1998-2012)**

Причины аварийных остановок	Количество остановок	Простой (час)
Отказ оборудования (в т.ч. элементов КИП)	13	995,7
Ошибки персонала	8	509,6
Перебои в электроснабжении	4	180,8

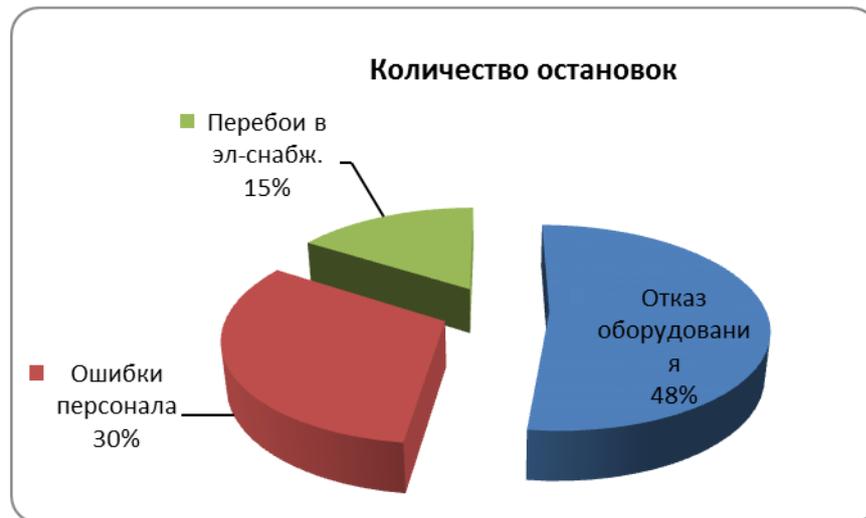


Рис. 1.1. Долевое соотношение количества аварийных остановок агрегата вследствие выделенных причин

Осуществляя контроль и при необходимости регулирование параметров, оператор принимает решение по управлению в соответствии с инструкциями, либо, опираясь на собственный опыт. Поэтому эффективность управления технологическим процессом существенно зависит от профессионализма и психологических особенностей оператора принимающего решение, т.е. от человеческого фактора. Анализ причин аварийных остановок производства за десятилетний период (1998-2012) наряду с высокой степенью износа оборудования, выявил недостаточно высокий уровень подготовки операторов (доля остановок агрегата из-за ошибок оператора составляет примерно 30%).

Для повышения оперативности принятия решений по управлению агрегатом в критических ситуациях необходимо усилить профессиональную

подготовку персонала и обеспечить его информационно-аналитической поддержкой [117].

В настоящее время разработаны и широко рекламируются современные автоматизированные системы управления, ориентированные на химическое производство. Например, разработки фирмы Honeywell Process Solution. Такие системы нацелены на обеспечение оптимального управления технологическим процессом, поддержку принятия решения в критических ситуациях, ПАЗ, содержат компьютерные тренажерные комплексы для обучения технологического персонала. Но внедрение подобных систем сдерживается, во-первых, высокой стоимостью (10-15 млн. евро), а во-вторых, в виду универсальности, системы не учитывают уникальность конкретного производства.

Поэтому целесообразным решением задачи безаварийного управления агрегатом является совершенствование действующей системы контроля и управления на основе специально разработанных аналитических средств поддержки оператора в критических состояниях технологического процесса.

1.1.2.2. Экономический аспект

В промышленности Украины, стала обостряться проблема нехватки многих видов собственных сырьевых и энергетических ресурсов. Ускоренное внедрение энергосберегающих технологий сдерживается отсутствием у предприятий необходимых финансовых средств. Высокий уровень мировых цен на природный газ препятствует эффективному использованию находящихся в эксплуатации огромных мощностей химических агрегатов. Помимо убытков от простоя дорогостоящего оборудования возросла себестоимость производимой продукции, что ухудшает условия для её потребления на собственные нужды, к примеру, минеральных удобрений в сельскохозяйственном производстве, и экспортные возможности отрасли.

Важнейшим сырьевым и энергетическим компонентом аммиачного производства является природный газ. На выработку 1 тонны аммиака

отечественные агрегаты мощностью 1360 т/сутки потребляют 1140 – 1400 м³ природного газа. Расходная норма природного газа для исследуемого агрегата 1305 м³/т. Наилучшие показатели по расходу природного газа аналогичных российских агрегатов находятся на уровне 1115 м³/т, а агрегатов Западной Европы, к примеру, LCA фирмы ICI – 795 м³/т.

Высокое потребление природного газа связано с тем, что, во-первых, исследуемый агрегат является устаревшим (износ производственных мощностей более 50%) и значительно уступает используемым в передовых странах по энерго- и материалоемкости и экологическим требованиям, а во-вторых, эксплуатация агрегата характеризуется крайне низкой эффективностью оперативного технологического обслуживания. Удельный расход природного газа, превышает его минимально возможное значение на 18-24%. На крупных агрегатах с суточной производительностью 1360 т аммиака такой перерасход природного газа за год исчисляется приблизительно 8 млн. долл. Необходимость совершенствования оперативного управления производственным процессом здесь очевидна. Названные причины высокого потребления природного газа характерны для большинства отечественных аммиачных агрегатов.

В результате существенного роста цен на природный газ, затраты на газ составляют основную часть расходов аммиачного производства. Для рассматриваемого производства доля затрат на природный газ в себестоимости аммиака на начало 2012 года составила 87%. Поэтому любая возможность уменьшить эти затраты позволит предприятию повысить конкурентоспособность.

Таким образом, показатель потребления природного газа является одним из важнейших факторов, определяющих рентабельность производства аммиака. Работы по совершенствованию управления производством, в результате которых расход природного газа снижается, являются актуальными. Одним из приоритетных направлений развития производства,

как и всей отрасли, является переход на энергосберегающие технологии, что требует значительных капиталовложений.

В связи с резким подорожанием природного газа, инвестиционная деятельность предприятия приостановлена, отсутствие у предприятия необходимых финансовых средств сдерживает ускоренное внедрение энергосберегающих технологий. В определённой мере это может быть компенсировано совершенствованием управления агрегатом путём более полной автоматизации с использованием современных информационных технологий.

Для анализа эффективности агрегата разработаны соответствующие методики оперативного технологического аудита, описанные в работе [60]. В результате проведенных исследований выявлены существенные резервы снижения удельного расхода природного газа в установившихся режимах его эксплуатации [144].

Вопросы снижения издержек действующих крупнотоннажных производств аммиака исследовались в течение многих лет и здесь уже накоплено много различных рекомендаций [139]. Наибольшая эффективность соответствующих организационных мероприятий достигается при использовании в существующих АСУ ТП дополнительного модуля. Использование дополнительного информационно-аналитического модуля в автоматизированной системе управления технологическим процессом позволяет снизить суммарный удельный расход природного газа до уровня 1,18 – 1,24 тыс. м³/т (расходная норма природного газа 1,305 тыс. м³/т). Стоимость такого дополнительного технического оснащения составляет порядка 1,5 млн. долл.

Вместе с тем стоит отметить, что, несмотря на некоторые успехи, существенный экономический ущерб оказывают не запланированные остановки производства. Для химических технологий это связано с необходимостью последующих после остановок регламентированных запусков многостадийных технологических линий. Длительности каждой

отдельных запусков могут быть весьма продолжительными и в зависимости от ряда условий достигать 5 – 12 дней на один запуск.

Существует несколько понятий пуска производства: с «горячего» и «холодного» состояний. При пуске с «горячего» состояния пусковой период в среднем составляет трое суток. Если пуск производства происходит с «холодного» состояния, то пусковой период в среднем составляет семь суток.

Затраты на природный газ в общей сумме пусковых затрат занимают в среднем 89%.

Так, при остановке синтеза природный газ идёт на факел, при этом, за 2 часа вылетает в трубу 72 тонны дорогостоящего сырья, а последующий запуск всего процесса составляет 7 суток. При этом объём потребляемого газа достигает 1 млн. м³ в сутки. Не трудно рассчитать, во сколько обходятся не запланированные остановки.

Поэтому все более актуальными становятся исследования, направленные на изучение неустойчивых режимов, выявление причин, приводящих к аварийным ситуациям, поиск методов и технологий, снижающих риск аварийных остановок производства.

Рассматривая проблему предотвращения аварийных остановок крупнотоннажного химического агрегата, целесообразно выделить экологический аспект актуальности данной проблемы.

1.1.2.3. Экологический аспект

В производстве аммиака имеются постоянные и периодические выбросы, а также сбросы при нарушениях технологического режима.

Постоянно в атмосферу сбрасываются дымовые газы печи риформинга, подогревателя природного газа и пускового котла, а также вентиляционные выбросы из машинного зала компрессии, утилизируемые газообразные, жидкие и твердые отходы; не утилизируемые отходы – газовые выбросы, содержащие вредные вещества, и сточные воды.

Периодическими выбросами являются:

- дымовые газы после пускового подогревателя отделения синтеза;
- дымовые газы, образующиеся при сжигании природного газа в пусковом котле;
- газы дегазации;
- дымовые газы, имеющие место при сжигании на факеле при пуске, наладке и нарушении технологического режима, а также в аварийных ситуациях и при срабатывании предохранительных клапанов.

Аварийные залповые выбросы возможны при срабатывании предохранительных клапанов, в результате нарушения технологического режима.

В аварийных ситуациях, а также при остановках производства на ремонт и пуске после ремонта, сбросные газы сжигаются на факельной установке.

Очевидно, что не запланированные остановки и последующие запуски производства значительно усиливают экологический ущерб.

В течение всего пускового периода технологический поток в виде смеси материальных компонентов выводится из процесса, как промышленный выброс, до момента выхода на регламентируемые параметры на последней технологической стадии. До 70% его объёма составляют вредные выбросы окислов азота, углерода и серы после сжигания части природного газа в пусковом и дополнительном котлах агрегата.

Несмотря на то, что пусковая нагрузка по сырью химических агрегатов обычно бывает несколько ниже нагрузки для установленного режима работы, пусковые материальные потери бывают чрезвычайно большими. Эти материальные потери в несколько обезвреженном виде промышленного выброса являются важным источником загрязнения окружающей среды [103, 118]. Таким образом, частые запуски крупнотоннажного аммиачного агрегата существенно усугубляют и экологический ущерб. Поэтому, сокращение длительности пусковых операций, числа не запланированных остановок агрегата – экономически и экологически тесно связанная задача.

Важным фактором снижения удельного расхода ПГ, энергозатрат, вредных выбросов крупнотоннажного аммиачного производства является степень оперативности принятия решений в критических ситуациях, предотвращающее незапланированные аварийные остановки, исключающее необходимость осуществления дополнительных пусковых операций. Одним из обязательных условий такой организации является решение вопросов, связанных с обеспечением поддержки принятия оперативных решений с использованием современных информационных технологий, разработка и внедрение моделей прогнозирования предаварийных состояний процесса.

Отсюда, при решении задач управления крупнотоннажными производствами возникает необходимость разработки методов прогнозирования аварийных ситуаций, учитывающих неопределенность исходных данных.

В результате анализа актуальных проблем предотвращения аварийных остановок крупнотоннажного химического агрегата можно сделать вывод, что для обеспечения безаварийности технологического процесса, снижения себестоимости конечного продукта, сокращения вредных выбросов и отходов, необходимо оснащение действующей АСУ ТП информационно-аналитическими средствами поддержки принятия решений операторов в критических ситуациях. Главной проблемой предупреждения аварийной остановки является возможность построения качественного прогноза возникновения аварийной ситуации [109].

При этом, основными критериями эффективности автоматизированных средств поддержки принятия решений в области разработки систем, обеспечивающих безопасное функционирование технологических объектов должны стать:

- снижение количества незапланированных остановок и перезапусков производства (ед./год; тыс. грн./год);
- снижение числа аварийных остановок (грн./год).

1.2. Анализ подходов к обеспечению безопасности химических производств

1.2.1. Методы моделирования безопасности сложных систем

Согласно [110] для обеспечения безопасности химических производств в настоящее время используются три подхода:

- традиционный;
- технологический;
- информационно-управляющий.

Наибольшее распространение в отечественной практике получило комбинирование традиционного подхода, базирующегося на требованиях производственной безопасности, технологических регламентах и нормативных документах, и информационно-управляющего подхода, предложенного академиком В. В. Кафаровым [57-59] и развитый в работах его учеников В. Л. Перова [58], И. Н. Дорохова [39], В. П. Мешалкина [79, 80], Б. В. Палюха [95, 96], А. Ф. Егорова [43-45], Т. В. Савицкой [110, 111] и др. Суть информационно-управляющего подхода заключается в анализе отказов, диагностике неисправностей и повышении эксплуатационной надежности оборудования и систем управления. Так, в монографии В.В. Кафарова [57] приведено описание методов моделирования агрегатов большой мощности и систем автоматизированного управления ими; в монографии [96] рассмотрены вопросы диагностики состояний непрерывных химико-технологических процессов на основе дискретных моделей и построение системы управления технологической безопасностью этих объектов в реальных условиях эксплуатации; в [15, 62, 80, 85, 110, 111] освещены теоретические основы системного анализа химических производств как опасных промышленных объектов; изложены проблемы разработки автоматизированных обучающих и экспертных систем для управления безопасностью химических производств. Стоит отметить, что

данный подход, направленный на построение автоматизированных систем управления безопасностью химических производств, не даёт возможность во всей полноте описать и учесть неопределенности различного характера.

В области моделирования безопасности сложных систем важное место занимают методы идентификации и прогнозирования возникновения и развития опасных процессов. В частности, известны и широко используются вероятностный подход [15, 78, 122, 131], подходы с использованием диаграмм [15,78], матриц решений [152], методов теории катастроф [93], нечетких методов [37, 153, 156]. Выявлению и анализу редких критических событий посвящены работы [93, 169].

Анализ моделей для поиска неисправностей и примеры их использования в химико-технологических системах представлен в [163].

Эффективными для прогнозирования риска опасных процессов [30, 104, 165, 126] считаются графические, математические и имитационные модели. Такие модели позволяют представить процесс в виде последовательности случайных событий, приводящих к возникновению аварий. Теоретическое исследование опасных процессов, как правило, проводится в два этапа: вначале графически, на семантическом уровне, а затем, после введения соответствующих переменных, на знаковом уровне, с помощью математических и имитационных моделей.

Среди графических моделей опасных процессов наиболее распространенными являются диаграммы причинно-следственных связей в форме деревьев отказов и деревьев событий [16, 32, 40, 77, 129, 132, 159, 177]. На практике чаще всего эти модели используются совместно [10, 99] для воссоздания условий появления и предупреждения инцидента, исследования всех его возможных исходов и оценки наиболее вероятных последствий.

Основными достоинствами таких моделей являются информативность, наглядность и декомпозируемость, однозначность понимания и удобство обработки на компьютерах, возможность последующей формализации, для

анализа с применением математических моделей. Имеется ряд программных продуктов, широко представленных в литературе, позволяющих автоматизировать процедуру получения оценок риска [34, 42, 51, 84, 157, 175].

Недостатком является сложность, обусловленная отсутствием строгих формальных процедур построения деревьев, и, как следствие, невозможность обеспечения идентичности моделей одного и того же происшествя построенных различными исследователями, что исключает возможность независимой проверки правильности модели, а также затрудняет автоматизацию всего процесса моделирования. Кроме того, большинство разработанных моделей развития событий на опасных промышленных объектах дают высокие погрешности, которые связаны с наличием в них существенного количества допущений и ограничений. Применение же более сложных аналитических моделей процессов зарождения аварий требует не приемлемо больших в системах оперативного управления безопасностью химических производств временных затрат и объёмов исходных экспериментальных данных.

Стоит отметить также, что почти все реальные процессы функционирования технических систем сопряжены с нечеткостью поступающей информации. Поэтому при управлении такими системами приходится ориентироваться на экстремальное сочетание факторов неопределенности. Модели, основанные на знаниях экспертов [91, 97, 101], являются наиболее естественным представлением знаний о состоянии процесса и, как правило, способны наиболее адекватно описать ситуацию. В работе [21] сделан вывод о целесообразности создания гибридных автоматизированных систем, сочетающих традиционные «жесткие» модели и алгоритмы и компоненты интеллектуальных систем. В данном случае, под гибридностью понимается создание взаимопроникающих интеллектуальных и традиционных структур, способных обеспечить синергетический эффект. В работах Н. Г. Ярушкиной высказаны идеи использования глубинной

гибридизации для построения систем анализа временных рядов и процессов [148]. Попытки создания таких систем предпринимаются как в нашей стране, так и за рубежом, однако до сих пор нет достаточного методологического обобщения и универсальных подходов к их реализации, поэтому задача построения такого класса систем для химических производств остается во многом творческой и требует проведения значительного объема исследовательских работ.

Альтернативой вероятностному моделированию [136] является подход, основанный на теории нечетких множеств, предложенной Л. Заде [46, 180] и развитый в работах А. Кофман [66], Д. Дюбуа, А. Прад [41] и др.

Теория нечёткого управления получила развитие в работах В.М. Кунцевича [68], Д.А. Поспелова [99], С.А. Орловского [92], Т. Тэрано, К. Асаи К., М. Сугэно [8]. В монографии Алтунина А.Е. [4] отражены вопросы моделирования при наличии неточно заданных величин (интервальных, нечетких и т.д.) в статических и динамических моделях объектов и процессов. Основы нечеткого моделирования, для решения практических задач представлены в [48, 49, 56, 68, 71].

В работе [43] для решения задач управления безопасностью химических производств предложено применять системы поддержки принятия решений с использованием продукционных правил и моделей представления знаний. Вопросы анализа и процедуры оперативного принятия решений в расплывчатых условиях отражены в работах [14, 121].

В работах [18, 162] предложен подход на основе on-line технологии, в частности в [162] проводится оценка надёжности на основе интеграции нечеткой логики и методов прогнозирования временных рядов: экспоненциального сглаживания (exponential smoothing) и фильтра Калмана (Kalman filtering).

Безаварийное управление химическими производствами, как правило, достигается за счет автоматизации управления на этапах наблюдения, сбора, обработки и анализа информации средствами пакетов математического

анализа данных, внедрения автоматизированных систем управления технологическими процессами. Тем не менее, автоматизации сбора, хранения и анализа данных недостаточно для того, чтобы оперативный персонал отдельных стадий или всего техпроцесса смог принимать эффективные решения по предотвращению аварийной ситуации — необходимы дополнительные аналитические средства информационной поддержки оперативного персонала для предупреждения аварийных ситуаций, работающие в контуре АСУ ТП в режиме реального времени. При этом, главной проблемой предупреждения аварийной остановки остаётся возможность построения качественного прогноза возникновения аварийной ситуации для прогнозирования возможных нарушений технологического процесса и выработки управляющих воздействий в виде советов оператору.

К настоящему времени широко проработаны теоретические основы информационных технологий техногенной безопасности, методы и средства статистического анализа, прогнозирования и теории принятия решений с целью построения человеко-машинных систем информационной поддержки оперативного персонала.

В то же время недостаточно исследованной остается проблема разработки средств прогнозирования возможных отклонений параметров технологического процесса и выработки управляющих воздействий в виде советов оператору и способы их интеграции с функционирующими на производствах системами управления, что обуславливает актуальность выбранного направления исследований.

1.2.2. Модели и методы прогнозирования аварийных ситуаций

В основе всех методов прогнозирования лежат два подхода:

- эвристический, использующий мнение специалистов-экспертов и применяемый для прогнозирования не формализуемых процессов;
- математический, предполагающий моделирование или экстраполяцию.

Математические методы, обеспечивающие прогнозирование аварийных ситуаций технологической системы, предполагают обработку данных о характеристиках технологической системы математическими методами; нахождение зависимости, связывающей эти характеристики со временем; вычисление прогнозируемых характеристик в заданный момент времени с помощью найденной зависимости.

Можно выделить следующие математические методы для прогнозирования аварийных ситуаций, исходя из типа математического описания и способов параметрической идентификации модели:

- методы моделирования процессов развития;
- статистические (экстраполяционные) методы;
- вероятностные методы.

Методы моделирования процессов развития ориентированы на математические модели, построенные на базе физических законов и гипотез о структуре и функционировании системы. При этом формируется явное математическое описание физических процессов, происходящих в реальном объекте, в виде систем дифференциальных, алгебраических и логических уравнений. Соотнеся модель с реальным процессом, ее можно рассматривать как аналог для целей прогноза и имитации прогноза. Применение методов возможно при наличии корректного математического описания прогнозируемого процесса.

Методы экстраполяции позволяют описать функцию, характеризующую динамику исследуемой характеристики, определить по

исходному временному ряду тренд (среднюю линию движения прогнозируемой характеристики). Преимущества прогнозной экстраполяции заключаются в простоте сбора информации и расчётов, а также возможности адаптивного прогноза. Эти методы эффективны, когда тенденция развития процесса, наблюдаемая в прошлом и настоящем, распространяется на будущее (методы регрессионного, корреляционного, факторного анализа, непараметрический метод наименьших квадратов с оцениванием точности прогноза и др.). Применение метода целесообразно в случае разработки предупредительного прогноза с целью определения нежелательных последствий наметившейся тенденции. Основным недостатком применения метода является недостоверность прогнозных данных при большом периоде упреждения.

Вероятностный метод применяется при наличии массовых измерений исследуемой характеристики, когда определение её закона распределения является достаточно полной формой описания совокупности массовых измерений. Для реализации метода, как правило, применяют модели временных рядов или причинные модели.

Причинные модели могут быть полезными в случае коррелированности независимых параметров процесса с прогнозируемым показателем. Тогда, зная значение коррелирующих переменных, можно построить модель прогноза исследуемой характеристики. Ограничениями использования причинных моделей являются следующие требования:

- независимая переменная должна быть известна ко времени, когда делается прогноз;
- количество вычислений и данных, которое необходимо сравнивать должно быть достаточно большим.

Подробное обсуждение методов анализа данных, представленных в виде временных рядов и последовательным методам обнаружения изменения их свойств отражено в работах [6, 22, 26, 61, 94, 150, 158, 161, 173, 178]. Для

моделирования временных рядов опасных событий возможно использование следующих методов:

- метод авторегрессии;
- метод скользящего среднего;
- методы ситуационного моделирования;
- комбинированные методы.

Вопросы обнаружения изменений свойств временных рядов и динамических систем рассмотрены в многочисленных работах: в работе Е. А. Гребенюк [33] рассматриваются методы виртуальных измерений качественных показателей химико-технологических процессов, которые целесообразно использовать в системах автоматизации производственных установок; в книге И. В. Никифорова [87] дан анализ известных из литературы методов и синтезируется ряд новых эффективных алгоритмов для обнаружения изменения свойств временных рядов, в частности моделей типа авторегрессии - скользящего среднего и динамических моделей объект – возмущение; в работах А.С. Вилски и М. Бассвиль [89], Э. Хеннан [130]. Методологию моделирования и прогнозирования динамической информации, представленной временными рядами отражают работы [81, 112].

Обзор методов и проблем моделирования по временным рядам представлены в работах: [7, 13, 74, 125, 172].

Работа [73] посвящена построению статистических моделей с переменными параметрами для прогнозирования нестационарных временных рядов. Рассмотрены адаптивные модели полиномиальных и стохастических трендов, модели семейства ARIMA (autoregressive integrated moving average), ARCH (autoregressive conditional heteroskedasticity). Методы численного анализа отражены в [12, 67].

Основным условием использования моделей авторегрессии и скользящего среднего является стационарность исследуемого ряда, что характеризуется постоянным средним и не меняющимися во времени

выборочными дисперсией и автокорреляцией. К тому же высокая эффективность этого метода достигается при достаточно большом количестве исходных данных (более 50 наблюдений), что затрудняет его использование для прогнозирования аварийных ситуаций.

В монографии [35] рассматриваются задачи прогнозирования данных нечисловой природы. Актуальность этих задач в современных условиях определяется, в первую очередь, недостаточностью фактографической информации для получения надёжных прогнозов, что требует использования экспертных эвристик [97]. Предлагается подход, закладывающий основы прогнозирования в номинальных и ранговых шкалах и обеспечивающий возможность проведения комбинированных прогнозных расчетов.

Методы ситуационного моделирования могут быть достаточно эффективно реализованы с помощью функциональных сетей Петри [98].

Принципы ситуационного моделирования и управления представлены в работах [55, 76, 100], реализация такого управления с использованием сетей Петри отражена в [45, 72, 119, 123, 134]. Контроль и диагностика процессов управления на основе контроля переменных в реальном времени с помощью искусственных нейронных сетей и нечетких сетей Петри представлены в работах Е.В. Бодянского [19-21].

Сети Петри по существу являются одной из форм имитации процессов. Моделирование на сетях Петри имеет два существенных преимущества. Во-первых, объем вычислений не увеличивается так быстро, как это происходит с большими моделями при использовании других математических методов. Во-вторых, аналитические методы обычно приспособляются для специфических проблем, и они будут в силе только при определенных условиях.

К достоинствам сетей Петри, а также их многочисленных модификаций, следует отнести и их способность адекватно представлять не только структуры сложных организационно-технологических систем и

комплексов, но и логико-временные особенности процессов их функционирования.

1.2.3. Задачи безаварийного управления технологическими процессами

Эффективное управление действующими технологическими процессами возможно при наличии математической модели, адекватно описывающей зависимость выходного признака от входных параметров. При проектировании и эксплуатации систем управления технологическими процессами возникают задачи, не решаемые с помощью известных математических методов идентификации [1, 28, 52, 53, 121, 168].

Ниже перечислены задачи, возникающие при решении задачи безаварийного управления технологическими процессами.

1. Проблема формального выбора минимально необходимого и достаточного для корректного решения задачи перечня контролируемых и управляемых входных параметров - выделение наиболее информативного множества признаков [38, 90, 135, 167, 176].

На практике этот перечень содержится в технологическом регламенте действующего производства, но неизвестной остается степень влияния каждого из выбранных параметров на выходной показатель. При этом могут быть упущены некоторые существенные и включены некоторые несущественные входные параметры. Отсутствие учета некоторых существенных параметров снижает эффективность системы управления процессом, а наличие несущественных параметров увеличивает стоимость АСУ ТП. Известно, что затраты на создание АСУ ТП пропорциональны корню квадратному от числа контролируемых параметров [82].

2. Задача выбора выходного показателя - комплекса выходных показателей, по которым оценивается текущая критичность процесса.

3. В процессе контроля и управления технологическим комплексом необходимо учитывать неопределенность оперируемой информации.

Наличие в сложной системе управления одновременно различных видов неопределенности делает необходимым использование для принятия решений различных подходов, в частности, теории нечетких множеств, которая позволяет адекватно учесть имеющиеся виды неопределенности [41, 66, 68, 179].

Кроме того, как указано в работе [4, С. 20], «попытки применения какого-либо конкретного математического аппарата (интервального анализа, статистических методов, теории игр, детерминированных моделей и т.д.) для принятия решений в условиях неопределенности позволяет адекватно отразить в модели лишь отдельные виды данных и приводит к безвозвратной потере информации других типов».

В результате проведенного анализа, в качестве математического аппарата формализации задачи для решения перечисленных выше проблем безаварийного управления технологическими процессами предлагается комбинированное использование статистических моделей прогнозирования, созданных по экспериментальным временным рядам, и причинно-следственных моделей.

1.3. Формулирование проблемы исследования и задач работы

Исходя из вышесказанного, в диссертационной работе необходимо *решить научную задачу* повышения сроков безаварийной работы крупнотоннажного химического производства аммиака и снижения убытков от аварийных остановок путем создания дополнительных средств информационной поддержки оперативного персонала, работающих в контуре АСУ ТП в режиме реального времени на основе комплексной оценки негативных тенденций технологических параметров.

Для решения этой важной научно-практической проблемы, в работе

необходимо решить следующие основные задачи:

1. Провести комплексный анализ существующих подходов к повышению безопасности крупнотоннажных химических производств и технологий прогнозирования аварийных ситуаций применительно к исследуемому производству.

2. Разработать модели для оценки и прогнозирования значений параметров, инициирующих аварийные ситуации в производстве аммиака.

3. Разработать методы комплексной оценки негативной тенденции технологических параметров в условиях неопределённости с учетом влияния различных факторов на основе ситуационной модели.

4. Осуществить синтез системы информационной поддержки оператора химического производства при управлении предаварийными режимами с использованием разработанных моделей и методов.

5. Провести имплементацию разработанных моделей и методов в автоматизированные среды поддержки принятия решений в контуре АСУ ТП производства аммиака и оценку эффективности её внедрения.

Выводы к разделу 1

1. На основании проведенного анализа существующих подходов повышения безопасности химических производств указаны недостатки и ограничения известных моделей, методов и средств поддержки принятия решений в области повышения безопасности функционирования крупнотоннажных промышленных объектов.

2. В процессе исследования выявлено, что для предотвращения аварийной остановки химического агрегата необходимо разработать информационно-аналитические средства поддержки принятия решений в критических и предаварийных ситуациях, при этом, главной проблемой остаётся возможность построения качественного прогноза возникновения аварийной ситуации для прогнозирования возможных нарушений технологического процесса и выработки управляющих воздействий в виде советов оператору. Наиболее перспективными для нахождения решений в условиях неопределённости являются нечёткие методы.

3. Определены основные направления исследований диссертационной работы, цель которой состоит в разработке и реализации методов и информационных технологий для моделирования поведения сложных химико-технологических объектов в предаварийных ситуациях, которые решают проблему сокращения числа аварийных остановок химического агрегата за счет раннего обнаружения опасной тенденции в динамике параметров, инициирующих аварийные ситуации, на основе анализа временных рядов и прогнозирования аварийной ситуации.

Материалы раздела опубликованы в работах автора [60, 104, 118, 139, 144, 146, 116].

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Определены параметры для прогнозирования аварийных ситуаций производстве аммиака. Разработана общая структура прогнозирующей системы. Предложены модели оценки динамических характеристик аммиачного производства на основе объединенного использования математического аппарата теории графов, нечетких множеств, моделей ситуационного управления. [107, 109]. Для построения общей модели прогнозирования предложено использовать расширение традиционных сетей Петри в виде нечёткой ординарной сети с приоритетами. Сформулированы алгоритм нечёткого срабатывания переходов сети и условия устойчивой активности перехода [143].

2.1. Определение параметров для прогнозирования аварийных ситуаций в производстве аммиака

Общее количество контролируемых параметров - 700, количество управляемых параметров более 300. Количество контролируемых параметров каждым оператором около 100, количество управляемых параметров каждым оператором 50-60.

Оценка работы технологического процесса производства аммиака осуществлялась посредством выявления закономерностей влияния основных параметров процесса на его выходные характеристики. Искомым прогнозируемым признаком является оценка возможности аварийной остановки в будущем отрезке времени. Прогнозирование состояния технологического процесса строится исходя из предполагаемых закономерностей изменения его параметров.

При анализе условий и обстоятельств возникновения аварийных ситуаций на производстве (проанализированы многочисленные данные по аварийности - журнал учёта производственных неполадок 1998-2012 г.г.) выявлены следующие основные признаки возникновения аварийных ситуаций:

- возникновение каждой конкретной аварийной остановки является, как правило, следствием не отдельно взятой причины, а цепи соответствующих предпосылок;

- инициаторами и звеньями такой цепи служат:

- а) ошибки людей (ошибочные действия или бездействие персонала);

- б) отказы техники (отказы средств контроля и управления параметрами технологического процесса, оборудования, коррозия металла, непригодность герметизирующих материалов на запорной или регулирующей арматуре);

- в) нерасчетные воздействия внешних факторов (низкие или наоборот высокие температуры окружающей среды, прекращение подачи энергоресурсов).

Для структуризации факторов проведена декомпозиция технологического процесса (рис. 2.1).

Руководствуясь стратегией методологии управления техногенным риском, изложенной в [129, 132], и опираясь на экспертную информацию, проведен анализ безопасности крупнотоннажного технологического процесса (надёжности исследуемого агрегата). В результате чего были выявлены события, которые ведут к аварийным остановкам, построена модель в форме "дерева отказов", представляющая собой диаграмму причинно-следственных связей с разветвлённой структурой. Фрагмент модели показан на рис. 2.2, табл.2.1.

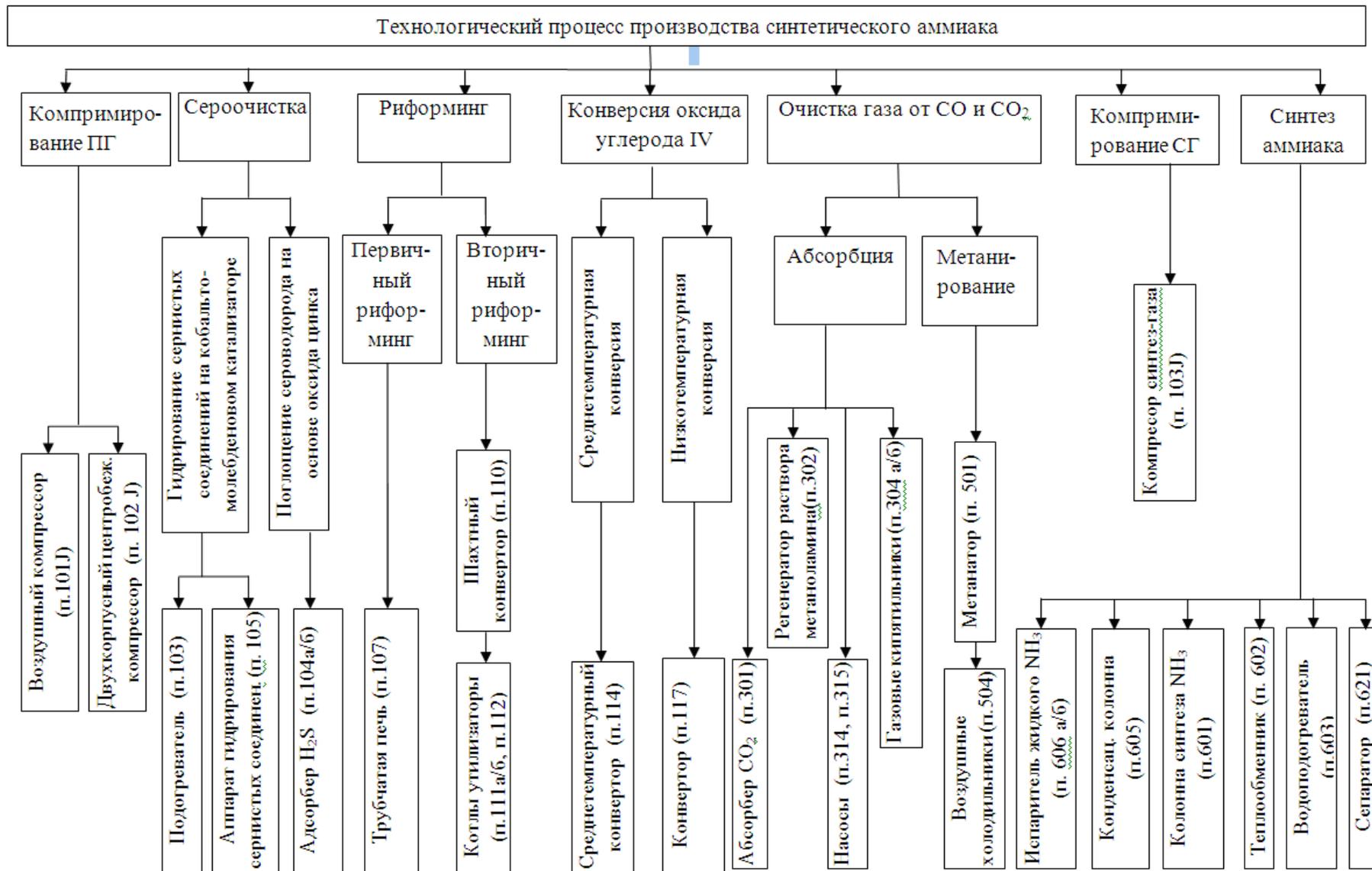


Рис. 2.1. Декомпозиция технологического процесса крупнотоннажного производства аммиака

Таблица 2.1

Перечень зарегистрированных аварийных событий

Зарегистрированное событие	Условное обозначение
Аварийная остановка	А
Недопустимое снижение давления вторичного масла (РА-407) компрессора воздуха 101-Ж до $P_{\min}=0,18$ МПа	В
Снижение температуры TSA4 в лобовом слое катализатора вторичного риформинга до 870°C	С
Недопустимое снижение расхода воздуха FCSA-3 во вторичный риформинг $F_{\min}=35000$ м ³ /час	Д
Остановка компрессора 101-Ж	Е
Разгерметизация линии вторичного масла компрессора	F
Рост температуры воздуха по ступеням компрессора технологического воздуха 101-Ж (ТА401/12÷16)	Г
Пропуск на линии технологического воздуха	Н
Открылся клапан FCV4 на линии сброса воздуха в атмосферу	И
Физический износ компрессора 101-Ж	К
Сбой в электронной части системы управления работой компрессора 101-Ж PRC11(регулятор частоты вращения ротора компрессора)	Л
Поломка маслососа подачи смазочного масла на подшипники турбины или компрессора п.101-Ж	М
Ошибка аппаратчика при управлении частотой вращения ротора компресс п.101-Ж	Н
Выход из строя аппарата воздушного охлаждения п. 129/11-12, 130/11-12	О
Предельно низкая температура окружающей среды Размораживание трубопровода сброса конденсата	Р
Физический износ трубопровода линии нагнетания компрессора п.101-Ж	Q
Предельно высокая температура окружающей среды	R
Механическая поломка клапана FCV4	S
Ошибка оператора	T

Анализ выделенных факторов выявил их неоднородность: различная динамика, степень влияния на состояние системы, шкала и диапазон изменения значений и т.д., что требует применения различных методов и моделей для оценки динамических характеристик системы. Так, например, изменение значений технологических параметров (температуры, давления

материального потока, и др.) в предаварийном режиме от нормального (регламентного) до критического (когда срабатывает блокировка) происходит в короткий интервал времени (3-15 минут), что требует ежесекундного контроля.

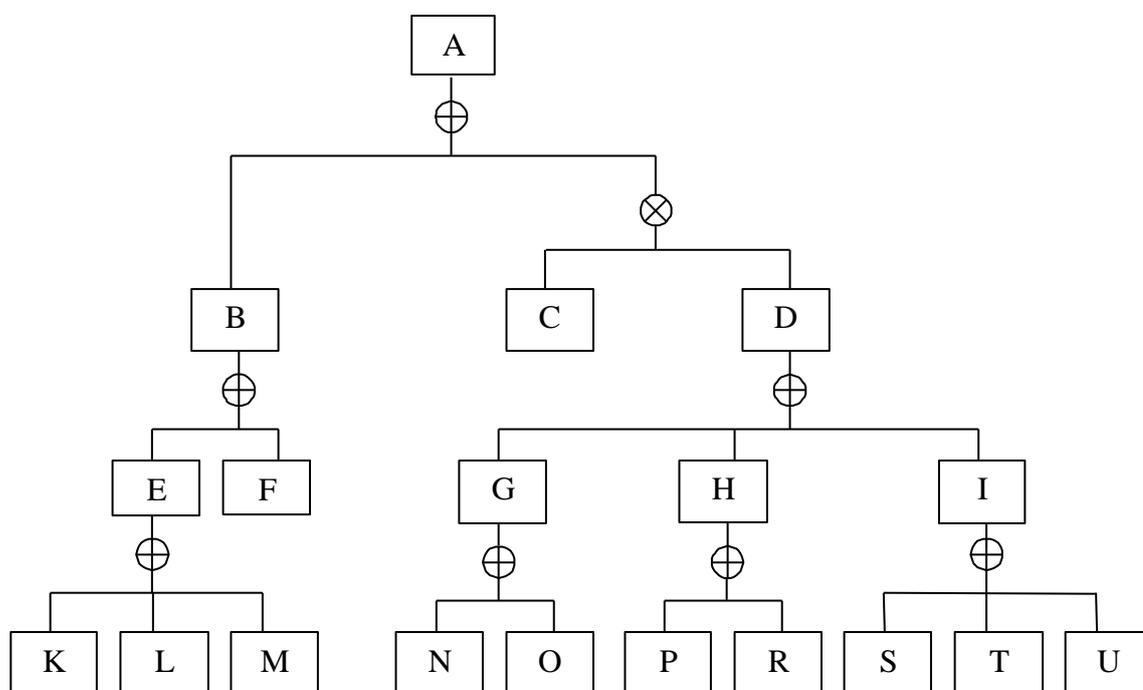


Рис. 2.2. Фрагмент дерева отказов аммиачного агрегата для событий, отраженных в табл. 2.1

Характеристики окружающей среды измеряются с суточной периодичностью и влияют на качество процесса только при достижении значений, значительно удаленных от регламентных значений.

С учётом указанных особенностей оценки динамических характеристик объекта исследования, выделены две группы параметров (рис.2.3): технологические параметры и параметры окружающей среды.

1) Технологические параметры (ТП): к группе технологических параметров отнесены постоянно контролируемые измеряемые параметры, инициирующие аварийную ситуацию - блокировку технологического процесса. Набор таких параметров определён регламентом блокировок и сигнализации [124] и представлен в таблице А.1 Приложения А.

Оценка технологических параметров ставит перед собой задачу выявления предаварийной тенденции в динамике значений технологических параметров и прогноза достижения критических значений.

2) Характеристики окружающей среды – температура, влажность и давление воздуха.

Для каждой группы параметров необходимо разработать модели и методы количественной оценки текущих значений параметров системы и прогноза возможности негативной динамики [113].

Общая структура прогнозирующей системы представлена на рис. 2.3, где:

x_i, v_i, w_i – текущие значения факторов, инициирующих аварийные ситуации в производстве (физические величины);

x^*_i, v^*_i, w^*_i – оценки прогнозируемых значений соответствующих факторов ($x^*_i=[0;1], v^*_i=[0;1], w^*_i=[0;1]$);

n, k, m - соответственно количество ТП и характеристик окружающей среды и оборудования, инициирующих аварийные ситуации в производстве;

y – оценка прогнозируемого состояния технологического процесса (дискретная величина, $y=(0;1)$).

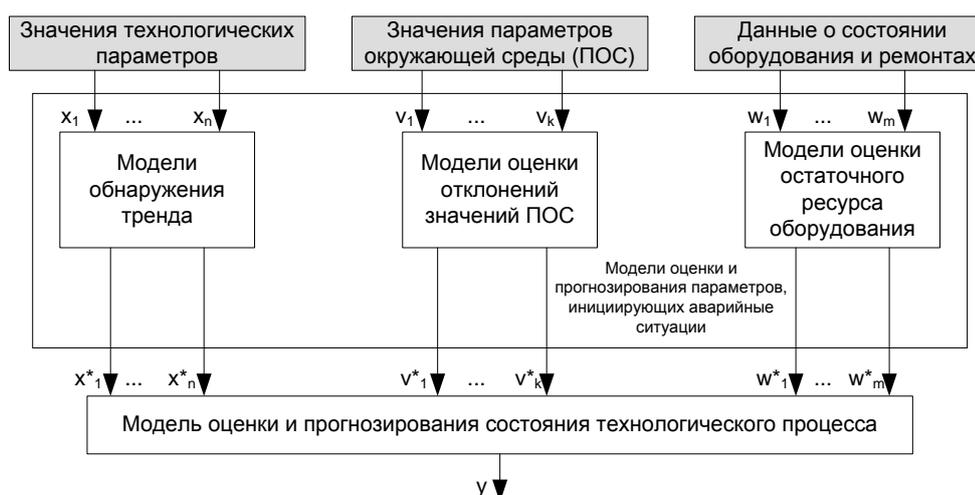


Рис. 2.3 Структура взаимодействия моделей в автоматизированной системе прогнозирования аварийных ситуаций крупнотоннажного химического производства

2.2. Модели оценки и прогнозирования динамических характеристик аммиачного производства

Модели оценки динамических характеристик аммиачного производства в настоящей работе реализованы на основе объединенного использования математического аппарата теории графов, нечетких множеств, моделей ситуационного управления. При этом входными переменными модели являются прогнозируемые оценки параметров технологического процесса, а выходной переменной - результат анализа спрогнозированной ситуации. Такие модели целесообразно реализовать с помощью расширенных сетей Петри [65, 98].

При рассмотрении аппарата сетей Петри как инструмента моделирования, важной методологической проблемой является использование экспертной информации в виде деревьев отказов в качестве набора базовых состояний. Деревья отказов традиционно используются для решения задач оценки безопасности технологических систем, так как содержат в себе полный набор критических состояний исследуемой системы. Поэтому, учитывая накопленный опыт моделирования связных деревьев с помощью Сетей Петри [17], представляется возможным расширить область применения имеющейся информации для анализа динамических систем. На рис. 2.4 представлен фрагмент дерева отказов производства аммиака. Критические ситуации, такие как аварийная остановка агрегата, блокировка процесса или отдельных стадий, предаварийные состояния, могут быть представлены в терминах сетей Петри в виде цепочек «условие-событие», которые характеризуются определенной маркировкой. Тогда анализ ситуаций в технологических процессах может сводиться к исследованию на достижимость критических маркировок путем построения дерева достижимости.

Решая задачу применительно к действующему крупнотоннажному химическому производству, выделен ряд его характерных особенностей, оказывающих значительное влияние на анализ ситуаций:

- наличие значительного числа факторов производства как внешних, так и внутренних;
- различная степень влияния отказов отдельных элементов на отказ всей системы;
- возможность пребывания отдельных подсистем объекта в различных состояниях.

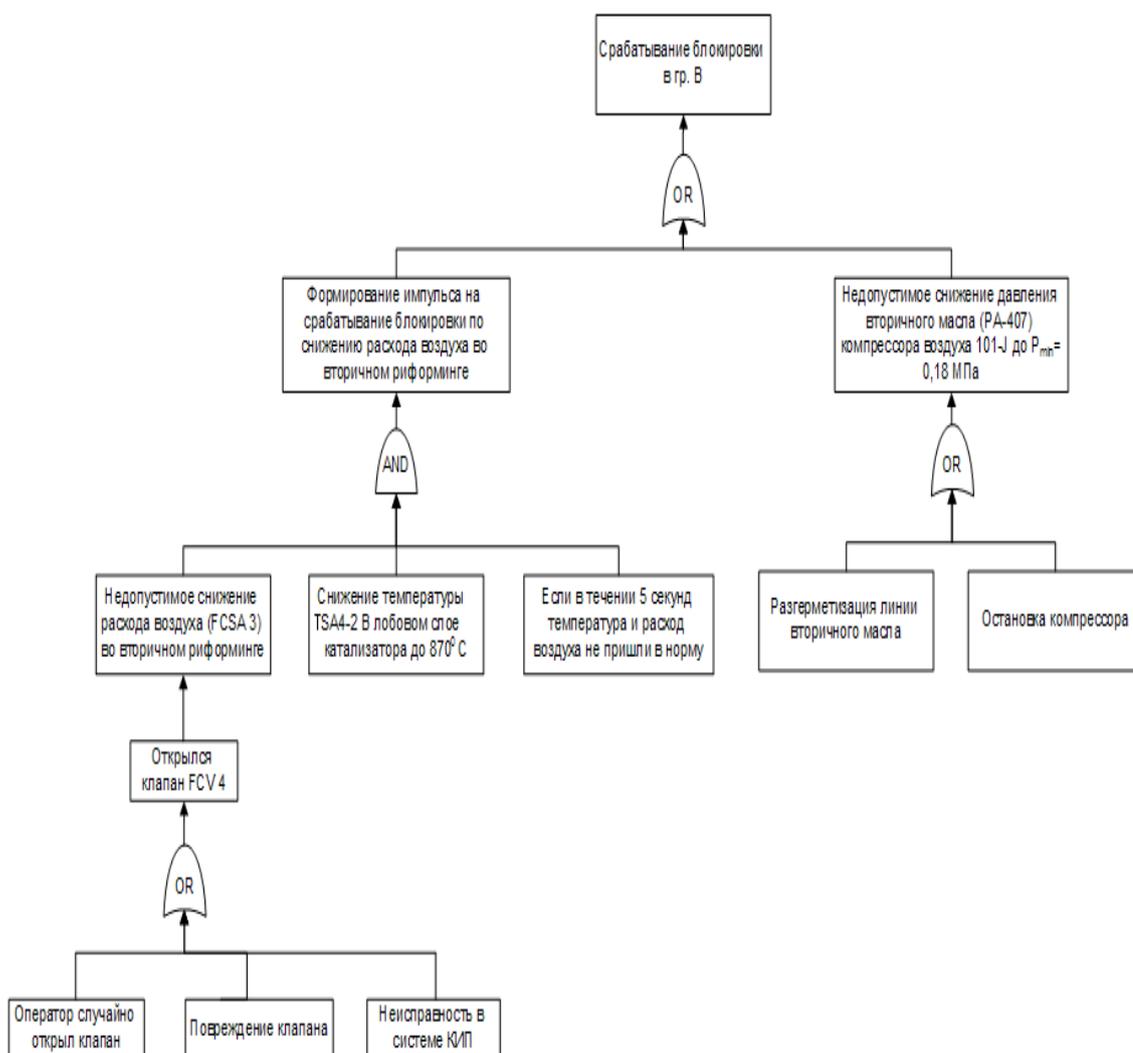


Рис. 2.4. Фрагмент дерева отказов производства аммиака

Нечеткая сеть Петри строится по данным дерева отказов (рис. 2.4) с возможными вариантами предаварийных событий, приводящих к блокировке процесса.

В данном случае применение математического аппарата классических сетей Петри затруднено недетерминизмом функционирования сети при компьютерной имитации ситуаций реального производства, что обусловлено следующим правилом: если несколько переходов могут сработать, то срабатывает любой из них [71].

Для того чтобы избавиться от этого недостатка в работе предложено использовать сеть типа C_f , представляющую собой нечёткую ординарную сеть Петри с приоритетами (C_{fPR}), которая характеризуется введением нечеткости в начальную маркировку и правила срабатывания переходов для ординарных сетей Петри [65], а также дополнительным введением в структуру сети отношения приоритетности PR.

Далее приводится формальное описание используемой в работе сети C_{fPR} . В общем виде, нечёткая сеть Петри (НСП) с приоритетами определяется в виде (2.1):

$$C_{fPR} = \langle N, f, \lambda, m^0, PR \rangle, \quad (2.1)$$

где $N = \langle P, T, I, O \rangle$ – структура сети C_{fPR} , аналогичная базовой структуре ординарных сетей Петри, в которой определены:

- $I: P \times T \rightarrow \{0,1\}$ - входная функции инцидентности;
- $O: T \times P \rightarrow \{0,1\}$ - выходная функции инцидентности;

$f = (f_1, f_2, \dots, f_u)$ – вектор значений функции принадлежности нечеткого срабатывания переходов, компоненты которого $f_j \in [0,1]$, $j \in \overline{1, u}$, u – количество переходов;

$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_u)$ – вектор значений порога срабатывания переходов, компоненты которого $\lambda_j \in [0,1]$;

$m^0 = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0)$ – вектор начальной маркировки, причём каждая компонента вектора m^0 (m_i^0) определяется значением функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в позиции $p_i \in P$ сети C_{fPR} , при этом

$$m_i^0 \in [0,1], \quad i \in \overline{1, n}, \quad n - \text{кількість позицій};$$

PR – отношение приоритетности, которое задается на $\{t_j\}$ и определяет порядок поглощения меток. Каждый переход t_j сети C_{fPR} имеет определенный приоритет $pr(t_j) \in PR$. Причём,

$$pr: pr(t_j)=j.$$

Процесс изменения маркировок сети C_{fPR} осуществляется посредством запуска переходов, согласно их активности и подчиняется определённом алгоритму срабатывания переходов.

2.3. Алгоритм изменения маркировок нечёткой сети Петри с приоритетами C_{fPR}

Динамику и характер изменения маркировок сети C_{fPR} можно описать с помощью следующих показателей:

- текущей маркировкой сети;
- активностью перехода;
- устойчивой активностью перехода;
- нечётким срабатыванием перехода.

2.3.1. Определение текущей маркировки

Состояние сети C_{fPR} в каждый момент времени определяется вектором

$$m = (m_1, m_2, \dots, m_n),$$

компоненты которого ($m_i \in [0, 1]$) могут быть интерпретированы как значения функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующих позициях $p_i \in P$ сети C_{fPR} . Начальное состояние сети определяется вектором начальной маркировки m^0 .

2.3.2. Определение активного перехода

При некоторой текущей маркировке m сети C_{fPR} , переход $t_k \in T$ является активным, если выполняется следующее условие:

$$\min_{i \in \{1, 2, \dots, n\} \wedge I(p_i, t_k) > 0} \{ m_i \} \geq \lambda_k, \quad (2.2)$$

где λ_k – значения порога срабатывания перехода.

Иными словами, если все входные позиции перехода $t_k \in T$ имеют ненулевые значения компонент вектора текущей маркировки, и минимальное из них – не меньше порога срабатывания рассматриваемого перехода, то переход t_k является активным.

2.3.3. Условие существования устойчиво активного перехода

Два перехода являются конфликтными, если структура сети содержит условия, при которых они оба могут сработать и в результате запуска одного из переходов предусловие или постусловие другого становится невыполнимыми. В этом случае последовательность срабатывания переходов, как правило, определяется с помощью стратегии приоритета.

Переход с меньшим номером, в данном случае $pr=1$, имеет больший приоритет. Таким образом, при условиях, когда одновременно в одно и то же время могут сработать различные переходы, сначала срабатывает переход с наибольшим приоритетом, а затем остальные переходы (также по мере уменьшения приоритетов) если условия их срабатывания все еще выполняются.

В ситуациях, когда действительно имеет место конфликт переходов, и произошел запуск перехода с наибольшим приоритетом, возможность срабатывания перехода с более низкими приоритетами исключается.

Ниже определено условие, при котором переход $t_k \in T$ сети C_{fPR} можно считать устойчиво активным.

При некоторой текущей маркировке m , переход $t_k \in T$ сети C_{fPR} является устойчиво активным, если выполняется одно из следующих условий:

- в сети не существует других активных переходов;
- любой другой также активный при маркировке m , переход $t_s \in T, s \in \overline{1, u}; s \neq k$, не имеет предшествующей позиции $p_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$, общей с переходом t_k , т.е.

$$\{p_i \in P \mid I(p_i, t_k) = 1\} \cap \{p_i \in P \mid I(p_i, t_1) = 1\} = \emptyset \quad (2.3)$$

– любой другой активный переход $t_s \in T$, который имеет общую с переходом t_k предшествующую позицию p_i , обладает меньшим приоритетом:

$$\begin{aligned} & \forall t_s \in T(t_s \neq t_k) | I(p_i, t_s) > 0; i \in \overline{1, n}, \\ & \{p_i \in P | I(p_i, t_k)=1\} \cap \{p_i \in P | I(p_i, t_s)=1\} \neq \emptyset, \\ & pr(t_k) > pr(t_s). \end{aligned}$$

Таким образом, переход $t_k \in T$ сети C_{fPR} можно считать устойчиво-активным при некоторой текущей маркировке m , если

$$\begin{aligned} & \min_{I(p_i; t_k) > 0} \{m_i\} \geq \lambda_k, i \in \overline{1, n} \\ & \text{и } \forall t_s \in T(t_s \neq t_k) | I(p_i, t_s) > 0; i \in \overline{1, n}, \min\{m_i\} \geq \lambda_s, \\ & \{p_i \in P | I(p_i, t_k)=1\} \cap \{p_i \in P | I(p_i, t_s)=1\} \neq \emptyset, \end{aligned}$$

выполняется

$$pr(t_k) > pr(t_s).$$

2.3.4. Нечеткое срабатывание перехода

В результате нечеткого срабатывания устойчиво активного перехода t_k , происходит изменение маркировки $m^v = (m_1^v, m_2^v, \dots, m_n^v)$. При этом, компоненты вектора новой маркировки определяются в соответствии с формулами (2.4), (2.5).

Изменение маркировки входной позиции $p_i \in P$, при $I(p_i, t_k) > 0$:

$$m_i^v = 0; \quad \forall p_i \in P \mid I(p_i, t_k) > 0; \quad i \in \overline{1, n}; \quad (2.4)$$

Изменение маркировки выходной позиции $p_j \in P$, при $O(t_k, p_j) > 0$:

$$m_j^v = \max \{m_j, \min \{m_i, f_k\}\}, \quad (2.5)$$

где $j \in \overline{1, n}$; $i \in \overline{1, n} \mid I(p_i, t_k) > 0$; f_k – значение функции принадлежности нечеткого срабатывания перехода $t_k \in T$, которое задается для конкретной сети C_{fPR} .

Как было отмечено раньше, структура N сети C_{fPR} имеет вид ординарной сети, определяемый матрицами входных I и выходных O позиций. Поэтому сеть C_{fPR} графически изображается ориентированным двудольным графом аналогично ординарной сети Петри.

Согласно рекомендаций [71], введем определения множества и графа достижимости для ординарной нечеткой сети Петри с приоритетами.

Множество $D(m_0)$ определено как множество достижимых маркировок для сети $C_{fPR} = \langle N, f, \lambda, m^0, PR \rangle$ – множество достижимости сети C_{fPR} .

Тогда, граф достижимости сети C_{fPR} представляет собой ориентированный граф:

$$D(V, E, \gamma),$$

где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_q\}$ – множество вершин графа, соответствующее множеству достижимых маркировок $D(m^0)$;

$E = \{e_{ij}\} (\forall v_i, v_j \in V)$ – множество дуг, соответствующее отношению достижимости маркировок C_{fPR} ;

$\gamma: E \rightarrow T$ – отображение, помечающее каждую дугу данного графа переходом, нечеткое срабатывание которого обеспечивает выполнение

соответствующего отношения непосредственной достижимости для рассматриваемой пары маркировок.

Суммируя вышесказанное, структура сети S_{fPR} содержит в себе полную информацию для определения возможных последовательностей событий. Ввиду того, что в ходе исследуемого технологического процесса возможно восстановление параметров во время предаварийного состояния при внешнем воздействии оператора на систему, на любом такте моделирования предусмотрено изменение параметров маркировки. Кроме того, стоит отметить, что в исследуемой модели два разрешенных не-взаимодействующих события могут происходить независимо друг от друга.

2.4. Формализация прогнозных оценок по результатам моделирования

Рассматривая задачу применительно к действующему крупнотоннажному производству, определен ряд параметров, который имеет нестохастический или недетерминированный характер (например, оценка уровня нагрузки, остаточный ресурс оборудования [116] и т.д.). По данным дерева отказов (рис. 2.4), с учетом выделенных параметров построена нечёткая сеть Петри с приоритетами переходов (рис. 2.5).

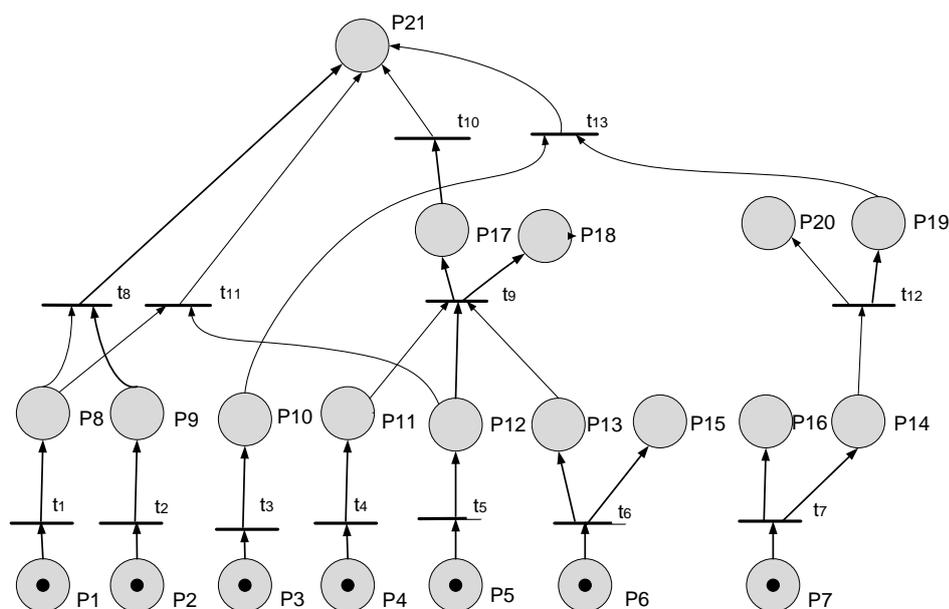


Рис. 2.5. Нечёткая сеть Петри C_{fPR}

Исходными данными для формирования вектора начальной маркировки сети C_{fPR} являются оценки значений параметров системы $\{X^*, V^*\}$, методика расчёта X^* представлена в Разделе 3, п. 3.2.

Структура сети содержит в себе полную информацию для определения возможных последовательностей событий.

Изображённая на рис. 2.5 сеть C_{fPR} имеет множество позиций $P=\{p_1, p_2, \dots, p_{21}\}$, и множество переходов $T=\{t_1, t_2, \dots, t_{13}\}$.

Описание позиций нечёткой сети Петри C_{fPR} , представленной на рис. 2.5:

P1 – Оценка расхода воздуха FCSA-3 во вторичный риформинг;

P2 – Оценка температуры TSA-4 в лобовом слое катализатора вторичного риформинга;

P3 – Оценка давления на выходе из реакционных трубчатой печи риформинга PCSA-5;

P4 – Оценка уровня нагрузки;

P5 – Оценка температуры окружающей среды ($t > 20^{\circ}\text{C}$);

P6 – Оценка остаточного ресурса компрессора 101-J;

- P7 – Оценка остаточного ресурса реакционных труб печи риформинга;
- P8 – Недопустимое снижение расхода воздуха FCSA-3 во вторичный риформинг;
- P9 – Недопустимое снижение температуры TSA-4;
- P10 – Недопустимое снижение давления на выходе из реакционных труб печи риформинга;
- P11 – Предельно-высокая нагрузка;
- P12 – Критически высокая температура окружающей среды;
- P13 – Нулевой остаточный ресурс компрессора 101-J;
- P14 – Нулевой остаточный ресурс реакционных труб печи риформинга;
- P15 – Рекомендация: износ компрессорного оборудования;
- P16 – Рекомендация: износ реакционных труб печи риформинга, проведите диагностику, следите за PCSA 5;
- P17 – Остановка компрессора 101-J;
- P18 – Рекомендация: возможна остановка компрессора 101-J;
- P19 – Пропуск на линии реакционных труб;
- P20 – Рекомендация: возможен пропуск на линии реакционных труб;
- P21 – Аварийная остановка.

Для каждого перехода $t_j \in T$ заданы значения функции принадлежности f_j и порогов λ_j нечёткого срабатывания:

$$f = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.9, 0.85, 0.8, 0.8, 0.7);$$

$$\lambda = (0.2, 0.2, 0.5, 0.9, 0.7, 0.8, 0.6, 0.3, 0.9, 0.9, 0.9, 0.85, 0.7).$$

Далее приведены три производственные ситуации, вызывающие различные результаты работы модели.

Ситуация 1

При начальной маркировке

$$m^0 = (0.4, 0.1, 0.05, 0.9, 0.6, 0.7, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

активными и так же устойчиво активными являются два перехода:

$$t_1 \text{ и } t_4,$$

поскольку для каждого из них выполнено условие (2.3), т.е.

$$0.4 > 0.2, \quad 0.9 = 0.9,$$

где $\lambda_1=0.2$ $\lambda_4=0.9$ – значения порогов срабатывания переходов t_1 и t_4 соответственно, и переходы не имеют общих предшествующих позиций:

$$\{p_i \in P | I(p_i, t_1) = 1\} \cap \{p_i \in P | I(p_i, t_4) = 1\} = \emptyset$$

$i \in 1, 2, \dots, n$

Других разрешенных переходов при данной начальной маркировке нет.

Ниже приведено изменение параметров маркировки на первом такте.

Нечёткое срабатывание переходов t_1 и t_4 приводит к новой маркировке m^1 , компоненты вектора которой определяются по формулам (2.4)-(2.5) следующим образом.

Поскольку позиция p_1 является входной для перехода t_1 , то для нее:

$$m_1^1 = 0.$$

Для позиции p_8 , которая является выходной для перехода t_1 :

$$m_8^1 = \max \{0, \min \{0.4, 1\}\} = 0.4, \text{ где } f_1 = 1.$$

Позиция p_4 является входной для перехода t_4 , то для нее:

$$m_4^1=0.$$

Для позиции p_{11} , которая является выходной для перехода t_4 :

$$m_{11}^1 = \max \{0, \min \{0.9, 1\}\} = 0.9, \text{ где } f_4 = 1.$$

Значения: $m_2^1 = m_2^0$, $m_3^1 = m_3^0$, $m_5^1 = m_5^0$, $m_6^1 = m_6^0$, $m_7^1 = m_7^0$, $m_9^1 = m_9^0$,
 $m_{10}^1 = m_{10}^0$, $m_{12}^1 = m_{12}^0$, $m_{13}^1 = m_{13}^0$, $m_{14}^1 = m_{14}^0$, $m_{15}^1 = m_{15}^0$, $m_{16}^1 = m_{16}^0$,
 $m_{17}^1 = m_{17}^0$, $m_{18}^1 = m_{18}^0$, $m_{19}^1 = m_{19}^0$, $m_{20}^1 = m_{20}^0$, $m_{21}^1 = m_{21}^0$ остаются без
 изменения, поскольку позиции $p_2, p_3, p_5, p_6, p_7, p_9, p_{10}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16}, p_{17},$
 $p_{18}, p_{19}, p_{20}, p_{21}$ не являются ни входными, ни выходными для
 рассматриваемых устойчиво активных переходов t_1 и t_4 .

Таким образом, нечеткое срабатывание переходов t_1 и t_4 , приводит к изменению начальной маркировки m^0 на новую маркировку:

$$m^1 = (0, 0.1, 0.05, 0, 0.6, 0.7, 0.5, 0.4, 0, 0, 0.9, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0).$$

При маркировке m^1 ни один переход не является активным. Сеть отработала. Маркировка в позиции p_{21} (аварийная остановка) равна нулю. Оператор не получает предупреждений – система находится в нормальном режиме.

По результатам работы сети строится дерево достижимости (рис. 2.6). После того, как сеть отработала, вектор начальной маркировки обнуляется и формируется заново.

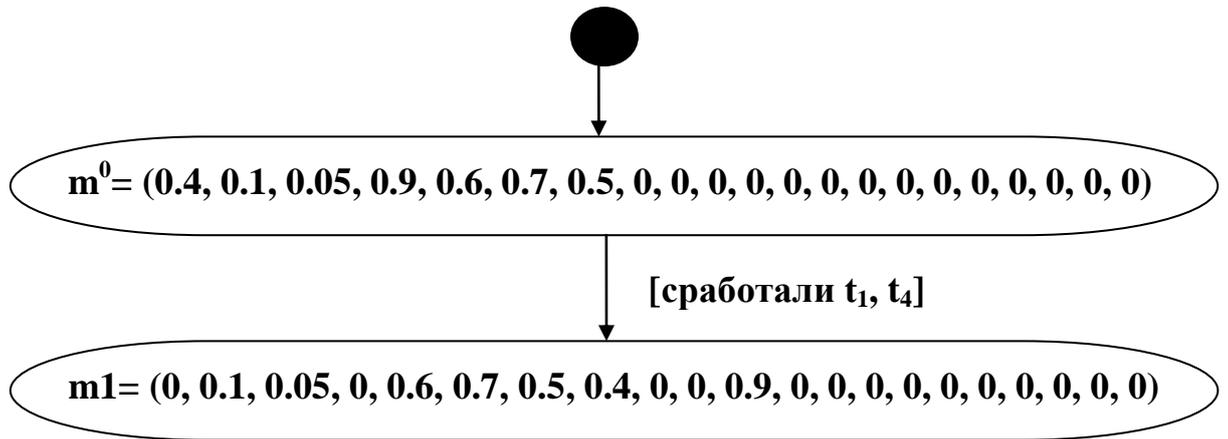


Рис. 2.6. Диаграмма достижимых маркировок в ситуации 1

Ситуация 2

При начальной маркировке

$$m^0 = (0.3, 0.1, 0.7, 0.8, 0.8, 0.85, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

активными и так же устойчиво активными являются переходы:

$$t_1, t_3, t_5 \text{ и } t_6,$$

так как для любого из них выполнено условие (2.2).

Параметры маркировки на первом такте изменяются следующим образом.

Нечеткое срабатывание переходов t_1 , t_3 , t_5 и t_6 приводит к изменению начальной маркировки m^0 на новую маркировку:

$$m^1 = (0, 0.1, 0, 0.8, 0, 0, 0.5, 0.3, 0, 0.7, 0, 0.8, 0.85, 0, 0.85, 0, 0, 0, 0, 0, 0).$$

При маркировке m^1 ни один переход не является активным. Сеть отработала. Маркировка в позиции p_{21} равна нулю, система находится в

нормальном режиме. Но маркировка в позиции p_{15} не нулевая ($m_{15}^1 = 0.85$), что генерирует предупреждение: «Высокий износ компрессорного оборудования».

Диаграмма достижимых маркировок в ситуации 2 приведена на рис. 2.7. Вектор начальной маркировки обнуляется и формируется заново.

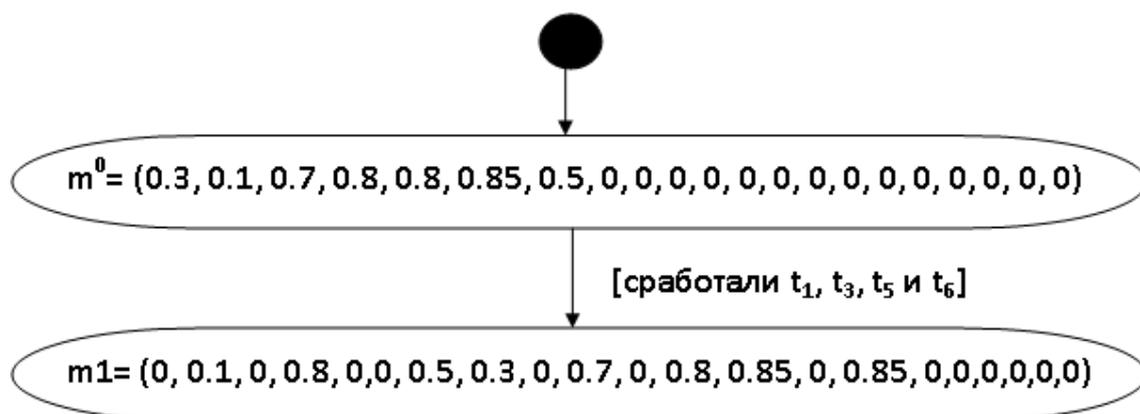


Рис. 2.7. Диаграмма достижимых маркировок в ситуации 2

Ситуация 3

При начальной маркировке

$$m^0 = (0.3, 0.1, 0.7, 0.9, 0.8, 0.9, 0.85, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

устойчиво активными являются переходы: t_1, t_3, t_4, t_5, t_6 и t_7 , так как для любого из них выполнено условие (2.2). Других разрешенных переходов при данной начальной маркировке нет.

Далее приведено описание изменения параметров маркировки на первом такте.

Нечеткое срабатывание переходов t_1, t_3, t_4, t_5, t_6 и t_7 приводит к изменению начальной маркировки m^0 на новую маркировку:

$$m^1 = (0, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0.3, 0, 0.7, 0.9, 0.8, 0.9, 0.85, 0.9, 0.85, 0, 0, 0, 0, 0).$$

Не нулевые значения маркировки в позициях p_{15} и p_{16} ($m_{15}^1=0.9$, $m_{16}^1=0.85$), вызывают следующие предупреждения:

«Высокий износ компрессорного оборудования» и

«Высокий износ реакционных труб печи риформинга, проведите диагностику, следите за PCSA 5».

При маркировке m^1 устойчиво активным являются один переход: t_{12} , поскольку для каждого из них выполнено условие (2.2).

Изменение параметров маркировки на втором такте приведено ниже.

Нечеткое срабатывание перехода t_{12} приводит к изменению маркировки m^1 на новую маркировку:

$$m^2 = (0, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0.3, 0, 0.7, 0.9, 0.8, 0.9, 0, 0.9, 0.85, 0, 0, 0.85, 0.85, 0).$$

Маркировка в позиции p_{20} не нулевая ($m_{20}^2=0.85$), что генерирует предупреждение: «Возможен пропуск на линии реакционных труб».

При маркировке m^2 устойчиво активным являются один переход: t_{13}

Дальше показано изменение параметров маркировки на третьем такте

Нечеткое срабатывание перехода t_{13} приводит к изменению маркировки m^2 на новую маркировку:

$$m^3 = (0, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.9, 0.8, 0.9, 0, 0.9, 0.85, 0, 0, 0, 0.85, 0.7).$$

Маркировка в позиции p_{21} не равна нулю, в системе спрогнозирована аварийная ситуация. Сеть отработала, выдав предупреждение о возможной аварийной остановке и рекомендации по принятию решения выхода из опасного состояния: «Высокий износ компрессорного оборудования», «Высокий износ реакционных труб печи риформинга, проведите диагностику, следите за PCSA 5», «Возможен пропуск на линии реакционных труб».

Диаграмма достижимых маркировок в ситуации 3 приведена на рис. 2.8.

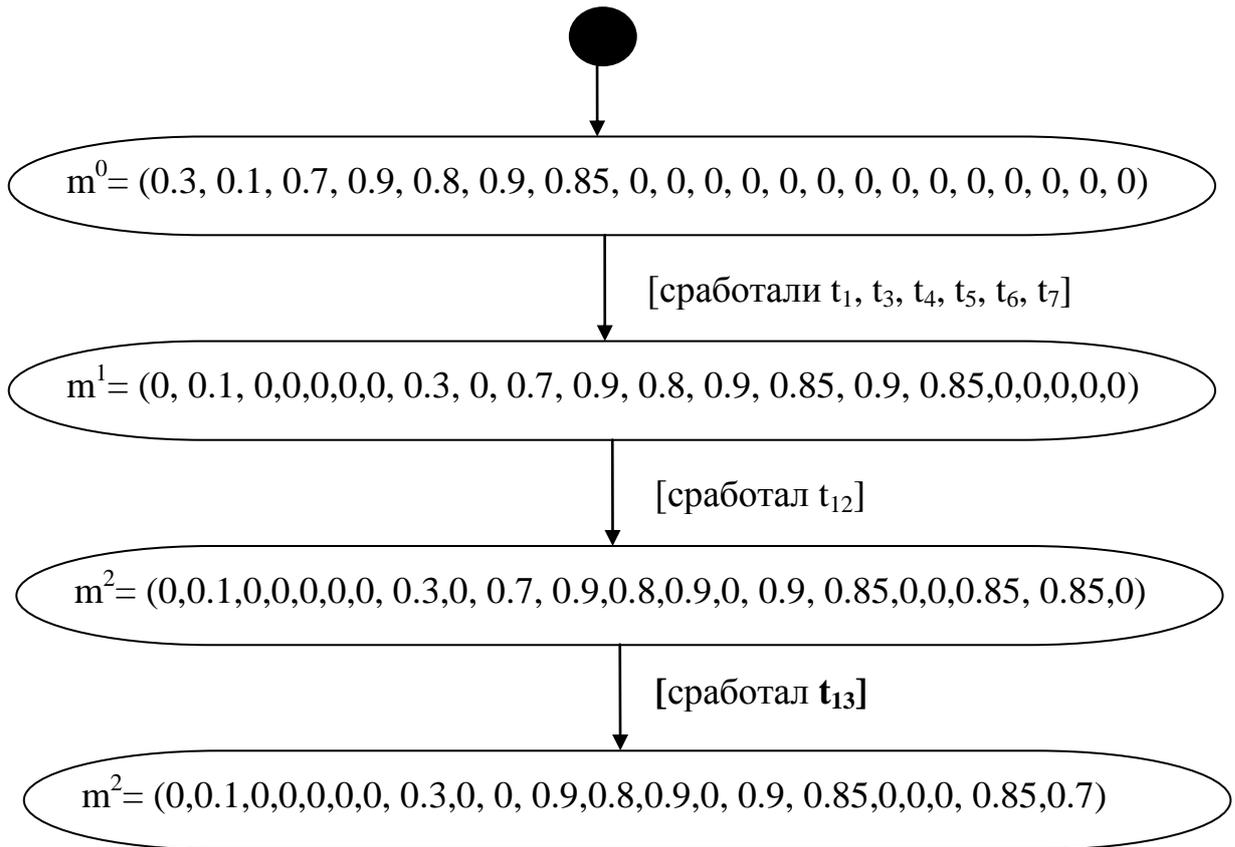


Рис. 2.8. Диаграмма достижимых маркировок в ситуации 3

После того, как сеть отработала, вектор начальной маркировки обнуляется и формируется заново.

Существенным преимуществом использования подобной модели является ее вариативность, позволяющая проводить отслеживание и оценку проводимых корректировок динамического процесса с целью поиска путей выхода из критических ситуаций и изменения состояний в нужном направлении.

Выводы к разделу 2

1. Опираясь на результаты проведенного анализа, в качестве математического аппарата формализации задачи предложено комбинированное использование вероятностного и теоретико-множественного описаний системы с привлечением эвристических методов формирования исходных данных о моделируемом процессе. В этом случае для построения моделей целесообразно применение механизма расширенных сетей Петри.

2. Сформулированы алгоритм нечёткого срабатывания переходов сети и условия устойчивой активности перехода.

3. С целью обеспечения адекватности прогноза аварийной ситуации на производстве проведена формализация оценок путём сочетания различных критических и предаварийных производственных ситуаций.

4. Использование рекомендуемых методов моделирования и анализа позволит оценить влияние, оказываемое отдельными компонентами на работу системы, определить узкие места в структуре системы и ее надежность, получить перспективный прогноз развития при возникновении опасных технологических ситуаций. В такой схеме, при реализации различных аварийных ситуаций отличаться будут только внутренние параметры, связанные с условиями и временными задержками срабатывания переходов, что позволит проводить динамическое моделирование поведения технологического процесса в режиме реального времени и, тем самым, позволит повысить время и качество прогноза поведения исследуемого крупнотоннажного химического производства в критических и предаварийных ситуациях.

5. В рамках проводимых работ по анализу сети на возникновение критических ситуаций разработано программное обеспечение, исследованы алгоритмы построения дерева достижимости. В частности проведен ряд исследований направленных на оценивание быстродействия разных

алгоритмов построения дерева. Тестировались два алгоритма: простого перебора и алгоритм перебора с отсечением. На малых сетях Петри с небольшим количеством независимых подсетей алгоритм простого перебора по быстродействию показал лучшие результаты по сравнению с алгоритмом перебора с отсечением. Обратная картина наблюдается при работе с большими сетями Петри со значительным количеством подсетей и циклов. В таких сетях алгоритм простого перебора оказался неприменим, так как количество обрабатываемых вариаций возрастает по закону 2^n , где n – количество независимых подсетей. По результатам проведенных исследований сделан вывод о целесообразности использования алгоритма перебора с отсечением в качестве метода построения дерева достижимости.

Основные научные результаты раздела опубликованы в работах автора [107, 108, 143, 116].

РАЗДЕЛ 3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙНОЙ ДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЗНАЧЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

В разделе представлены методы обнаружения тренда в динамических рядах значений технологических параметров, дана их сравнительная оценка [102, 145, 141, 140], впервые предложен метод раннего обнаружения опасной тенденции [174, 142]. Задача моделирования предаварийной динамики технологических параметров решена с использованием методов регрессии [106].

3.1. Методы раннего обнаружения тренда

При моделировании и прогнозировании динамических процессов и систем статистические данные представляются временными рядами числовых значений контролируемых параметров и подвергаются анализу на основе широко развитых методов математической статистики [2, 6, 7, 13, 25, 73, 79, 83, 150, 141, 155, 158, 166, 171, 178, 181].

Проблема обнаружения опасной тенденции в динамике параметров содержит две подзадачи:

- анализ характерных особенностей в динамике значений технологического параметра в двух режимах: нормальном и предаварийном [11, 140];

- построение алгоритма раннего обнаружения выхода процесса из нормального режима по характерному изменению результатов измерений технологических параметров [115, 145].

На рис. 3.1 показаны возможные значения технологических параметров, соответствующие различным ситуациям протекания процесса, где:

P_R - регламентированные значения параметров;

P_w - предупредительные (допустимые) значения технологических параметров;

P_d - предаварийные (опасные) значения технологических параметров;

P_a - аварийные (критические) значения параметров.

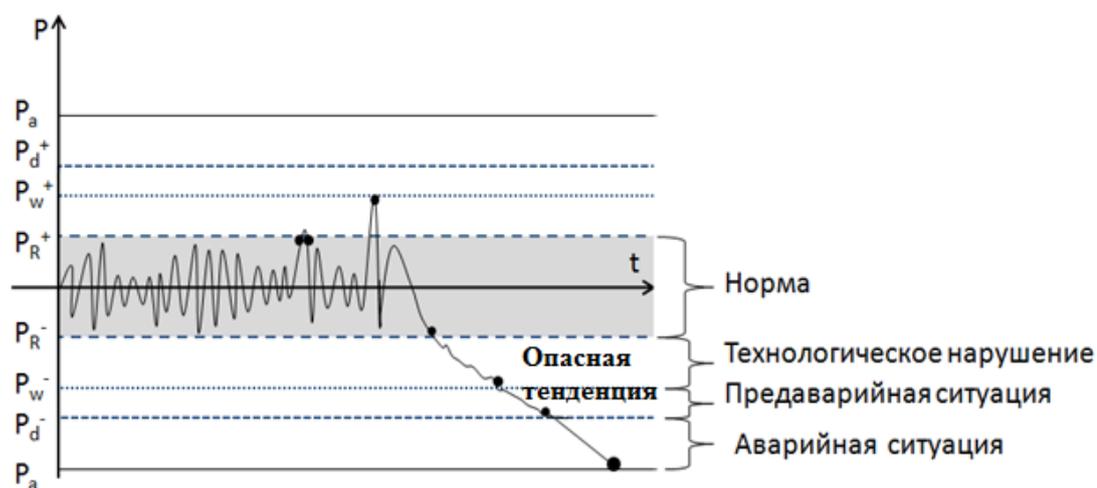


Рис. 3.1. Возможные значения технологических параметров

В [127] предаварийная ситуация формализована как ситуация, при которой отклонение от норм технологического режима, приводит к выходу за предаварийные граничные значения (предаварийные уставки), и вызывает срабатывание системы противоаварийной защиты. Ложное срабатывание системы противоаварийной защиты также относится к категории предаварийной ситуации [120].

Появление опасной тенденции характеризует выход процесса из нормального режима. Под опасной тенденцией в динамике технологического параметра понимается монотонное смещение текущего значения параметра в сторону его критического значения, которое регламентом определено как условие срабатывания сигнализации.

Предполагается, что до появления опасной тенденции динамика технологического параметра сопровождается стационарным временным рядом. Тогда для предупреждения предаварийной ситуации необходимо

определить метод обнаружения изменения свойств стационарности (появления тренда) наблюдаемого временного ряда [36, 87, 136, 149].

3.1.1. Постановка задачи раннего обнаружения опасной тенденции

Пусть рассматривается временной ряд X , отражающий динамику некоторого технологического параметра в нормальном и предаварийном режимах (рис. 3.2), где T_n - визуально определённый экспертом момент появления опасной тенденции.

$$X : x_i, i=1, 2, \dots, n, \quad (3.1)$$

где x_i – i -е по порядку наблюдение, $x_i=x(t_i)$, t_i – i -й момент времени (секунды), $t_1=0$.

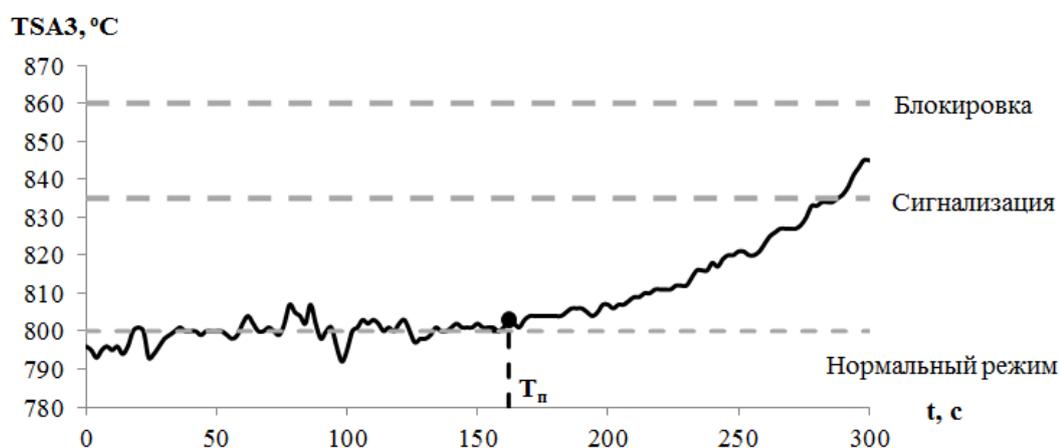


Рис. 3.2. Динамика контролируемого технологического параметра

Считаем, что до момента появления опасной тенденции T_n ряд X стационарный (закон распределения вероятностей случайной величины $x(t)$ не зависит от t , отсутствует тренд) [50, 133].

С момента появления опасной тенденции T_n процесс входит в предаварийный режим, во временном ряду X присутствует тренд.

Необходимо разработать метод раннего обнаружения тренда во временном ряду при условии достижения минимальной частоты ложных тревог:

$$T_3 \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

где T_3 - время запаздывания в обнаружении тренда, $T_3 = T_{\text{обн}} - T_{\text{п}}$, $T_{\text{обн}}$ - момент обнаружения тренда.

3.1.2. Анализ известных методов обнаружения тренда в рядах динамики технологических параметров

Проверка наличия неслучайной (зависящей от времени t) составляющей сводится к проверке гипотезы о неизменности среднего значения временного ряда. Процедура проверки может быть осуществлена с помощью различных критериев [63, 141, 141, 143, 154].

3.1.2.1. Метод серий

При использовании критерия серий для обнаружения неслучайной компоненты (тренда) [130] во временном ряду выполняются следующие действия:

- все наблюдения временного ряда объемом N упорядочиваются по возрастанию (ранжируются);
- определяется медиана \bar{x} ранжированного ряда [154];
- уровни исходного временного ряда сравниваются с медианой, в результате чего образуется последовательность значений двух типов «+» и «-». Символом «+» обозначаются значения $x_i \geq \bar{x}$, а символом «-» обозначаются значения $x_i < \bar{x}$.

Статистикой критерия является r – общее число полученных серий элементов «+» и «-», при этом под серией понимается последовательность подряд идущих «+» или «-».

В случае появления набора независимых результатов n наблюдений некоторой случайной величины итогом распределения количества серий такой последовательности будет случайная величина r со средним значением (m_r) и дисперсией (σ_r^2):

$$m_r = \frac{2n_1 n_2}{n} + 1, \quad (3.3)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{2n_1 n_2 (2n_1 n_2 - n)}{n^2 (n-1)} + 1, \quad (3.4)$$

где n_1 - число исходов «+», n_2 - число исходов «-», $n=n_1+n_2$.

В частном случае если

$$n_1 = n_2 = \frac{n}{2}$$

то:

$$m_r = \frac{n}{2} + 1, \quad (3.5)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{n^2 - 2n}{4(n-1)} + 1 \quad (3.6)$$

Проверка наличия тренда в последовательности наблюдений N по критерию серий осуществляется следующим образом. В качестве нулевой гипотезы принимается H_0 – отсутствие тренда, т.е., предполагается, что N наблюдений являются независимыми исходами одной и той же случайной величины. Тогда для проверки нулевой гипотезы с любым требуемым уровнем значимости α необходимо сравнить число полученных серий r с границами области принятия гипотезы равными $r_1(N; \alpha)$ и $r_2(N; \alpha)$, где $N=n/2$, представленных в статистических таблицах [23].

Если число полученных серий окажется за границами принятия гипотезы, то нулевая гипотеза должна быть отвергнута с уровнем значимости α . В противном случае нулевая гипотеза принимается.

3.1.2.2. Метод инверсий

Суть критерия инверсий состоит в следующем. Если в выборке значений:

$$x_1, x_2, \dots, x_n,$$

записанных в порядке их появления, за некоторым значением x_i следует меньшее по величине (т.е. $x_i > x_j$, где $(i + 1) \leq j \leq n$), то имеет место инверсия. Общее число инверсий I в выборке является статистикой критерия случайности полученных значений x [133].

Формально I вычисляется следующим образом. Определяем для множества наблюдений (x_1, x_2, \dots, x_n) величины h_{ij} :

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i > x_j, \\ 0, & x_i \leq x_j. \end{cases} \quad (3.7)$$

Тогда:

$$I = \sum_{i=1}^{n-1} I_i; \quad I_i = \sum_{j=i+1}^n h_{ij}; \quad (i = \overline{1, n-1}) \quad (3.8)$$

Если последовательность из n наблюдений состоит из независимых исходов одной и той же случайной величины, то число инверсий является случайной величиной I со средним значением и дисперсией:

$$m_I = \left(\frac{n(n-1)}{4} \right) \quad (3.9)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{2n^3 + 3n^2 - 5n}{72}. \quad (3.10)$$

Точные критические значения $I_1(\alpha)$ и $I_2(\alpha)$ приведены в статистических таблицах [23]. Гипотеза случайности принимается, если

$$I_1(\alpha) < I < I_2(\alpha).$$

3.2. Метод раннего обнаружения опасной тенденции (модифицированный метод серий)

Как отмечалось выше, опасная тенденция характеризуется монотонным смещением текущего значения контролируемого параметра $x(t_i)$ к критическому значению $x_{кр}$. Поэтому, для обнаружения трендовой компоненты, в качестве тестируемого рассматривается ряд X^* , уровни которого отражают близость наблюдаемого значения технологического параметра к его критическому значению:

$$\begin{aligned} X^*: x^*(t_i), i=1, 2, \dots, n; \\ x^*(t_i) = |x(t_i) - x_{кр}|. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Суть предлагаемого метода заключается в оценивании длины (L) последовательности подряд идущих монотонно убывающих значений (серии). Серии отражают сокращение дистанции между наблюдаемым и критическим значениями технологического параметра, следующих с интервалом k [142, 174].

Длина серии (L) сравнивается с максимальной длиной (L_{max}) серии, которая формируется по значениям, наблюдаемым в нормальном режиме.

Если $L > L_{\max}$, то принимается решение о появлении опасной тенденции (присутствует тренд).

Серией считается последовательность $\{x_{\tau}^*\}_{\tau=1}^L$ подряд идущих значений ряда X^* , для которых выполняется условие (2.12).

$$x^*(t_i) < x^*(t_{i+k}), x^*(t_{i+1}) < x^*(t_{i+1+k}), \dots, x^*(t_{i+L}) < x^*(t_{i+L+k}), \quad (3.12)$$

где k - интервал анализа вдоль последовательности моментов времени.

Интервал k подбирается по ретроспективным данным, собранным в предаварийных режимах, так, что

$$\forall x^*(t_i) \mid t_i \geq T_{\text{п}} \text{ выполняется условие: } x^*(t_{i+k}) < x^*(t_i). \quad (3.13)$$

Пусть известна максимальная длина серии, наблюдаемой в нормальном режиме L_{\max} .

Пусть так же выбран интервал k такой, что выполняется условие (3.13).

Известны следующие параметры:

- критическое значение $x_{\text{кр}}$ технологического параметра при котором срабатывает сигнализация (определено регламентом технологического процесса);

- среднее значение технологического параметра в нормальном режиме $x_{\text{ср}}$.

Тогда критерием раннего обнаружения опасной тенденции является серия $\{x_{\tau}^*\}_{\tau=1}^L$, длина которой $L > L_{\max}$.

Предлагаемый метод раннего обнаружения опасной тенденции формализован в виде последовательного выполнения двухэтапной процедуры (рис. 3.3).

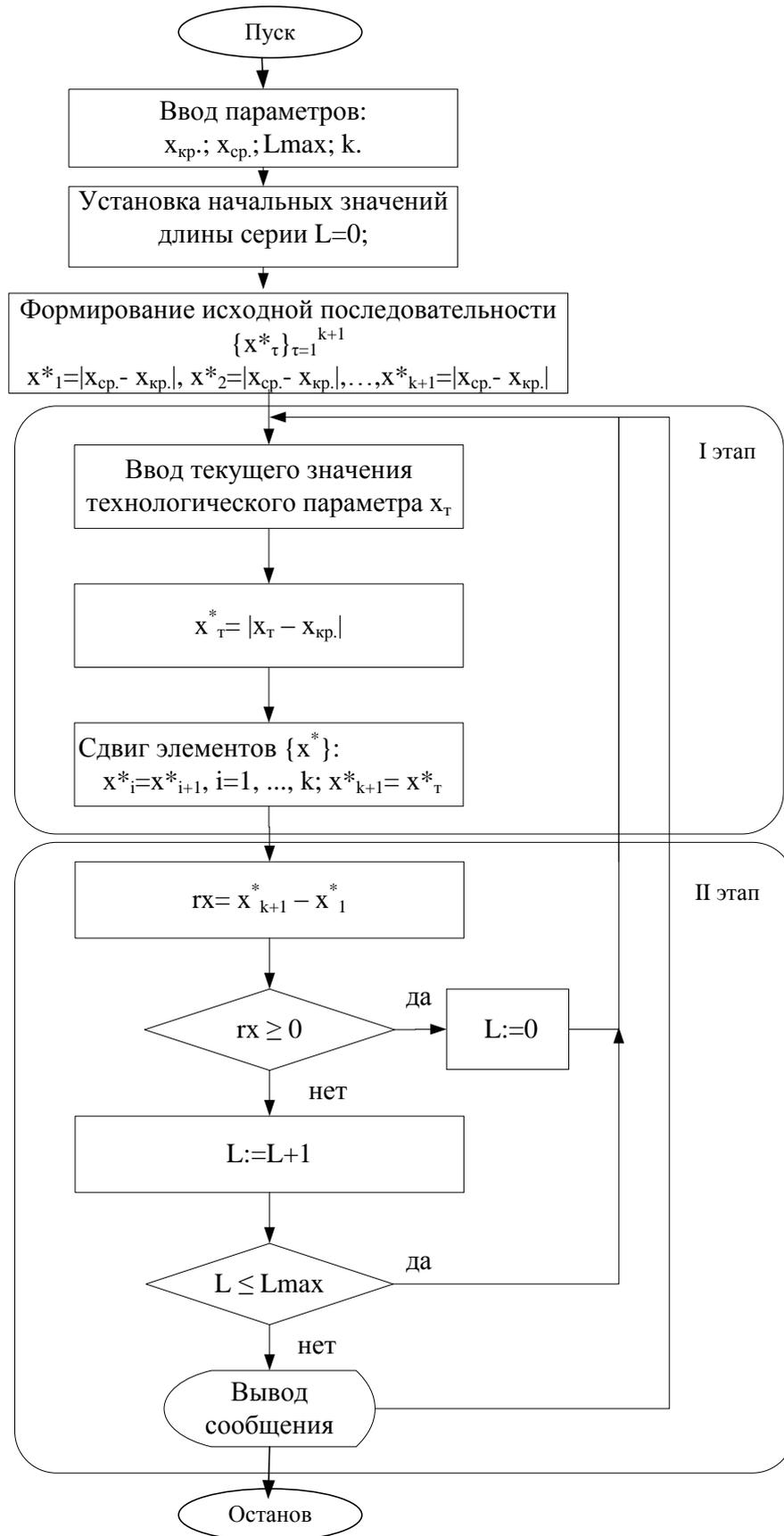


Рис. 3.3. Процедура реализации метода обнаружения опасной тенденции

На первом этапе осуществляется ввод текущего значения технологического параметра x_T , определяется его близость к критическому значению $x_T^* = |x_T - x_{кр}|$, формируется новая последовательность для сравнения направления изменения расстояния до критического значения наблюдений, следующих с интервалом k (производится сдвиг элементов последовательности)

$$\left\{ x_i^* \right\}_{i=1}^{k+1}, x_{i+1}^* := x_{i+1}^*, \quad i=1, 2, \dots, k, \quad x_{k+1}^* := x_T^*. \quad (3.14)$$

На втором этапе определяется и оценивается изменение расстояния (gx) до критического значения наблюдаемых значений технологического параметра, следующих с интервалом k :

$$gx = x_{k+1}^* - x_1^*. \quad (3.15)$$

Если $gx \geq 0$, то серия не наблюдается $L := 0$, осуществляется переход к началу первого этапа; если $gx < 0$, то серия увеличивается на один элемент $L := L + 1$, проверяется длина серии:

– если $L \leq L_{\max}$, то опасная тенденция отсутствует, вводится очередное значение технологического параметра, выполняются операции первого этапа;

– если $L > L_{\max}$, то принимается решение о появлении опасной тенденции, выводится соответствующее сообщение, выполняются операции первого этапа.

Для формирования критерия необходимо последовательно определить интервал k и максимальную длину L_{\max} серии, которая формируется по значениям, наблюдаемым в нормальном режиме.

На рис. 3.4 представлена общая схема формирования критерия раннего обнаружения опасной тенденции в динамике контролируемого технологического параметра.

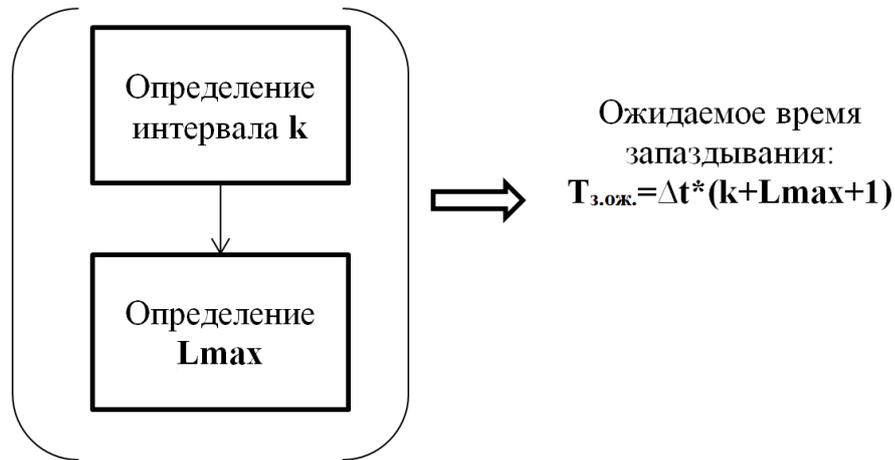


Рис. 3.4. Схема формирования критерия выявления опасной тенденции

Предлагается следующая схема расчёта k (рис. 3.5):

1) на основе ретроспективных данных, отражающих опасную динамику анализируемого технологического параметра, сформировать временной ряд

$$X : x_i, i=1, 2, \dots, n;$$

задать установленное экспертом допустимое время задержки обнаружения опасной тенденции $T_{з.доп}$, установленное регламентом $x_{кр}$, интервал наблюдений Δt ; сформировать временной ряд расстояний до критического значения

$$X^*: x^*(t_i), i=1, 2, \dots, n;$$

$$x^*(t_i) = |x(t_i) - x_{кр}|;$$

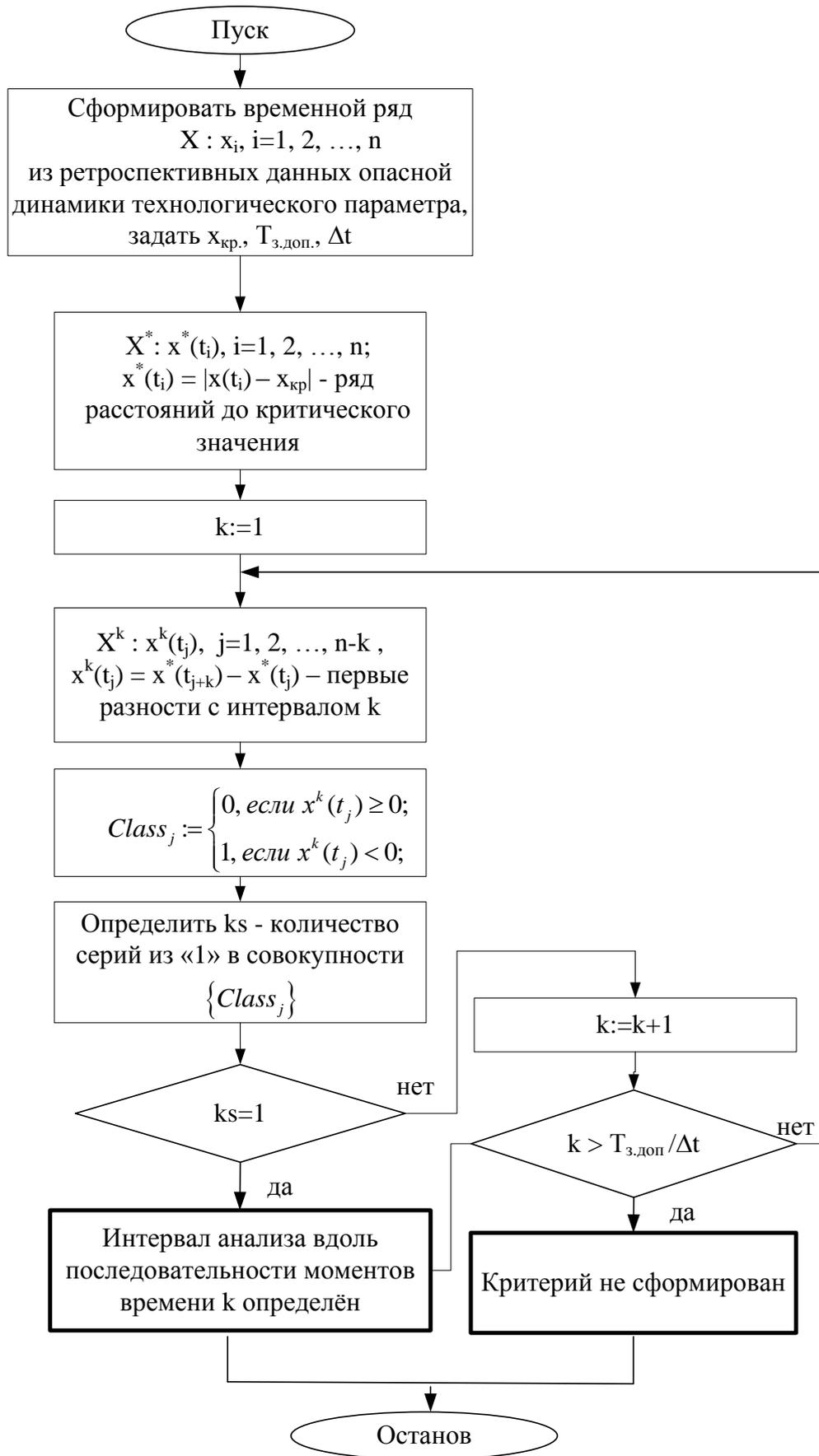


Рис. 3.5. Процедура определения интервала k

2) построить последовательность первых разностей X^k анализируемого временного ряда X^* с интервалом k , начиная с $k=1$ [10].

$$X^k : x^k(t_j), j=1, 2, \dots, n-k, x^k(t_j) = x^*(t_{j+k}) - x^*(t_j) \quad (3.16)$$

Так, при $k=1$, $X^1 : x^1(t_j), j=1, 2, \dots, n-1, x^1(t_j) = x^*(t_{j+1}) - x^*(t_j)$;

3) определить классы $x^k(t_j)$:

$$\text{Class}_j = \begin{cases} 0, & \text{если } x^k(t_j) \geq 0; \\ 1, & \text{если } x^k(t_j) < 0; \end{cases} \quad (3.17)$$

4) определить количество серий ks из «1» в совокупности $\{\text{Class}_j\}$;

5) оценить количество серий:

- если совокупность $\{\text{Class}_j\}$ представляет последовательность только из «1», т.е. $ks=1$, то в качестве искомого значения интервала k принять его текущее значение;

- в противном случае, когда в последовательности $\{\text{Class}_j\}$ присутствуют скачки (т.е. колебания в ряду X^k значительно больше, чем смещение в сторону критического значения), увеличить интервал на одно наблюдение;

б) сравнить его с максимально допустимым, равным $T_{з,доп}/\Delta t$:

- если k не превышает максимально допустимое значение, то для проверки допустимости его текущего значения повторно выполняются вышеуказанные операции, с пункта 5;

- в противном случае, критерий на данном наборе значений не может быть сформирован.

Схема расчета L_{\max} представлена на рис. 3.6.

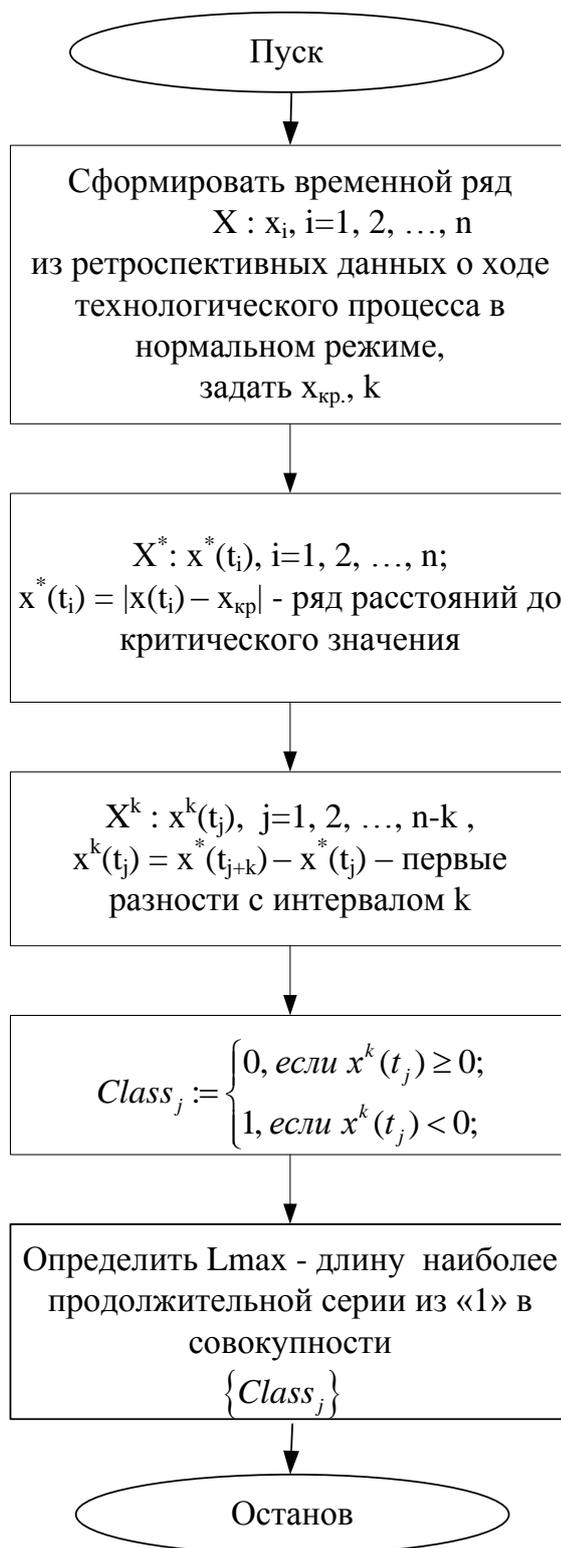


Рис. 3.6. Процедура расчета Lmax

Расчёт Lmax (рис. 3.6) заключается в выполнении следующих процедур:

1) из ретроспективных данных о ходе технологического процесса в нормальном режиме сформировать временной ряд

$$X : x_i, i=1, 2, \dots, n,$$

задать $x_{кр.}, k$;

2) сформировать временной ряд расстояний до критического значения

$$X^* : x^*(t_i), i=1, 2, \dots, n;$$

$$x^*(t_i) = |x(t_i) - x_{кр}| ;$$

3) построить последовательность первых разностей X^k анализируемого временного ряда X^* с интервалом k

$$X^k : x^k(t_j), j=1, 2, \dots, n-k,$$

$$x^k(t_j) = x^*(t_{j+k}) - x^*(t_j);$$

4) определить классы $x^k(t_j)$:

$$\text{Class}_j = \begin{cases} 0, & \text{если } x^k(t_j) \geq 0; \\ 1, & \text{если } x^k(t_j) < 0; \end{cases}$$

5) определить L_{\max} - длину наиболее продолжительной серии из «1» в совокупности $\{\text{Class}_j\}$.

3.3. Эффективность модифицированного метода серий

Эффективность предложенного в работе модифицированного метода серий проводилась с использованием моделей предаварийной динамики представленных в предыдущем подразделе (п. 3.2) на основании сравнения

показателей, полученных по методу серий и по методу инверсий. Эффективность оценивалась исходя из постановки задачи (3.2), т.е. по времени запаздывания T_3 в обнаружении опасной тенденции $T_{обн}$ относительно момента её появления $T_{п}$ ($T_3 = T_{обн} - T_{п}$), а так же с учётом допустимого уровня ложных тревог.

Тестирование по критерию серий проведено средствами Statgraphics Plus, для реализации процедур тестирования по критерию инверсий, разработана специальная программа на С# [125].

В качестве исходных данных взяты значения одного из технологических параметров инициирующих блокировку процесса – температура конвертированного газа после печи первичного риформинга (TSA3, °C) в предаварийном режиме; диапазон допустимых значений [790 - 835 °C]; критические значения – аварийное значение 860 °C, сигнализация 835 °C; интервал между наблюдениями – 2 секунды; количество наблюдений $n=160$. Исходные данные к расчету приведены в Приложении Б, табл. Б.1 и отображены в виде графика на рис. 3.7.



Рис. 3.7. Исследуемый временной ряд

Обнаружение тренда в моменты времени $t_i = \overline{0, T_{II}}$ оцениваем как «ошибку первого рода» - ложная тревога. Не обнаружение тренда за границей $t_i > T_{II}$ оцениваем как «ошибку второго рода» - пропуск события.

Таблица 3.2

Результаты тестирования на основе сериального критерия

№ п.	Медиана \bar{x}	Количество серий r	Принятая гипотеза		№ п.	Медиана \bar{x}	Количество серий r	Принятая гипотеза	
			$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
1	803,69	24	H ₀	H ₀	30	801,079	14	H ₁	H ₁
2	803,61	22	H ₀	H ₀	32	801,079	13	H ₁	H ₁
3	803,55	24	H ₀	H ₀	34	801,079	13	H ₁	H ₁
4	803,45	22	H ₀	H ₀	36	801,072	13	H ₁	H ₁
5	803,36	20	H ₀	H ₀	38	801,072	13	H ₁	H ₁
6	803,28	18	H ₀	H ₀	40	801,072	13	H ₁	H ₁
7	803,21	16	H ₁	H ₀	42	801,072	12	H ₁	H ₁
8	803,096	18	H ₀	H ₀	44	801,087	13	H ₁	H ₁
9	802,996	20	H ₀	H ₀	46	801,087	13	H ₁	H ₁
10	802,986	17	H ₁	H ₀	48	801,087	12	H ₁	H ₁
11	802,986	17	H ₁	H ₀	50	801,54	12	H ₁	H ₁
12	802,986	17	H ₁	H ₀	52	801,996	12	H ₁	H ₁
13	807,996	20	H ₀	H ₀	54	802,001	9	H ₁	H ₁
14	802,996	20	H ₀	H ₀	56	802,001	9	H ₁	H ₁
15	802,986	17	H ₁	H ₀	58	802,37	4	H ₁	H ₁
16	802,986	17	H ₁	H ₀	60	803,083	4	H ₁	H ₁
17	802,986	16	H ₁	H ₀	65	803,967	4	H ₁	H ₁
18	802,836	18	H ₀	H ₀	70	805,025	4	H ₁	H ₁
19	802,840	18	H ₀	H ₀	75	806,184	3	H ₁	H ₁
20	802,57	14	H ₁	H ₁	80	807,505	2	H ₁	H ₁
22	802,26	16	H ₁	H ₁	90	811,992	4	H ₁	H ₁
24	802,02	12	H ₁	H ₁	100	820,012	6	H ₁	H ₁
26	801,989	14	H ₁	H ₁	105	821,006	4	H ₁	H ₁
28	801,931	16	H ₁	H ₁	110	826,974	4	H ₁	H ₁

На рис. 3.9 показаны моменты, характеризующие ложную тревогу в соответствии с полученными результатами.

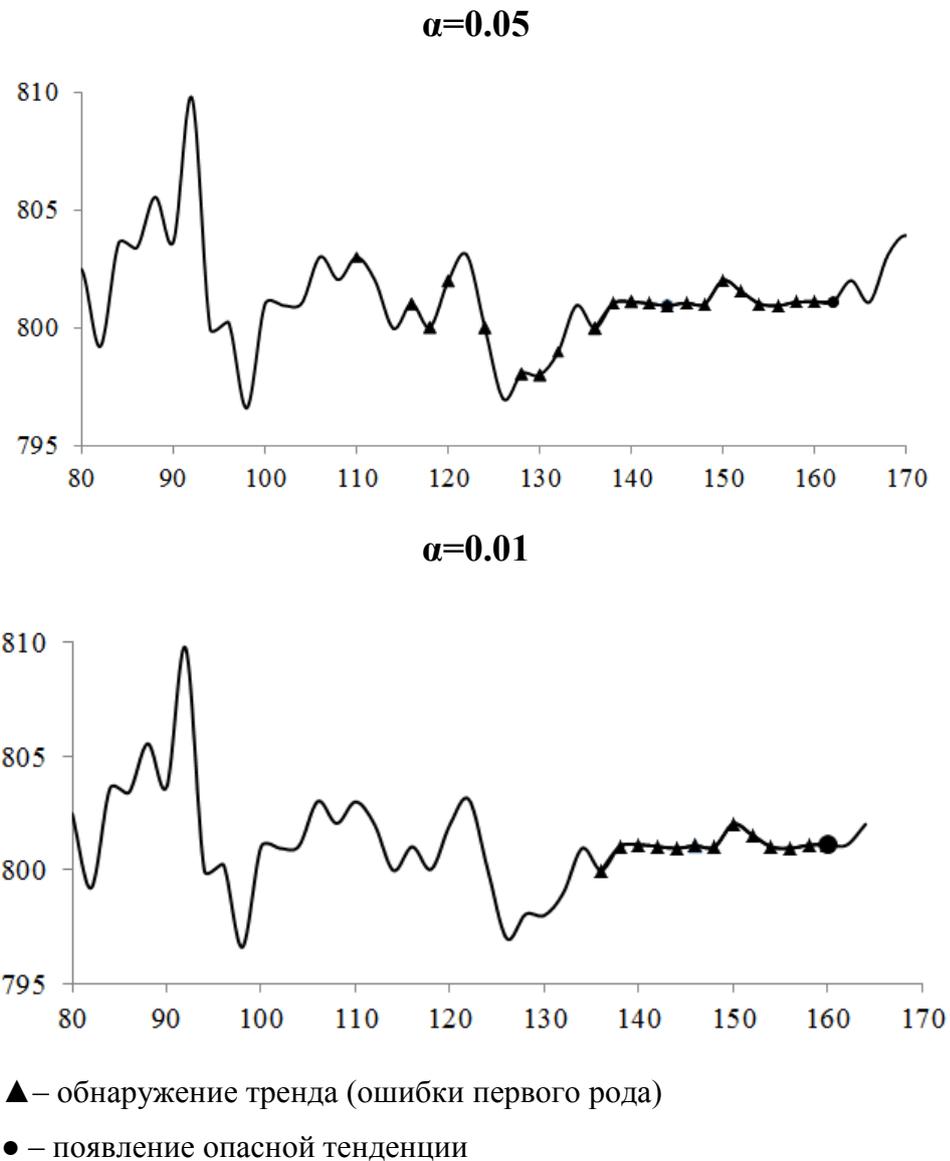


Рис. 3.9. Результаты тестирования по критерию серий

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о нецелесообразности использования критерия серий для обнаружения опасной тенденции, поскольку наблюдается недопустимо высокая частота ошибок первого рода.

3.3.2. Оценка эффективности метода инверсий

Рассмотрим последовательность значений $n=160$, приведенную ранее (рис. 3.7). Установим «ширину окна» $k=50$.

Первая последовательность независимых наблюдений (см. табл. 3.1).

Общее число инверсий в 50 наблюдениях равно $I=648$. Из соответствующей таблицы [23] при уровне значимости $\alpha=0.05$ определим область принятия гипотезы: $[I_1(\alpha)=495, I_2(\alpha)=729]$. Т.к. $I=648$ попадает в область принятия гипотезы H_0 , то гипотеза об отсутствии тренда принимается.

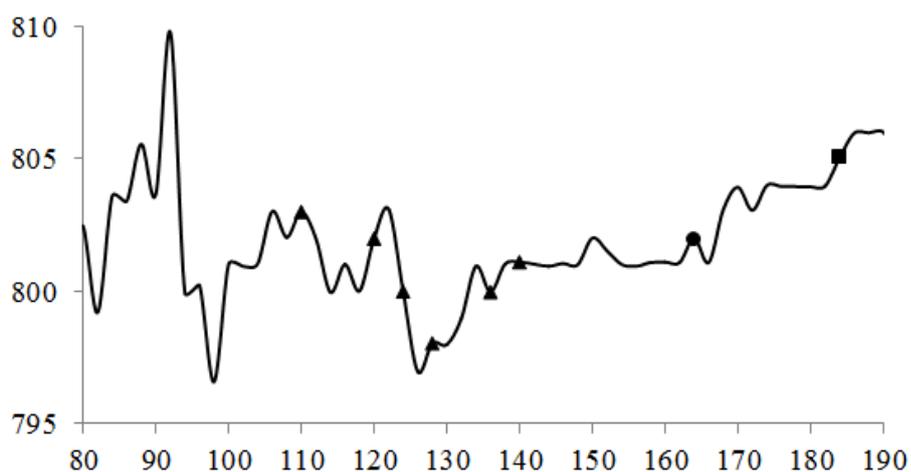
Далее применяя метод «скользящего окна», сдвигаем интервал вправо вдоль временного ряда на одно значение и снова выполняем соответствующие критерию инверсий процедуры.

Обозначим время, соответствующее первому моменту обнаружения тренда за границей $T_{п}$, как $T_{обн.}$. Тогда можно определить время запаздывания (T_3) в обнаружении опасной тенденции:

$$T_3 = T_{обн.} - T_{п.} \quad (2.26)$$

Так как $T_{п.} = 164$ секунды с момента начала наблюдений, а $T_{обн.} = 184$ секунд, то $T_3 = 20$ секунд.

Как видно на рис. 3.10, тест на выявление тренда по критерию инверсий при «ширине окна» $k=50$, допускает достаточно высокую частоту ошибок второго рода, а с появлением опасной тенденции обнаруживает тренд с запаздыванием в 20 секунд.



- ▲ – обнаружение тренда до появления опасной тенденции (ошибки первого рода)
- – появление опасной тенденции
- – обнаружение тренда с появлением опасной тенденции

Рис. 3.10. Результаты тестирования по критерию инверсий

Результаты тестирования по критерию инверсий при $k=40; 50; 60; 70; 100$ отражены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты тестирования по критерию инверсий

«Ширина окна» k	Время обнаружения опасной тенденции, $T_{обн.}$ (с)	Время запаздывания обнаружения тренда $T_{з.}$ (с)	Количество ложных тревог
40	184	20	19
50	184	20	6
60	186	22	5
70	188	24	2
100	198	34	0

Критерии серий и инверсий для обнаружения и оценки тренда в данных отличаются по сложности реализации и эффективности.

Критерий инверсий – более мощный по сравнению с критерием серий при обнаружении монотонного тренда в последовательности наблюдений. К тому же, этот критерий проще в реализации.

Оптимальной, по наименьшему уровню ложных тревог выбрана ширина скользящего окна равная 50 наблюдениям.

3.3.3. Сравнительное тестирование разработанного метода по сравнению с методом инверсий

Т.к. опасная тенденция характеризуется стремлением значения контролируемого параметра $x(t_i)$ в сторону критического значения $x_{кр}$ (из технологического регламента блокировки), то целесообразно в качестве тестируемого рассматривать ряд X^* , отражающий близость текущих значений технологического параметра к его критическому значению (2.11):

$$X^* : x^*(t_i), i=1, 2, \dots, n; x^*(t_i) = |x(t_i) - x_{кр}|,$$

в качестве альтернативной гипотезы H_1 - присутствие монотонно-убывающего тренда ($x_{кр}=860$ °C).

Для формирования критерия выполнены следующие операции:

1) построена последовательность X^k (2.16) первых разностей анализируемого временного ряда X^* , $k=1$.

$$X^1 : x^1(t_j), j=1, 2, \dots, n-1, x^1(t_j) = x^*(t_{j+1}) - x^*(t_j)$$

2) согласно (2.17), определены классы $x^1(t_j)$:

$$\text{Class}(t_j) = \begin{cases} 0, & \text{если } x^1(t_j) \geq 0; \\ 1, & \text{если } x^1(t_j) < 0. \end{cases}$$

3) в совокупности $\{\text{Class}(t_j)\}_{t=0}^{T_n-2}$ определена длина максимальной серии из единиц $L_{\max}^{\text{норм.}}$ ($L_{\max}^{\text{норм.}}=4$);

4) осуществлена процедура обнаружения опасной тенденции, исходя из того, что если в совокупности $\{\text{Class}(t_j)\}$ появилась серия из единиц продолжительностью более $L_{\max}^{\text{норм.}}$, то принимается гипотеза H_1 , момент времени, соответствующий $(L_{\max}+1)$ элементу такой серии определяется как $T_{\text{обн.}}$.

Если ввести следующее обозначение серии: $SZ_{t^h}^{t^k}$, где Z - значение класса, $Z=(0, 1)$; t^h - момент времени начала серии; t^k - момент времени конца серии, то образованную последовательность серий можно представить:

$S1_{164}^{164}$; $S0_{166}^{166}$; $S1_{168}^{170}$; $S0_{172}^{172}$; $S1_{174}^{174}$; $S0_{176}^{180}$; $S1_{182}^{190}$; $S0_{192}^{192}$; $S1_{194}^{198}$; $S0_{200}^{202}$; $S1_{204}^{214}$ и т.д.

Искомая серия $S1_{182}^{190}$, $T_{\text{обн.}}=190$ с. Запаздывание в обнаружении опасной тенденции, согласно формуле (2.2) $T_3=T_{\text{обн.}}-T_{\text{п}}=190-164=26$ (с).

С момента появления опасной тенденции длина максимальной серии $L_{\max}=9$, количество серий равно 29. Частое чередование серий можно объяснить тем, что при выбранном шаге дифференцирования: $k=1$ наблюдение (2 с) амплитуда колебания значения технологического параметра существеннее его смещения в сторону критического значения.

Необходимо так подобрать k , чтобы ряд первых разностей $x^k(t_j)$ (см. формулу (2.16)), соответствующих $t_j > T_{\text{п}}$, имел нестационарный характер, что проявляется в сокращении количества серий и увеличении продолжительности единичных серий;

5) построены последовательности первых разностей анализируемого временного ряда X^* с $k=2, 3, 4, 5$, соответственно 4, 6, 8, 10 секунд:

$$X^k : x^k(t_j), j=1, 2, \dots, n-1, x^k(t_j) = x^*(t_{j+k}) - x^*(t_j)$$

и выполнены операции п.п.2-4 для каждой последовательности.

Результаты проведенных операций отражены в таблицах Приложения Б (Б.2., Б.3.), характеристики, необходимые для формирования критерия, сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

Результаты для формирования критерия

Полученная характеристика анализируемой последовательности	Шаг дифференцирования				
	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5
$L_{\max}^{\text{норм}}$, наблюдений (до появления опасной тенденции)	4	6	7	7	7
$T_{\text{обн.}}, \text{ с}$	190	218	220	210	178
$T_3, \text{ с}$	26	54	56	46	14
$L_{\max}^{\text{опас}}$, наблюдений (с момента появления опасной тенденции)	9	24	30	62	78
Количество серий с момента появления опасной тенденции	29	17	13	7	1

Как видно из таблицы 3.6, при оценки изменения дистанции между критическим и текущим значениями контролируемого параметра, целесообразно использовать предлагаемый критерий с интервал $k=5$ значений (10 секунд). Тогда, если наблюдается серия значений «1» с длиной больше 7, то гипотеза H_0 отвергается и принимается гипотеза H_1 .

Результат тестирования согласно предлагаемому методу обнаружения опасной тенденции: в рассматриваемой последовательности (Приложение Б, табл. Б.1) обнаружена опасная тенденция при появлении серии длиной 8 значений в момент $t_j = T_{\text{обн.}} = 178 \text{ с}$, при этом $T_3 = 178 - 164 = 14 \text{ с}$ (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Обнаружение опасной тенденции по предлагаемому методу

Показатели качества предлагаемого метода в сравнении с результатами тестирования в соответствии с наиболее приемлемым классическим методом выявления тренда – критерием инверсий отражены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Качество обнаружения опасной тенденции

Критерии	Время запаздывания обнаружения опасной тенденции T_z (с)	Количество ложных тревог
Критерий инверсий, «ширина окна» $k=50$	20	6
Предлагаемый метод	14	0

Таким образом, на примере анализа предаварийной динамики временного ряда выделенного контролируемого технологического параметров производства аммиака проведена оценка работоспособности и

эффективности методов численного анализа временных рядов: критерий серий; критерий инверсий.

Оценивая полученные результаты, сделан вывод о целесообразности использования разработанного и предложенного в работе метода для обнаружения опасной тенденции. Предлагаемый метод обеспечивает более высокое качество обнаружения опасной тенденции: минимальное время запаздывания обнаружения опасной тенденции при отсутствии ложных тревог.

Выводы к разделу 3

1. Проведена разработка методов и моделей для оценки и прогнозирования технологических параметров, инициирующих аварийные ситуации в производстве аммиака.

2. Задача раннего обнаружения опасной тенденции в динамике технологических параметров решена на основе методов анализа временного ряда.

3. Рассмотрены непараметрические методы выявления тренда во временных рядах. Предложен метод раннего обнаружения опасной тенденций в динамике контролируемого технологического параметра, который обеспечивает допустимое время задержки обнаружения и минимальную частоту ложных тревог. На примере анализа предаварийной динамики временного ряда выделенного контролируемого технологического параметров производства аммиака проведена оценка работоспособности и эффективности предложенного метода.

4. Разработанный метод оценки основных технологических параметров позволяет осуществлять прогнозирование значений параметров технологического процесса, инициирующих аварийную ситуацию, и делать обоснованные выводы о степени безопасности системы.

Апробация результатов

Основные научные результаты раздела опубликованы в работах [102, 105, 106, 141, 142, 145, 174].

РАЗДЕЛ 4

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В разделе представлены результаты практической реализации предлагаемых в работе моделей, методов и подходов. Описаны основные структурные компоненты системы. Для оценки выявленной опасности в динамике технологических параметров разработаны настроечные модели на основе методов регрессии. Обосновано внедрение автоматизированной системы прогнозирования аварийных ситуаций в производстве аммиака. Приведены результаты оценки эффективности информационного обеспечения при использовании в контуре операторского управления автоматизированной системы прогнозирования.

4.1. Информационная технология поддержки принятия решений оператора в предаварийных ситуациях

Предлагаемые в работе модели, методы и подходы в совокупности представляют информационную технологию прогнозирования аварийной ситуации химического производства (рис. 4.1).

Важной задачей практической реализации рассматриваемой информационной технологии является разработка проекта базы данных параметров технологических процессов, составляющих химическое производство.

Для проектирования функциональной структуры БД использовался программный продукт Toad Data Modeller. БД реализована в СУБД Oracle.

БД формируется на основании информации из технологических регламентов производств, данных мониторинга технологического процесса

средствами АСУ ТП и данных по техническому обслуживанию оборудования.

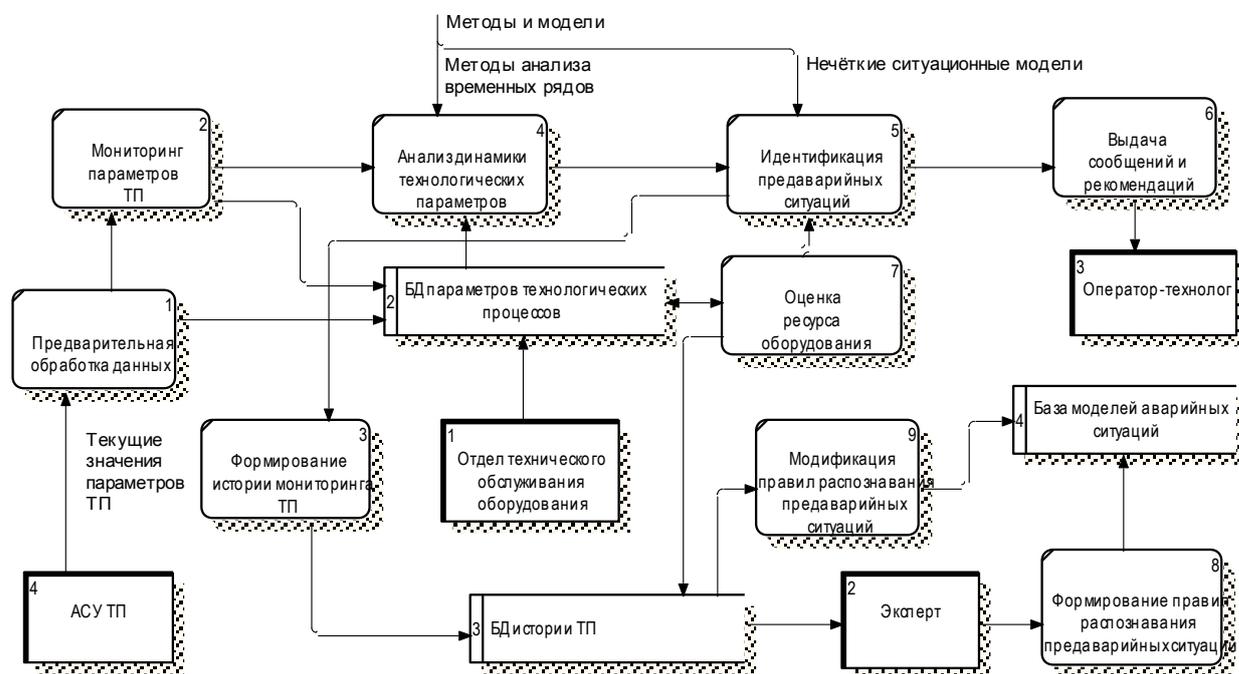


Рис. 4.1. Схема информационной технологии поддержки принятия решений оператора в предаварийных ситуациях

Информация из БД обеспечивает поддержку принятия решений оператора-технолога в предаварийных ситуациях технологического процесса. Кроме того, информация из БД может использоваться главными специалистами предприятия для управления техническим обслуживанием оборудования.

4.1.1. БД параметров технологического процесса

4.1.1.1. Структура и связи БД

БД параметров технологического процесса (FORECAST) содержит информацию о контролируемых параметрах: считанные показания датчиков, их местоположение, привязка к оборудованию и технологическому процессу, единицы измерения, время и дата считывания.

Структура БД FORECAST представлена на рисунке 4.2 и в таблице 4.1.

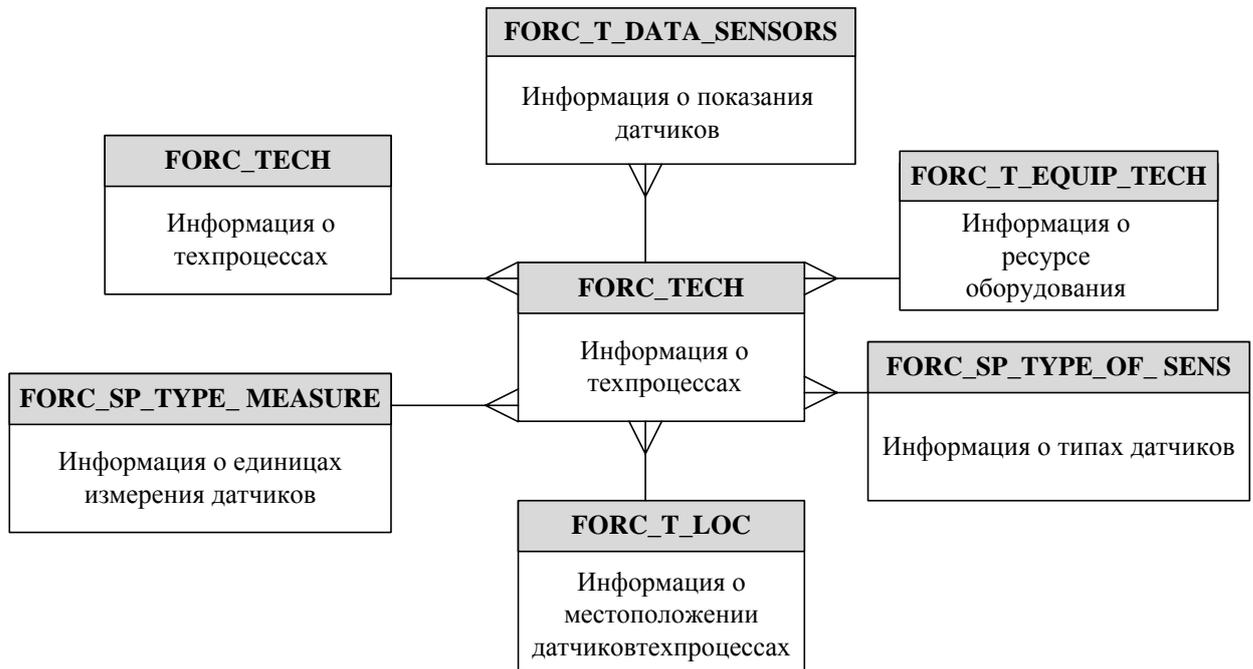


Рис. 4.2 Схема данных FORECAST

Таблица 4.1

Структура БД FORECAST

Атрибут	Объяснение	Пример
1	2	3
ID_	Уникальный идентификатор в базе (запрет на повторение).	115428
NAME_OF_SENSOR	Название датчика	FCSA3
DATE_OF_DATA	Время снятия показания с датчика	10.02.2015 13:17
MEASURE_DATA	Показание значения контролируемого технологического параметра, снятое с определённого датчика в определённый момент времени.	35000
NAME_OF_TECH	Наименование техпроцесса.	1-Б

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3
DESC_OF_TECH	Описание техпроцесса.	Технологический процесс производства синтетического аммиака по энерго-технологической схеме на отечественном и частично импортном оборудовании, введено в эксплуатацию в декабре 1975 года с производительностью 1360 тонн в сутки.
DESCRIPT_EQUIP	Описание оборудования.	Реактор вторичного риформинга.
DATE_LAST_MAIN TANC	Дата последнего технического осмотра.	15.07.2014
DATE_NEXT_MAIN TANC	Дата следующего технического осмотра (планового).	18.06.2015
TYPE_OF_SENS	Тип датчика.	Датчик расхода воздуха в
SENS_LONG	Местоположение по GPS навигатору (долгота)	38.448365
SENS_LATIT	Местоположение по GPS навигатору (широта)	48.941415
UNIT_OF_MEASURE_SENS	Единица измерения параметра датчиком.	м ³ /час

4.1.1.2. Сущности предметной области

FORC_TECH (тех. процесс) – содержит название и описание техпроцесса.

Атрибуты:

ID_TECH (Number)

NAME_OF_TECH (Varchar2(100))

DESC_OF_TECH (Varchar2(256))

FORC_T_DATA_SENSORS (показания датчиков) – содержит

повременные показания датчиков.

Атрибуты:

ID_DATA_SENS (Number) – код показания датчика

DATE_OF_DATA (Date) – время показания

MEASURE_DATA (Number) - показание

ID_SENSOR (Number) – идентификатор датчика

IX_Relionship12 (IX1) – индекс вторичного ключа

FORC_T_EQUIP_TECH (оборудование) – содержит информацию о ресурсах оборудования.

Атрибуты:

ID_EQUIP (Number) – идентификатор оборудования;

DATE_LAST_MAINTANC (Date) – дата последнего технического осмотра;

DATE_NEXT_MAINTANC (Date) - дата следующего технического осмотра (планового);

DESCRIPT_EQUIP (Varchar2(256)) – описание оборудования

FORC_SP_TYPE_OF_SENS (типы датчиков) - содержит информацию о типах датчиков.

Атрибуты:

ID_TYPE_OF_SENS (Number)

TYPE_OF_SENS (Varchar2(30))

FORC_T_LOC (местоположение) - содержит информацию о местоположении датчиков.

Атрибуты:

ID_LOCATION (Number) – код местоположения по GPS навигатору

SENS_LONG (Number) - долгота

SENS_LATIT (Number) -широта

FORC_SP_TYPE_MEASURE (измерение) - содержит информацию о единицах измерения параметров.

Атрибуты:

ID_TYPE_MEASURE (Number)

UNIT_OF_MEASURE_SENS (Varchar2(60))

FORC_T_SENSORS (датчики).

Атрибуты:

ID_SENSOR (Number) – код датчика;

NAME_OF_SENSOR (Varchar2(55)) – название датчика;

ID_TYPE_MEASURE (Number) – код единицы измерения;

ID_TECH (Number) – код техпроцесса;

ID_LOCATION (Number) – код местоположения

ID_EQUIP (Number) – код оборудования;

ID_TYPE_OF_SENS (Number) – код типа датчика;

IX_Reltionship11 (IX1) - индекс вторичного ключа;

IX_Reltionship13 (IX2) - индекс вторичного ключа;

IX_Reltionship14 (IX3) - индекс вторичного ключа;

IX_Reltionship16 (IX4) - индекс вторичного ключа;

IX_Reltionship17 (IX5) - индекс вторичного ключа.

4.2. Программное обеспечение СППР при управлении производством аммиака

4.2.1. Структурные компоненты системы

Действующая АСУ ТП исследуемого производства аммиака спроектирована в соответствии с [31] и выполняет следующие функции:

- информационно-мониторинговые (централизованный сбор, обработка и представление в цифровом виде аналоговой и дискретной информации с объекта контроля и диспетчерского управления);
- исторические функции (сбор и отражение на дисплее исторических данных двух категорий: информация почасовой средней и тренда точки хранится в дополнительной плате многофункционального контроллера; расширенный тренд группы, тренд настройки и архивный тренд);
- вычисление среднего почасового значения (мгновенные значения собираются в каждом цикле сканирования и составляют 20-секундные

данные, которые линейризируются, нормализуются и хранятся в памяти. Далее, из трёх вычисляется средняя 1-минутная величина, средняя 3-х, 6-ти, 12-ти минутная и средняя за 1 час. Мгновенные данные за каждый период линейризируются, нормализуются и хранятся в контроллере);

- управление, реализованное на базе многофункциональных контроллеров;
- диагностика системы и составления рапортов;
- технологическая защита и защитные блокировки.

Система оповещения действующей АСУ ТП дополнена системой поддержки принятия решения (СППР) о предаварийной ситуации, обобщенная структурная схема которой представлена на рис. 4.3.

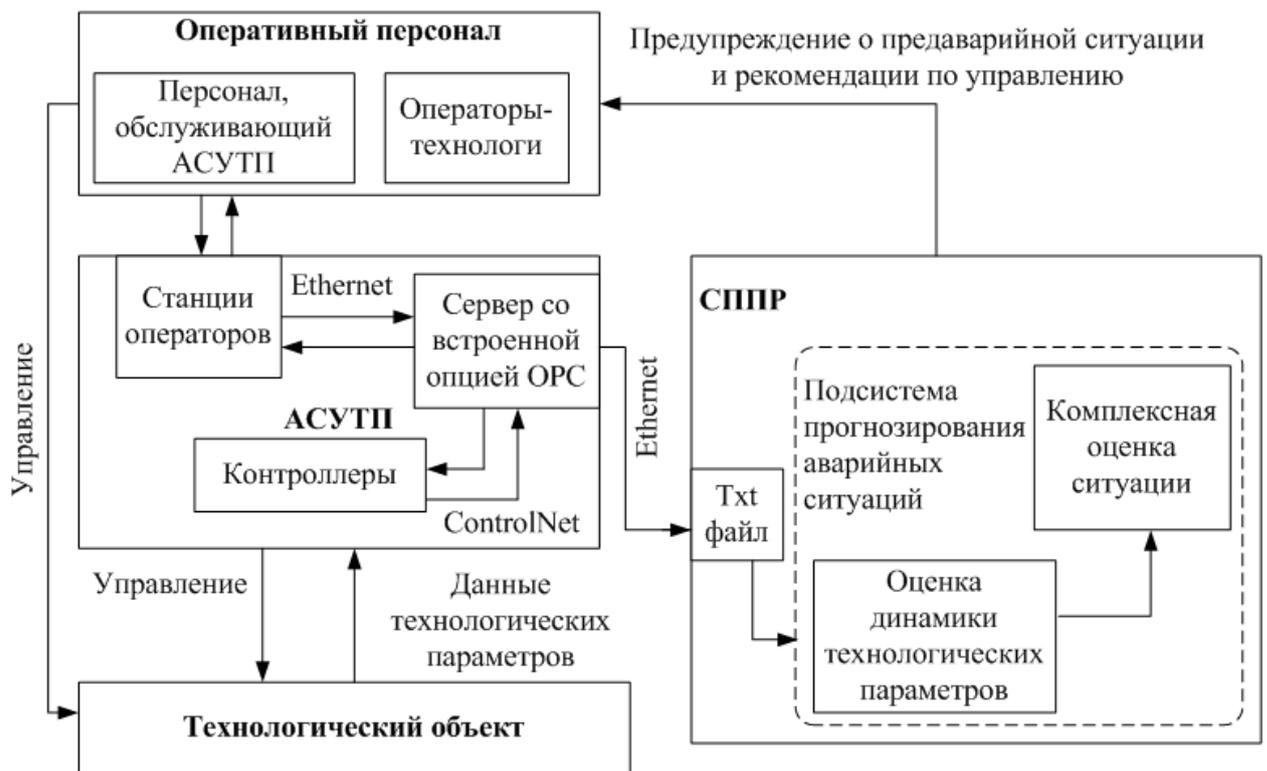


Рис. 4.3. Обобщенная структурная схема системы прогнозирования аварийной ситуации в химико-технологическом процессе

Программное обеспечение СППР содержит подсистему оценки динамики параметров технологического процесса, инициирующих

аварийную ситуацию, и подсистему принятия решения о факте предаварийной ситуации.

Подсистема принятия решения о факте предаварийной ситуации основана на комплексной оценке и сравнении в реальном времени данных о значениях технологических параметров, параметров окружающей среды и базовых эталонных значений, характеризующих тенденции изменений контролируемых параметров. Подсистема генерации решения является интеллектуальной системой, основанной на базах знаний, составляющих одну из важнейших областей искусственного интеллекта [27].

Структурно СППР состоит из следующих компонентов:

1. База знаний нарушений технологических режимов, предаварийных и аварийных ситуаций.
2. Модуль получения и обработки запроса непосредственно с АСУ ТП.
3. Модуль генерации решения.

Подсистема выработки сценария предотвращения аварийной ситуации в зависимости от вида текущего события предлагает оператору различные готовые сценарии принятия решений.

Согласно схеме, представленной на рис. 4.1, поддержка принятия решения осуществляется в такой последовательности.

АСУ ТП осуществляет регистрацию параметров режима работы системы.

Через модуль получения и обработки запроса данные поступают в подсистему прогнозирования аварийной ситуации, где на основании моделей для оценки и прогнозирования параметров, инициирующих аварийные ситуации в производстве, выполняется идентификация и (или) прогнозирование выхода значений контролируемых параметров за регламентные значения. Оценка технологических параметров решает задачу выявления опасных тенденций, имеющих неблагоприятные последствия (нежелательных блокировок и аварийных ситуаций).

На основании полученных оценок и сравнении их с оценками в базе данных формируется окончательное решение о ситуации. При этом используются параметрические динамические модели, в которых значения параметров «подгоняются» под заданную ситуацию. После чего, используя накопленную ранее в аналогичных ситуациях информацию, хранящуюся в базе знаний, выбираются возможные варианты решений по управлению в данной ситуации.

В модуле генерации решения из выбранных вариантов, с учетом экспертных оценок и требований ситуационного управления, выбирается оптимальное в данной ситуации решение и предлагается оператору [137].

Нештатные ситуации зарождаются и протекают в основном в условиях специфических, свойственных конкретному агрегату.

Поскольку универсальность современных АСУ ТП исключает индивидуальные особенности объекта управления, для решения задачи поддержки принятия решений при оценке и прогнозировании состояния конкретного агрегата проведена разработка специализированной подсистемы с последующей его интеграцией с АСУ ТП.

4.2.2. Интеграция системы прогнозирования аварийных ситуаций в систему управления производством аммиака

4.1.2.1. Интеграция на основе стандарта OPC

Основной задачей интеграции является обеспечение передачи достоверных данных с технологического уровня на уровень управления финансово-хозяйственной деятельностью предприятия (АСУП) и одновременно с этим решение проблемы внутриводского баланса и управления производством [86].

Одним из путей передачи технологической информации, а также данных реального времени в автоматизированные системы более высокого

уровня управления являются информационные серверы, удовлетворяющие технологии OPC (OLE for Process Control).

Важными компонентами, используемыми на данных уровнях, являются системы управления базами данных (СУБД), обеспечивающие пользователя необходимой информацией. СУБД позволяют решить проблемы, связанные с большими объемами дублированной, иногда противоречивой информации, предоставляемой различными, зачастую несовместимыми друг с другом способами. Причём перспективной является концепция создания базы данных реального времени (БДРВ) на основе известных реляционных БД, например, MS SQL Server.

Основные функции БДРВ, построенные на основе MS SQL Server заключаются в следующем:

- сохранение не критичной во времени информации в БД Microsoft SQL Server; в то время как вся технологическая информация сохраняется в специальном формате;
- поддержание высокой пропускной способности, что обеспечивает сохранение огромных потоков информации с высокой разрешающей способностью;
- поддержание целостности данных, что обеспечивает запись больших объемов информации без потерь;
- использование Microsoft SQL Server в режиме сервера реального времени.

Используемая в БДРВ архитектура клиент-сервер позволяет заполнить промежуток между промышленными системами контроля и управления реального времени, характеризующимися большими объемами информации, и открытыми гибкими управленческими информационными системами. Благодаря наличию мощного и гибкого обработчика запросов пользователи имеют возможность осуществлять поиски любой степени сложности для выявления зависимостей и связей между физическими характеристиками, оперативными условиями и технологическими событиями.

Выбор технологий интеграции осуществляется с учётом конкретных задач, которые должна решать интегрированная система [69].

При этом основной задачей является решение проблемы интеграции разнородных АСУ действующего химического производства: АСУ ТП, автоматизированных рабочих мест (АРМ) основных специалистов производства и специально разработанной для конкретного технологического процесса системы аналитической поддержки принятия решений (СППР) технолога оператора с целью предотвращения аварийных ситуаций [108].

Чтобы система функционировала, необходимо обеспечить ввод технологических данных в реальном времени (параметров технологического процесса из АСУ ТП), результатов химического анализа из производственной лаборатории (уровень управления производством), а также передачу из системы соответствующих рекомендаций на мониторы операторов пульта управления технологическим процессом и главным специалистам производства.

Для выбора технологий интеграции СППР с АСУ ТП, а также с системами производственного уровня и уровня управления предприятием решены следующие задачи:

- выделены взаимосвязанные задачи управления, решаемые на различных уровнях;
- исследованы информационные потоки, обеспечивающие автоматизацию решения выделенных задач;
- определены способы формирования и доступа к базам данных различного формата.

В результате анализа различных вариантов интеграции разнородных систем [54, 138] в качестве наиболее целесообразной выбрана технология ОРС, предоставляющая стандарты для обмена технологическими данными с самыми широкими возможностями (рис. 4.4).

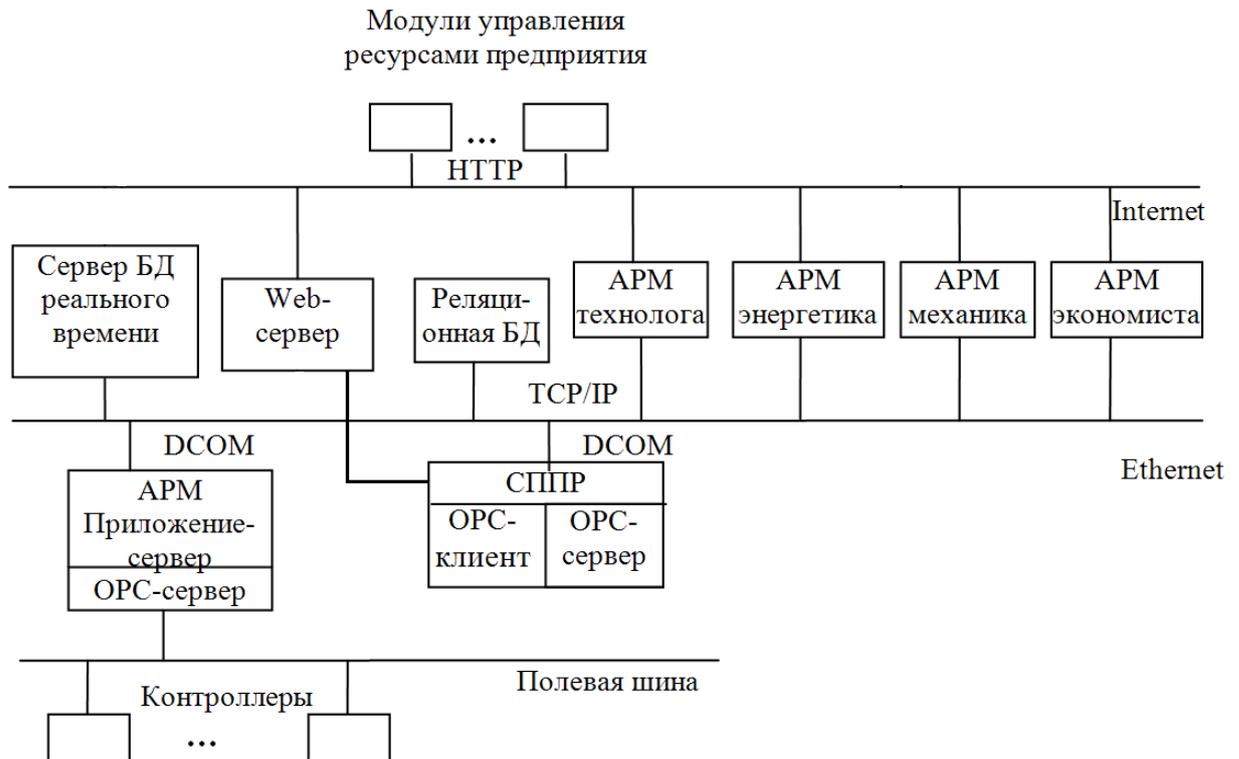


Рис. 4.4. Интеграция систем управления предприятия

Технология OPC позволяет совмещать и взаимозаменять средства автоматизации различных производителей. Различные программные средства объединяются для решения общих задач при помощи объектных технологий COM/DCOM, которые поддерживают распространённые сетевые протоколы: TCP/IP, и др.

Основная цель OPC-стандарта заключается в определении механизма доступа к данным с любого устройства системы управления. OPC позволяет производителям оборудования поставлять программные компоненты, которые стандартным способом обеспечат клиентов данными с контроллеров нижнего уровня.

Использование OPC-стандарта обеспечивает следующие преимущества:

- позволяет определять на объектном уровне различные системы контроля и управления, работающие в распределенной неоднородной среде;
- позволяет использовать различное нестандартное оборудование и соответствующие коммуникационные программные драйверы;

- предполагает большой выбор при разработке приложений.

Таким образом, задачу повышения эффективности производства, а также обеспечения нового качества управляемости можно достичь, лишь обладая всей достоверной оперативной информацией от всех объектов производства за счет создания единого информационного пространства предприятия.

Решение задач интеграции приводит к необходимости стандартизации разнородных продуктов и систем, используемых на предприятии, способствует их открытости и обеспечивает возможность простого взаимодействия между ними.

Наличие межсистемных стандартных протоколов позволяет создавать системы управления любой сложности вне зависимости от производителя программных и аппаратных средств [128].

Рассмотренные интеграционные решения позволили:

- обеспечить поступление в реальном времени технологической информации в СППР;
- на основании документированного интерфейса организовать обмен данными с разнородными системами уровня управления производственными процессами;
- обеспечить обмен информацией с системами верхнего уровня управления.

Рассмотренные способы интеграции позволяют объединять бизнес-информацию с технологической, открывают большие возможности для улучшения бизнес-деятельности, качества и производительности.

4.2.2.2. Реализации модели прогнозирования аварийной ситуации с помощью приложения Control Builder

Для контроля и управления технологическим процессом в исследуемом производстве аммиака действует АСУ ТП с архитектурой Experion PKS (Honeywell) (рис. 4.5).

Программное обеспечение системы Experion PKS охватывает различные стороны контроля, управления, диагностики, анализа, документирования и усовершенствованного управления и содержит ряд оригинальных алгоритмов, базирующихся на изучении конкретных свойств автоматизируемого объекта.

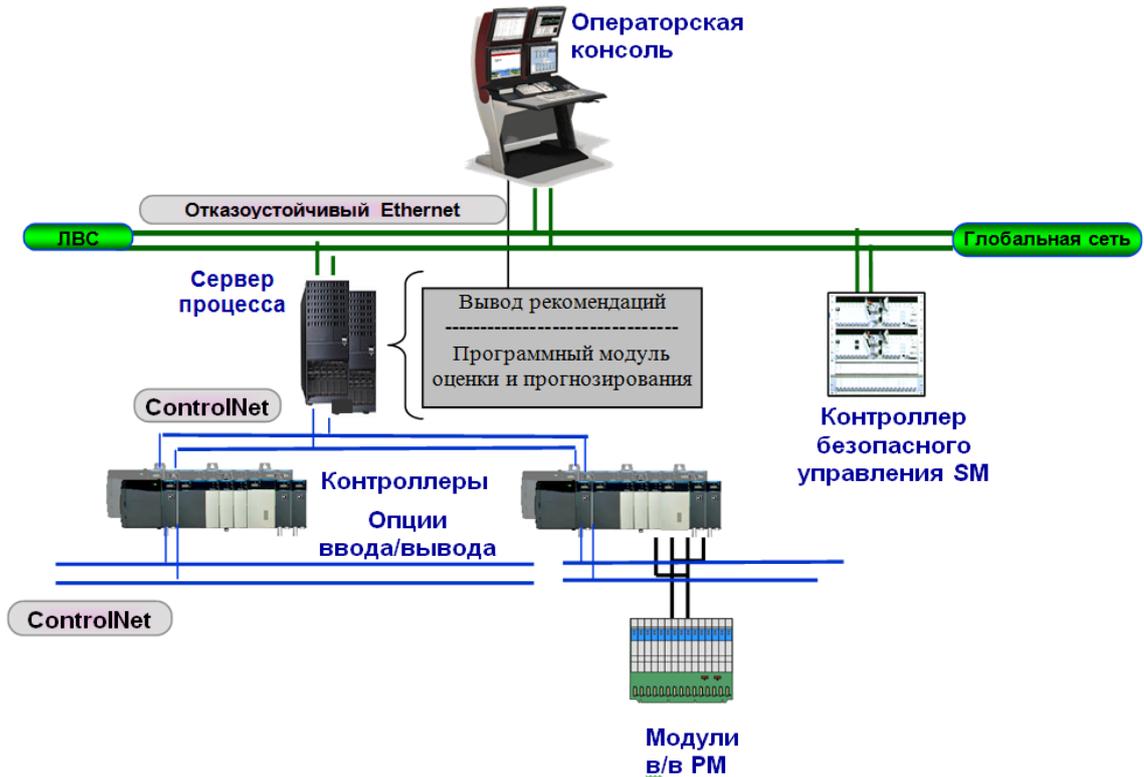


Рис. 4.5. Общая схема АСУ ТП с внедрённым модулем прогнозирования

Прикладные программы пользователя могут быть написаны на языках C/C++, Visual Basic, Visual C/C++ и реализовываться на сервере, рабочих станциях и в контроллерах.

Одним из приложений системы является Control Builder, представляющее, по сути, набор функциональных блоков - исполняемый программный объект, который выполняет конкретную задачу. Возможны два варианта внедрения системы прогнозирования аварийных ситуаций в общий контур системы автоматизированного управления:

- на основе дополнительного программно-технического комплекса, взаимодействующего с АСУ ТП на базе стандартов OPC;
- на основе реализации модели прогнозирования аварийных ситуаций с помощью приложения Control Builder.

Control Builder содержит библиотеки функциональных блоков, которые позволяют графическими средствами точно воспроизвести операции управления для процесса управления. С помощью построителя Control Builder производится проектирование, документирование и мониторинг работы алгоритмов контроля и управления. Он поддерживает иерархическое вложение одних программных модулей в другие; позволяет многократно копировать и использовать спроектированные модули.

Вспомогательные функциональные блоки предоставляют разнообразные конфигурируемые функции для приведения к нормальному виду, вычисления и компенсации данных для поддержки функций регуляторов. Путем конфигурирования соответствующих вспомогательных функциональных блоков могут быть выполнены различные функции, в числе которых представлена возможность создания алгоритма пользователя с помощью блока вспомогательных вычислений AUXCALC.

Блок AUXCALC вычисляет заданные пользователем выражения и условия для получения желаемого выхода и состояния для стратегии управления. Этот блок может принимать до шести входов и определяет их состояния на каждом цикле выполнения модуля управления. Он вычисляет до восьми выражений и определяет их состояния. Он получает значения для PV и состояния PV на основе выбранной конфигурации для параметров PVSRC данного блока.

На рисунке 4.6 показано как выглядит блок AUXCALC.

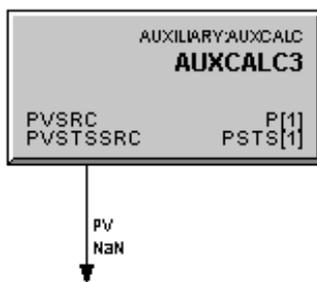


Рис. 4.6. Общий вид блока вспомогательных вычислений AUXCALC

Ниже приведен пример реализации разработанной модели средствами приложения Control Builder.

Сигнализация возможных проблем выводится на станцию управления процессом в виде строки в поле отображения технологических сигнализаций.

Алгоритм модуля прогнозирования составлен на основании нечеткой сети Петри. Функция прогнозирования реализована на основе двух блоков калькулятора, в которых происходит оценка процесса (рис. 4.7).

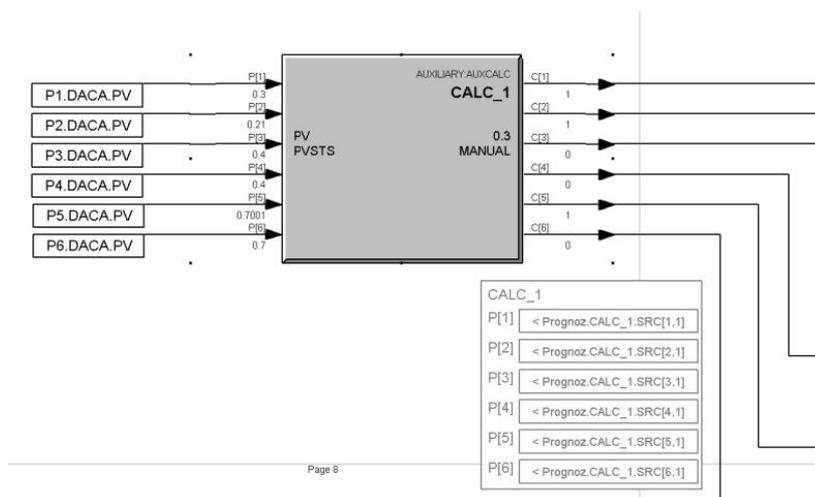


Рис. 4.7. Фрагмент реализации функции прогнозирования на основе блока калькулятора

На рис. 4.8 представлена реализация оценки процесса по входному параметру P1. Аналогично реализованы оценки процесса по всем входным параметрам.

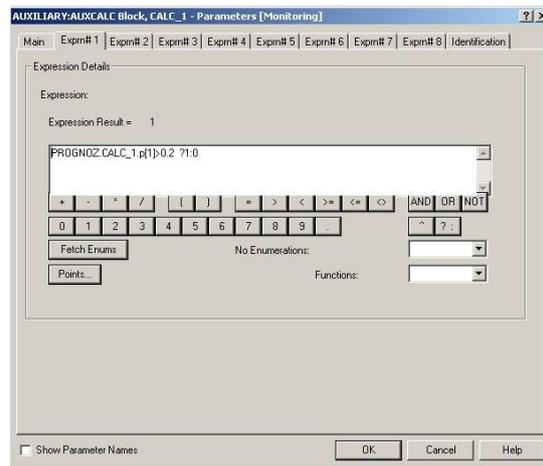


Рис. 4.8. Реализация оценки процесса по входному параметру P1

Результатом оценки является выходная переменная формата Float64, которая генерирует значение «0»-нормальный режим и «1»-процесс находится в предаварийном состоянии. Для дальнейшего логического синтеза сигнал проходит через блок Convert. Данный блок конвертирует значение из Float64 в Boolean. На рис. 4.9 показаны фрагменты реализации модели прогнозирования аварийной ситуации с помощью приложения Control Builder.

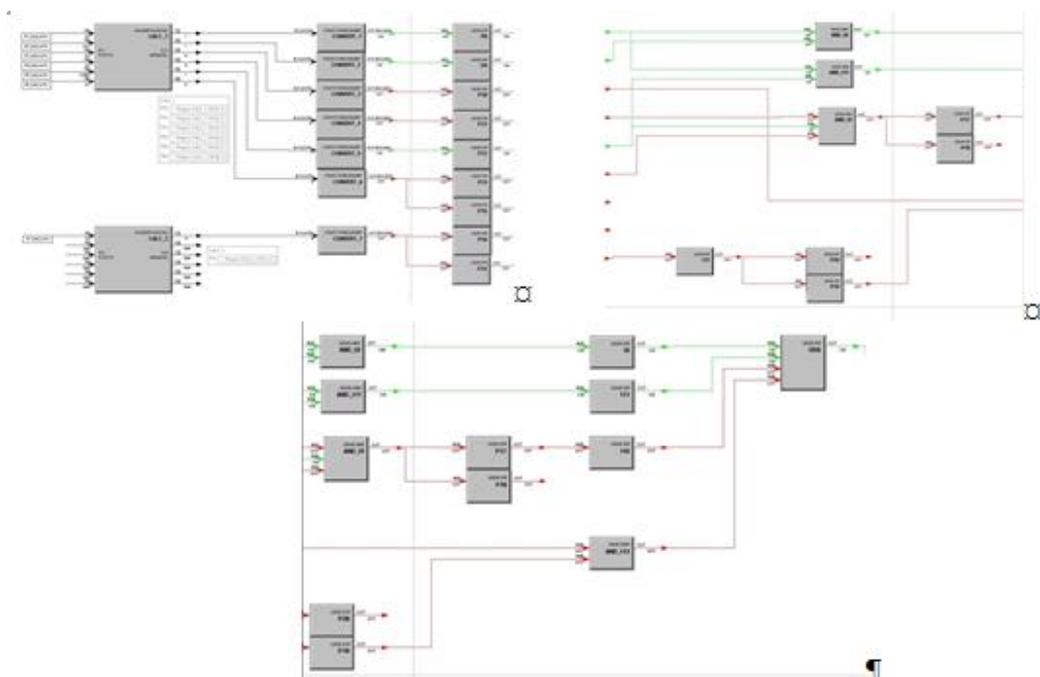


Рис. 4.9. Фрагменты реализации модуля прогнозирования аварийной ситуации с помощью приложения Control Builder

4.3. Компоненты настройки модуля прогнозирования

Моделирование сводится к генерации значений параметров технологического процесса, инициирующих аварийную ситуацию, и построению обобщенной схемы, в которой с одной стороны имитируется предаварийный режим техпроцесса, а с другой стороны - прогнозируется аварийный режим. Другими словами, имея набор разнородных данных (значения технологических параметров от датчиков) и параметры окружающей среды (температура, давление) необходимо спрогнозировать наступление неблагоприятного события (аварийной ситуации).

4.3.1. Моделирование предаварийной динамики технологических параметров

Для оценки выявленной опасности в динамике технологических параметров в работе разработаны настроечные модели на основе статистических методов. Одним из наиболее распространенных статистических методов, используемых при построении математических моделей процессов на основе опытных данных, является регрессионный анализ. Он позволяет не только построить такую модель, но и исследовать ее статистические свойства [2, 9, 24, 105, 160, 170].

Задача имитации предаварийной динамики и выхода значений технологических параметров за регламентные значения решена методом экстраполяции и формализована следующим образом [106].

Пусть имеются статистические данные по двум признакам T , X ; характеризующие некоторый процесс в n точках наблюдения

$$T = \{t_i\}; X = \{x_i\}; i = \overline{1, n}.$$

Требуется на заданном уровне значимости ($\alpha=0,05$) представить зависимость между признаками в форме многочлена:

$$x_i = a_0 + a_1 t_1 + a_2 t_2^2 + \dots + a_m t_m^m + \varepsilon_i$$

с наилучшим показателем адекватности и оценить качество прогноза, где:

- 1) все коэффициенты или параметры модели (a_0, a_1, \dots, a_m) – неизвестны;
- 2) отклонения от функциональной зависимости (ошибки ε_i) – случайные величины.

Критерий оптимальности находится методом наименьших квадратов:

$$Q(a_0, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \rightarrow \min . \quad (4.1)$$

В качестве примера далее рассмотрена одна из предаварийных ситуаций, вызывающая остановку аммиачного агрегата.

При остановке вентиляторов на вакуумной вытяжке турбокомпрессора 101-J из-за неисправности в электрических цепях типичной является следующая ситуация.

Вакуум (РА101), составляющий при нормальной работе -210 мм рт. ст., резко снижается с -210 до +50 (мм рт. ст.), при этом снижается производительность компрессора и как следствие, снижается расход технологического воздуха во вторичный риформинг (FCSA-3) с 53000 до 35000 (м³/час).

Модель строится на основании статистических данных, полученных в режимах аварийной остановки.

На основе экспериментальной выборки данных методом линейной регрессии исследуется зависимость $X_j(T)$ для каждого j -го технологического

параметра за границей нормального состояния системы (регламентного режима), где $T \in [T_{гр.}; T_{ост.}]$ (рис. 4.10).

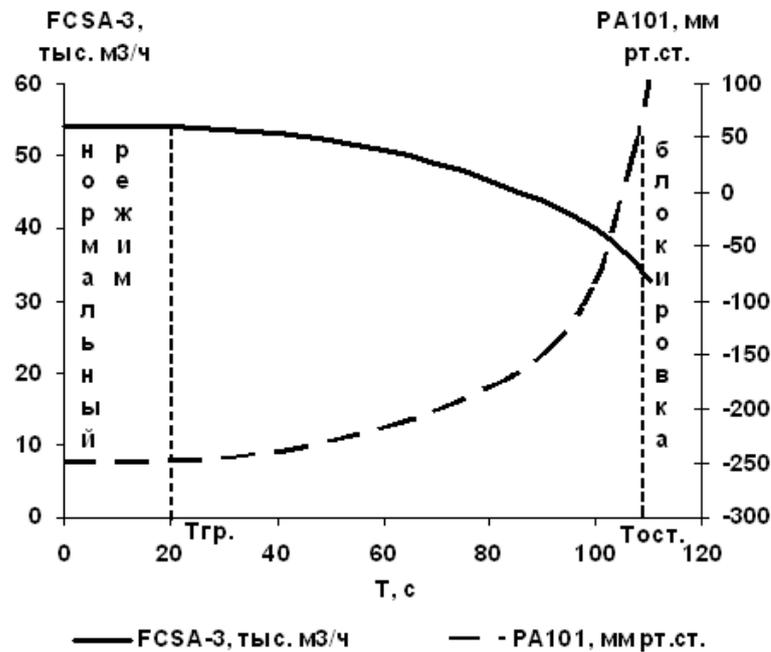


Рис. 4.10. Динамика двух технологических параметров системы в режиме аварийной остановки

Анализ динамики процесса при различных уровнях нагрузки (режим 1 – низкий уровень нагрузки, равной 47 тыс. м³/ч и режим 2 – высокий уровень нагрузки равной 54 тыс. м³/ч) выявил целесообразность нормирования значений признака X с учётом заданной нагрузки. На рисунке 4.11 видно существенное расхождение траекторий $x(t)$ в двух различных режимах.

Нормирование значений X значительно сокращает это расхождение на всём интервале прогнозирования. Как показано на рис. 4.12, ещё больший эффект достигается при нормировании значений двух признаков: X и T .

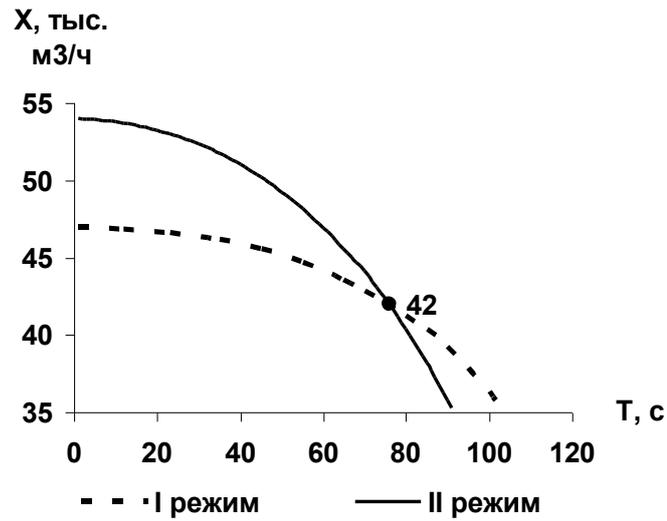


Рис. 4.11. Характер зависимости между признаками не нормированных значений

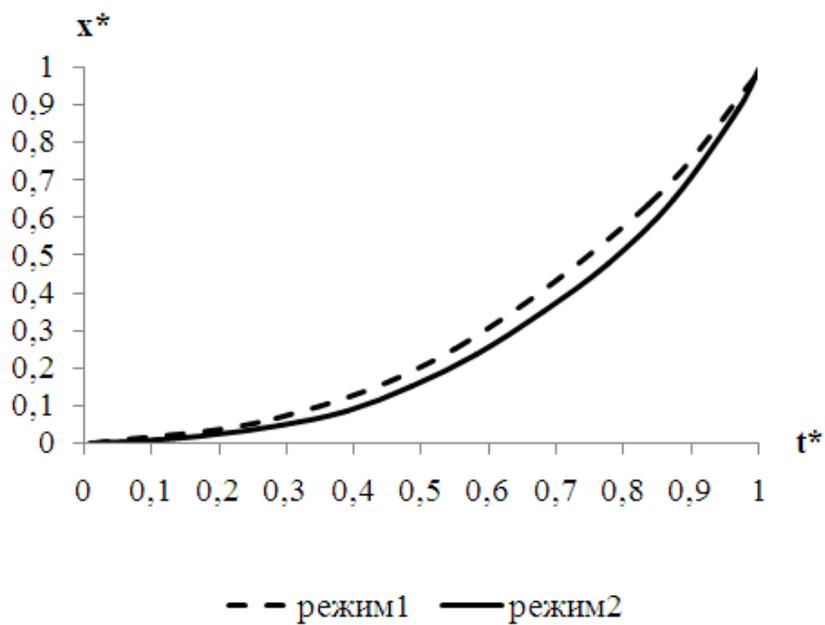


Рис. 4.12. Характер зависимости между признаками нормированных значений

Далее исследуется зависимость $x^*=f(t^*)$.

В качестве правила нормирования использована формула:

$$x_i^* = 1 - \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (4.2)$$

где x_{\min} – минимально допустимое технологическим регламентом значение параметра, равное 35 тыс. м³/ч, x_{\max} – максимальное значение X (заданная нагрузка), $x_i^* \in [0;1]$ – нормированное i -е значение X , x_i – i -е значение параметра.

$$t_i^* = \frac{t_i - t_{\text{гр.}}}{t_{\text{ост.}} - t_{\text{гр.}}}, \quad (4.3)$$

где t_i – i -е значение переменной t , $t_{\text{гр.}}$ – время последнего наблюдения перед выходом из нормального режима, $t_{\text{ост.}}$ – время остановки.

$t_i^* \in [0;1]$ – нормированное i -е значение переменной t .

Анализируя характер зависимости $x^*(t^*)$ при различных нагрузках, можно предположить что модель, построенная на основе аппроксимации более динамичной ситуации (режим 1) обеспечит надёжные прогнозы и для менее динамичной ситуации (режим 2).

Исходя из данного предположения, по исходным данным, соответствующим режиму 1, построены и проанализированы полиномиальные регрессионные модели различных порядков: первого – x_1 , второго – x_2 , третьего – x_3 . Параметры регрессионных моделей определены по методу наименьших квадратов (4.1) [88].

В качестве критерия адекватности прогнозной модели использован коэффициент детерминации (R^2), вычисляемый как отношение факторной дисперсии (D_{ϕ}) к общей дисперсии ($D_{\text{об}}$):

$$R^2 = \frac{D_{\text{ф}}}{D_{\text{об}}} \quad (4.4)$$

Результаты расчёта представлены в табл. 4.1. На рис. 4.11. отражены графические представления полученных моделей в сравнении с фактическими значениями.

Как видно из табл. 4.2, наилучший показатель адекватности соответствует модели x_3 , что наглядно подтверждается рис. 4.13, где:

$x_{\text{ф}}$ - фактические значения;

x_1 , x_2 , x_3 – прогнозы моделей, описываемых полиномами соответственно 1-го, 2-го и 3-го порядка.

Таблица 4.2

Результаты построения полиномиальных регрессионных моделей

Прогнозная модель	Адекватность прогнозной модели
$x_1 = 0,945t - 0,174$	$R^2 = 0,908$
$x_2 = 1,155t^2 - 0,223t + 0,024$	$R^2 = 0,998$
$x_3 = 0,543t^3 + 0,331t^2 + 0,112t - 0,005$	$R^2 = 0,999$

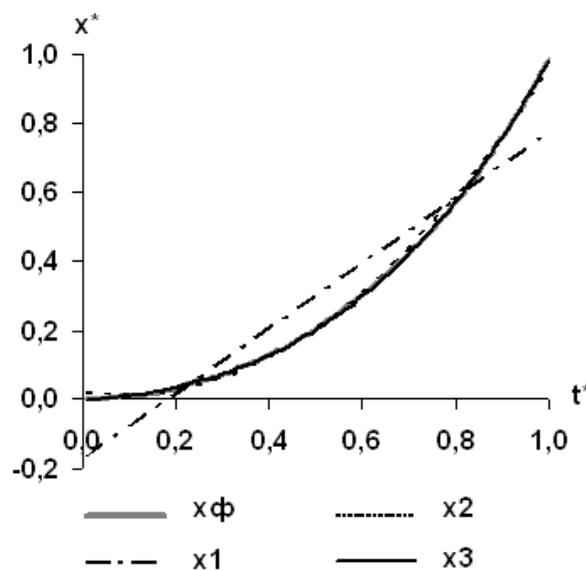


Рис. 4.13. Графики фактических и прогнозных значений

Поэтому, исходя из оценки адекватности модели, в качестве прогнозной выбрана полиномиальная регрессионная модель третьего порядка вида.

$$x^* = 0,543 t^{*3} + 0,331 t^{*2} + 0,112 t^* - 0,005 \quad (4.4)$$

Для оценки качества модели выбран показатель E - среднеквадратическая ошибка:

$$E = \frac{\sum (\varphi - \varphi_{\text{пр}})^2}{\sum \varphi_{\text{пр}}^2}, \quad (4.5)$$

где $\varphi - \varphi_{\text{пр}}$ - ошибка (e), степень соответствия величины, полученной в результате прогноза ($\varphi_{\text{пр}}$) и действительной величины (φ).

Оценка точности свидетельствует о наличии существенных отклонений моделируемой величины на участках I, III (рис. 4.12).

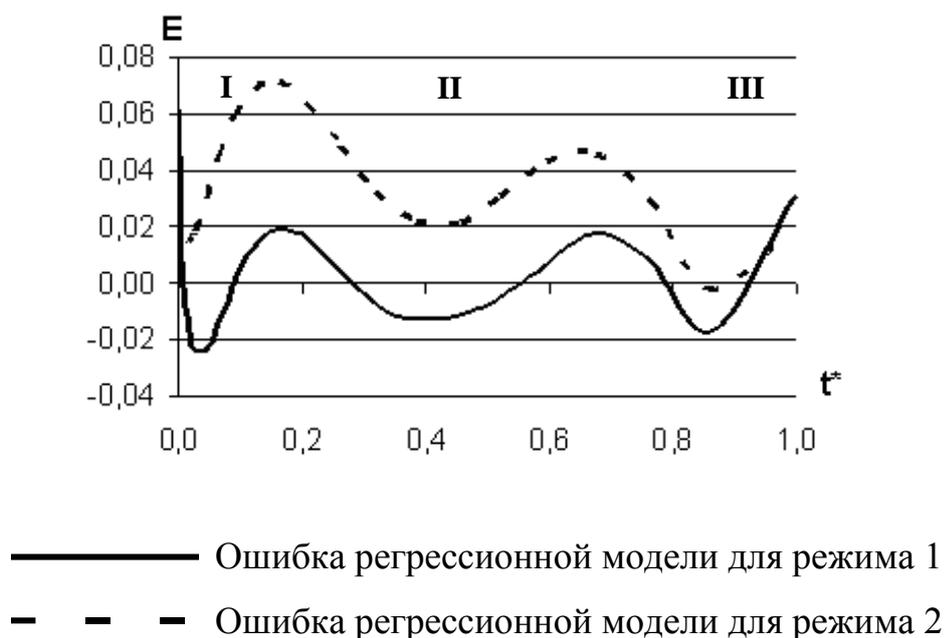


Рис. 4.14. График среднеквадратической ошибки прогноза

При анализе причин такого разброса, более глубоко изучена динамика зависимости $x^*(t^*)$, построены линейные тренды I-го (y_1), II-го (y_2) и III-го (y_3) участков:

$$y_1 = 0,181t^* - 0,005;$$

$$y_2 = 1,031t^* - 0,270;$$

$$y_3 = 2,269t^* - 1,285.$$

Очевидна существенная разница в скорости изменения показателя на участках. Для обеспечения оптимальной аппроксимации использован сплайн (построение полиномиальной сплайн-регрессионной модели, состоящей из трёх склеенных полиномов).

В общем случае сплайны представляют собой набор полиномов невысокой степени, последовательно применяемых к наборам точек аппроксимирующей функции [56, 164]. Чаще всего используется кубическая сплайновая аппроксимация, при которой коэффициенты полиномов выбираются из условий равенства в стыкуемых точках не только значений функции, но также первой и второй производных. Это придает графику сплайна вид плавной кривой, точно проходящей через узловые точки и напоминающей изгибы гибкой линейки [3]. Для построения сплайна, необходимо определить точки склеивания полиномов и их параметры.

Положение точки склеивания определено по графику точности прогнозирования (рис. 3.11) и в соответствии с таблицей конечных разностей второго порядка [12, 67]. Рассчитанные значения точек склеивания:

$$t_{\text{скл.1}}^* = 0,24;$$

$$t_{\text{скл.2}}^* = 0,84.$$

Параметры полиномов и их адекватность на выделенных участках ограниченными точками склеивания представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Параметры полиномов и их адекватность на выделенных участках

Параметры полиномов	Границы	Адекватность
$p1 = 0,036t^{*3} + 0,694 t^{*2} + 0,027 t^*$	$t^* \in [0; 0.24]$	$R^2 = 0,999$
$p2 = 0,571 t^{*3} + 0,242 t^{*2} + 0,180 t^* - 0,018$	$t^* \in [0.24; 0.84]$	$R^2 = 0,999$
$p3 = 1,331t^{*3} - 1,785 t^{*2} + 2,052 t^* - 0,611$	$t^* \in [0.84; 1]$	$R^2 = 1$

Таким образом, в качестве базовой модели для оценки технологических параметров выбран кубический сплайн.

К примеру, для оценки динамики показателя расхода технологического воздуха во вторичный риформинг (FCSA-3) построен кубический сплайн вида:

$$x^* = \begin{cases} = 0.036t^{*3} + 0.694 t^{*2} + 0.027 t^*, & \text{если } t^* < 0.2 \\ = 0.571t^{*3} + 0.242t^{*2} + 0.180 t^* - 0.018, & \text{если } t^* \in [0.2; 0.9] \\ = 1.331 t^{*3} - 1.785 t^{*2} + 2.052 t^* - 0.611, & \text{если } t^* > 0.9 \end{cases} \quad (4.6)$$

Среднеквадратическая ошибка модели (рис. 4.15), построенной на основе сплайна (4.6) - $E=0.002$, что характеризует её достаточно высокую надёжность (среднеквадратическая ошибка прогноза по полиномиальной модели (4.14) равнялась **0,003**).

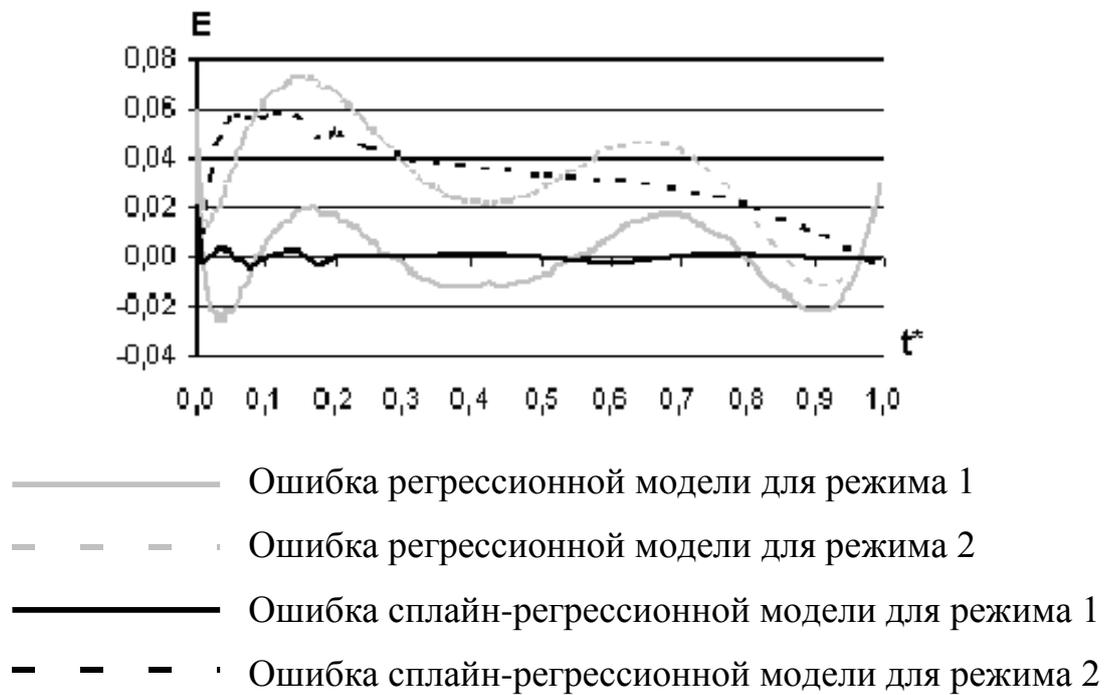


Рис. 4.15. Оценка полиномиальной сплайн-регрессионной модели

4.3.2. Краткое описание моделирующей среды

В качестве моделирующей среды выбрана программа Simulink, пакета Matlab. В этой схеме была использована технология сравнения значений технологических параметров с уставками.

Для реализации этой технологии были использованы блоки сравнения с константами Compare to constant, которые на основании поставленных условий по результатам сравнения удерживают на выходе или логическую «1», или логический «0». Сигналы из этих блоков через блоки логическое **И** и логическое **ИЛИ** передаются на цифровые дисплеи, наличие единичных сигналов на входе которых означает определенную рекомендацию, или сигнал аварийной остановки.

Общая схема работы модели в Matlab Simulink приведена на рис. 4.16.

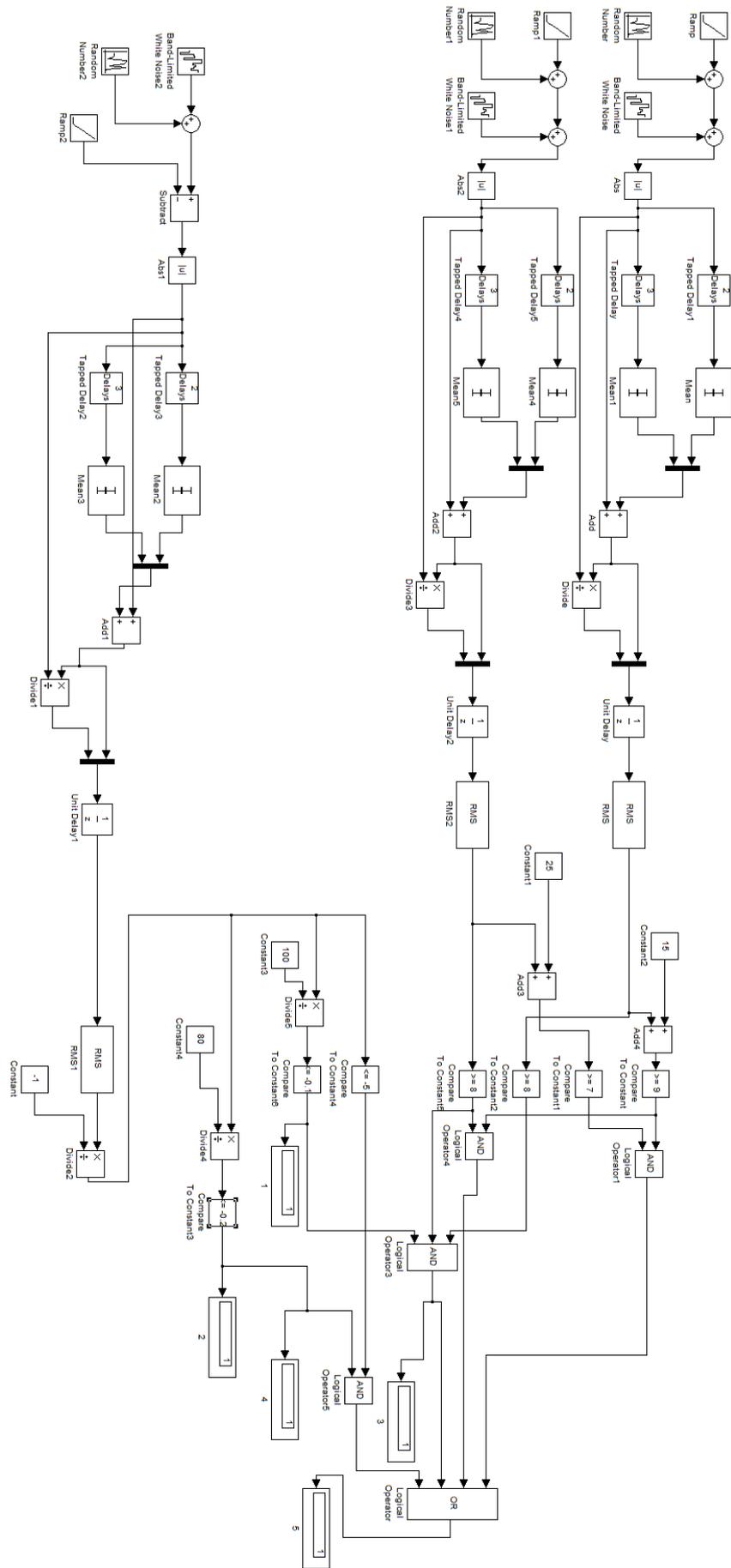


Рис. 4.16. Общая схема работы модели

Сигналы, которые подаются на блоки имеют следующее физическое содержание:

- сигналы на блоки сравнения с уставками, отвечают оценкам динамики технологических параметров (Раздел 2, рис. 2.2, табл. А.1);
- на блок Compare to constant отвечает оценке расхода воздуха FCSA3 во вторичный риформинг;
- на блок Compare to constant1 отвечает оценке температуры TSA 4 в лобовом слое катализатора вторичного риформинга;
- на блок Compare to constant2 отвечает оценке уровня нагрузки;
- на блок Compare to constant5 отвечает оценке температуры окружающей среды;
- на блок Compare to constant4 отвечает оценке давления на выходе из реакционных труб печи риформинга PCSA5;
- на блок Compare to constant6 отвечает оценке остаточного ресурса компрессора 101-J;
- на блок Compare to constant3 отвечает оценке остаточного ресурса реакционных труб печи риформинга;
- на входы цифровых дисплеев, отвечают рекомендациям и сообщению об аварийной остановке;
- на цифровой дисплей 1 отвечает рекомендации: износ компрессорного оборудования;
- на цифровой дисплей 3 отвечает рекомендации: возможная остановка компрессора 101-J;
- на цифровой дисплей 2 отвечает рекомендации: износ реакционных труб печи риформинга, проведите диагностику, следите за PCSA5;
- на цифровой дисплей 4 отвечает рекомендации: возможный пропуск на линии реакционных труб;
- на цифровой дисплей 5 отвечает сообщению об аварийной остановке.

Если несколько из параметров пересекают границу уставок, то на выходе схемы формируется сигнал предаварийной ситуации.

С помощью блока Score можно увидеть, что аварийную остановку вызвал выход за границы уставки затрат воздуха FCSA-3 во вторичный риформинг и температура окружающей среды. График сигнала, который передается к цифровому дисплею 5 изображено на рисунке 4.17.

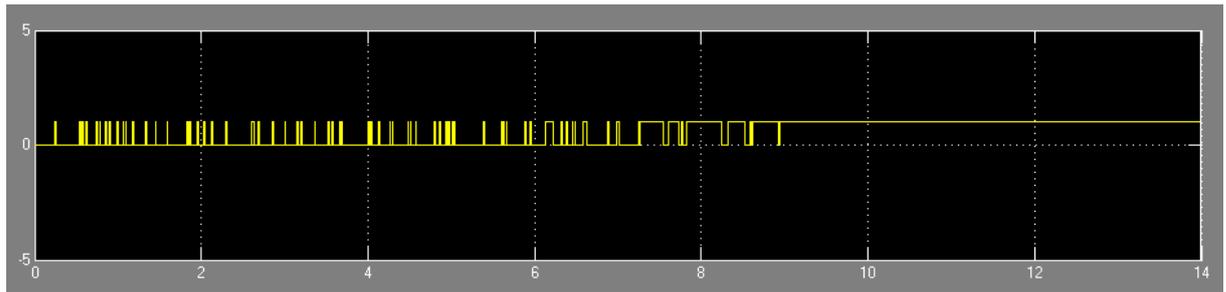


Рис. 4.17. График сигнала, формирующий сообщение о предаварийной ситуации

Проверка адекватности прогноза состояния технологического параметра осуществлялась с использованием формулы нахождения средней относительной ошибки аппроксимации, эта формула имеет вид:

$$\bar{\varepsilon}_{\text{отн}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right| \cdot 100\% \quad (4.7)$$

где y_t - фактическое значение, \hat{y}_t - расчетное значение, n - количество рассчитываемых значений. Схема формирования расчетных и фактических значений приведена на рис. 4.18.

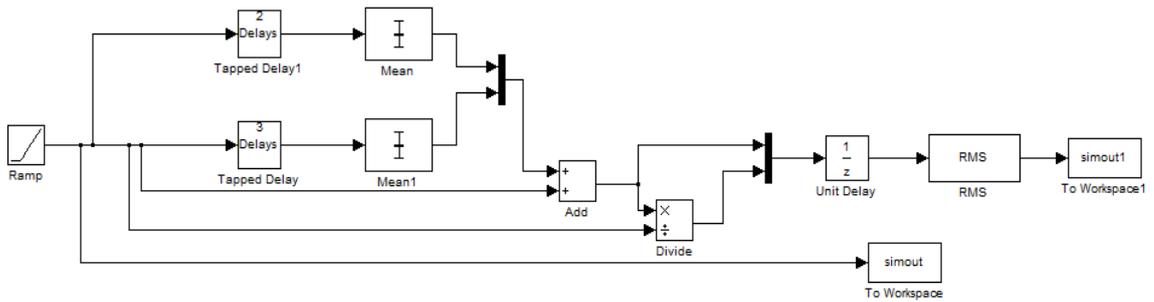


Рис. 4.18. Схема формирования фактических и расчетных значений

Полученные результаты по схеме, изображенной на рис. 4.18, а также промежуточные расчеты приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Средняя относительная ошибка аппроксимации

Фактическое значение y_t	Расчетное значение \hat{y}_t	Отклонение $(y_t - \hat{y}_t)$	Модуль отклонения / фактическое значение * 100%
2,000	1,972	0,028	1,378
3,000	3,136	-0,136	4,526
4,000	4,446	-0,446	11,142
5,000	5,804	-0,804	16,090
6,000	7,185	-1,185	19,744
7,000	8,576	-1,576	22,512
8,000	9,974	-1,974	24,669
9,000	11,375	-2,375	26,392
10,000	12,780	-2,780	27,797
11,000	14,186	-3,186	28,965
$\Sigma =$			183,214

Средняя относительная ошибка аппроксимации:

$$\bar{\varepsilon}_{\text{отн}} = 183,214/10 = 18,321 (\%).$$

Тогда выражение нахождения уровня адекватности модели:

$$100\% - 18,321\% = 81,679\%.$$

Т.о. можно сделать вывод о том, что эта модель адекватная на 81,679%, что является удовлетворительным результатом.

4.4. Оценка эффективности информационного обеспечения при использовании в контуре операторского управления автоматизированной системы прогнозирования

Эффективность экономических процессов характеризуется [64] системой показателей, отражающих соотношение их затрат и результатов. Эффективность процессов тем выше, чем выше результаты и ниже приложенные усилия.

До выполнения компьютерной разработки на основе данных технических предложений и прогноза использования рассчитывается предварительный экономический эффект, являющийся элементом технико-экономического обоснования разработки.

Фактический экономический эффект рассчитывается на основе данных учета и сопоставления затрат и результатов при конкретных применениях компьютерной системы.

Для оценки эффективности проводимых мероприятий установлены:

- факторы, действие которых обеспечивает эффективность (снижение числа аварийных остановок - снижение не запланированных издержек);
- направления действия этих факторов (на эффективность производства);
- показатели для количественного измерения степени влияния данных факторов (перерасход природного газа и недовыработка аммиака вследствие незапланированных остановок);

– методы расчета этих показателей.

Для определения экономической эффективности компьютерных систем на практике широко используются два подхода.

В соответствии первому подходу, вывод об экономической эффективности компьютерных информационных систем может быть сделан на основании сопоставления годовой экономии ($\mathcal{E}_{\text{год}}$) с капитальными затратами на приобретение и установку программно-технических средств (K) и текущими расходами на их эксплуатацию (C) с учётом нормативного коэффициента экономической эффективности ($E_H=0,32$), т.е.:

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_{\text{год}}}{C + E_H \cdot K} .$$

Значение, полученное в результате расчёта, должно превышать норматив E_H или быть равным E_H ($\mathcal{E} \geq E_H$), что позволяет утверждать экономическую целесообразность компьютерных информационных систем.

В тех случаях, когда реальное повышение эффективности процесса за счёт применения новых информационных технологий важнее, чем высчитанный с точностью до тысячных коэффициент, целесообразно применять другой метод. Согласно этому методу, эффективность компьютерных систем определяется эффектом, полученным от их применения и величиной расходов на их приобретение и эксплуатацию (совокупной стоимостью владения).

4.5. Оценка результативности внедрения автоматизированной системы прогнозирования аварийных ситуаций в производстве аммиака

Основная цель разработанной системы прогнозирования - за счёт комбинации математических и экспертных методов выявить и предупредить зарождение аварийной ситуации в действующем производстве аммиака, в

результате чего происходит снижение числа аварийных остановок всего агрегата, либо отдельных его блоков.

При этом, как отмечалось в Разделе 1, предупреждению подлежат лишь аварийные ситуации, вызванные постепенными отказами, локализация которых в основном зависит от человеческого фактора (знание технологии, профессиональные навыки и психологические особенности оператора).

Поэтому эффективность внедрения системы прогнозирования можно определить путём составления затрат на её создание и удержание из общей суммы убытков от аварийных остановок, которые могли бы быть предотвращены если бы оператор располагал прогнозом динамики процесса.

Целесообразность создания системы может быть доказана на примере конкретного производства аммиака.

Проведенный анализ возникновения и последствий аварийных остановок за период 1996-2012 г.г. выявил, что решающая роль в критических ситуациях до момента срабатывания блокировки отводится оператору, когда в результате грамотно проведенных операций возможно было вернуть процесс в нормальный режим и предотвратить аварийную остановку. На рисунке 4.19 показано соотношение количества аварийных остановок агрегата вследствие выделенных факторов:

- отказа оборудования (в т. ч. элементов КИП);
- ошибок персонала (человеческий фактор);
- прочие факторы (перебои в электроснабжении, др. внезапные отказы).



Рис. 4.19. Долевое соотношение количества аварийных остановок агрегата вследствие выделенных факторов

Уместно выделить долю аварийных остановок (30%), вызванных ошибочными действиями персонала (человеческий фактор), часть из которых (не своевременное распознавание опасных тенденций в динамике технологических параметров) можно было предотвратить, располагая достоверными оценками и прогнозами состояния процесса, а часть – с помощью тренинга операторов на основе специально разработанных моделей аварийных ситуаций.

Можно было бы частично предотвратить, ограничившись блокировкой отдельных элементов, и часть аварийных остановок, вызванных постепенным отказом оборудования.

Для обоснования эффективности разработанных средств оценки и прогнозирования технологического процесса по указанным группам остановок рассчитаны убытки: в среднем за 1 год значения частоты аварийных остановок, длительности простоев и убытков вследствие перерасхода природного газа и недовыработки аммиака (табл. 4.5).

Анализ убытков от аварийных остановок
(в среднем за год по данным периода 1996-2008)

Причины аварийных остановок	Количество остановок	Простой (час)	Перерасход пр. газа (м ³)	Недовыраб. аммиака (т)	Убытки (тыс. у.е.)
Отказ оборудования	4	743	3451	4042	3522
Ошибки персонала	2	431	1708	2185	1835
Внезапные отказы	2	382	1417	2033	1632
Всего	8	1556	6576	8260	6990

Убытки от аварийных остановок в производстве аммиака в среднем за 1 год составили:

- сумма по перерасходу природного газа составила 2860 тыс. у.е., из расчёта стоимости 1 м³ природного газа 435 у.е.;
- сумма по недовыработке аммиака 4130 тыс. у. е., из расчёта стоимости 1 т аммиака 500 у.е.).

Убытки от аварийных остановок, которые могли бы быть предотвращены, если бы оператор располагал прогнозом динамики процесса, в среднем за 1 год составили порядка 1835тыс. у. е., или 26 % от общей суммы убытков.

Тогда предварительный годовой экономический эффект можно выразить снижением убытков от аварийных остановок на 26 % за год, что составляет более 1,5 млн. у.е. При том, что затраты на внедрение дополнительных программно-технических средств составляют не более 10 тыс. у.е.

Для расчёта фактического экономического эффекта проведен анализ убытков от аварийных остановок за год эксплуатации СППР в производстве аммиака (табл. 4.6, 4.7).

Таблица 4.6

Анализ убытков от аварийных остановок за год эксплуатации СППР

Причины аварийных остановок	Количество остановок	Простой (час)	Перерасход пр. газа (м ³)	Недо-выраб. аммиака (т)	Убытки (тыс. у.е.)
Отказ оборудования	3	528	2341	2961	2498
Ошибки персонала	1	178	843	948	841
Внезапные отказы	2	384	1748	2145	1833
Всего	6	1090	4932	6054	5172

Таблица 4.7

Сравнительный анализ убытков от аварийных остановок за год до внедрения и после внедрения СППР

Причины аварийных остановок	Количество остановок в среднем за год		Простой в среднем за год (час)		Убытки в среднем за год (тыс. у.е.)	
	до внедрения	после внедрения	до внедрения	после внедрения	до внедрения	после внедрения
Отказ оборудования	4	3	743	528	3522	2498
Ошибки персонала	2	1	431	178	1835	841
Внезапные отказы	2	2	382	384	1632	1833
Всего	8	6	1556	1090	6990	5172

Убытки от аварийных остановок в производстве аммиак в среднем за 1 год эксплуатации СППР составили:

- сумма по перерасходу природного газа составила 2145 тыс. у.е.;
- сумма по недовыработке аммиака составила 3028 тыс. у. е.

Сокращение количества аварийных остановок производства аммиака за 1 год эксплуатации системы составило: 25% (рис. 4.20), сокращение длительности простоев цеха за счёт снижения трудоёмкости на поиск неисправности 30% (рис. 4.21), а сокращение убытков от аварийных остановок в производстве аммиака в среднем за 1 год составило около 2 млн. у.е. (рис. 4.22).

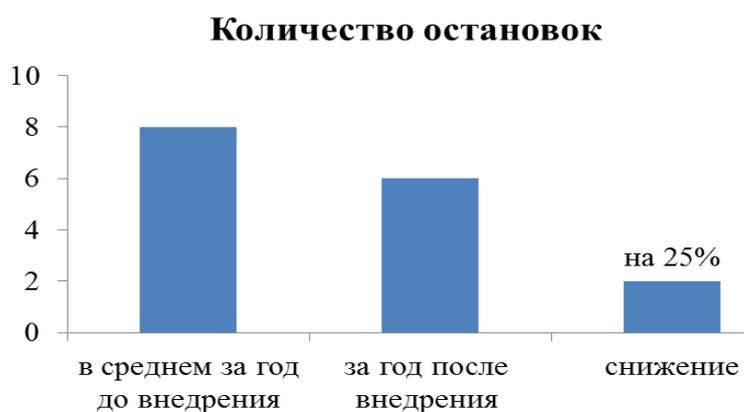


Рис. 4.20. Сокращение количества аварийных остановок производства аммиака за 1 год эксплуатации системы

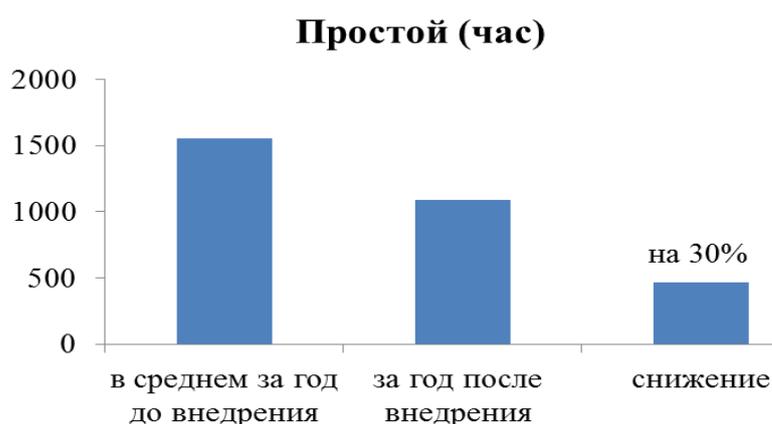


Рис. 4.21. Сокращение длительности простоев цеха

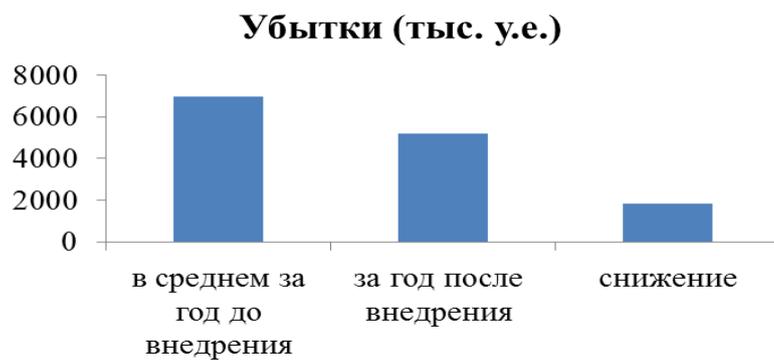


Рис. 4.22. Сокращение убытков от аварийных остановок в производстве аммиака в среднем за 1 год

Выводы к разделу 4

1. Разработана схема прогнозирующей модели, которая обеспечивает прием разнородных данных и комплексную оценку ситуации. Разработан механизм прогноза поведения технологических параметров, который прошел проверку адекватности. Адекватность модели составляет 81,679%, что в полной мере удовлетворяет поставленным требованиям по реализации прогноза.

2. Для оценки выявленной опасности разработаны настроечные модели в виде кубического сплайна. Использование полиномиальной сплайн-регрессионной модели позволяет учитывать значительные различия скорости изменения прогнозируемого показателя на начальном и конечном участках тренда. Для повышения эффективности прогнозирования рекомендована предварительная обработка данных: нормирование значений выбранных признаков.

3. Научные и практические результаты диссертации использованы при разработке специального программного модуля прогнозирования в составе АСУ ТП производства аммиака ЗАТ «Северодонецкое объединение «Азот» (Приложение В). При этом было достигнуто сокращение количества аварийных остановок производства аммиака на 25% за год, сокращение длительности простоев цеха за счёт снижения трудоёмкости на поиск неисправности до 30% за год.

4. Представленные методы моделирования аварийных ситуаций и модели опасной тенденции в динамике контролируемых технологических параметров, инициирующих аварийные ситуации в производстве аммиака, были использованы при разработке тренажерного комплекса для операторов-технологов аммиачного агрегата.

Основные научные результаты раздела опубликованы в работах [108, 138, 106, 117, 137, 147, 116]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача повышения сроков безаварийной работы крупнотоннажного химического производства и снижения убытков от аварийных остановок путем создания средств информационной поддержки оперативного персонала, работающих в контуре АСУ ТП в режиме реального времени на основе комплексной оценки негативных тенденций технологических параметров.

Для достижения этой важной научно-технической проблемы, в диссертации сформулированы и решены следующие задачи:

- 1) анализ существующих технологий прогнозирования аварийных ситуаций на химических производствах;
- 2) разработка методов и моделей в производстве аммиака;
- 3) разработка методов комплексной оценки негативной тенденции технологического процесса в условиях неопределённости влияния различных факторов на основе ситуационной модели;
- 4) синтез системы информационной поддержки оператора химического производства при управлении предаварийными режимами с использованием разработанных моделей и методов, практическая реализация системы в контуре АСУ ТП производства аммиака и оценка эффективности её внедрения.

При решении задач работы получены следующие результаты.

1. На основании проведенного анализа подходов к повышению безопасности химических производств установлено, что для обеспечения безаварийности технологического процесса, снижения себестоимости конечного продукта, сокращения вредных выбросов и отходов, необходимо оснащение действующей АСУ ТП информационно-аналитическими средствами поддержки принятия решений операторов в критических ситуациях. При этом в качестве одной из основных проблем выделена

возможность построения качественного прогноза возникновения аварийной ситуации для прогнозирования возможных нарушений технологического процесса и выработки управляющих воздействий в виде советов оператору.

2. Опираясь на результаты проведенного анализа, в качестве математического аппарата формализации задачи предложено комбинированное использование вероятностного и теоретико-множественного описаний системы с привлечением эвристических методов формирования исходных данных о моделируемом процессе.

3. Получены модели оценки динамических характеристик аммиачного производства на основе объединенного использования математического аппарата теории графов, нечетких множеств, моделей ситуационного управления.

4. Для реализации модели оценки и прогнозирования состояния технологического процесса предложено использование расширенных сетей Петри. Сформулированы алгоритм нечёткого срабатывания переходов сети и условия устойчивой активности перехода.

5. С целью обеспечения адекватности прогноза аварийной ситуации на производстве проведена формализация оценок путём сочетания различных критических и предаварийных производственных ситуаций.

6. Показано, что использование рекомендуемых методов моделирования и анализа позволит оценить влияние, оказываемое отдельными компонентами на работу системы, определить узкие места в структуре системы и ее надежность, получить перспективный прогноз развития при возникновении опасных технологических ситуаций. В такой схеме, при реализации различных аварийных ситуаций отличаться будут только внутренние параметры, связанные с условиями и временными задержками срабатывания переходов, что позволит проводить динамическое моделирование поведения технологического процесса в режиме реального времени и, тем самым, позволит повысить качество прогноза поведения

исследуемого крупнотоннажного химического производства в предаварийных ситуациях.

7. Предложено решение задачи раннего обнаружения опасной тенденции в динамике технологических параметров на основе методов анализа временного ряда.

8. Разработан метод раннего обнаружения опасной тенденций в динамике контролируемого технологического параметра, который обеспечивает требуемое время задержки обнаружения и минимальную частоту ложных тревог. На примере анализа предаварийной динамики временного ряда выделенных контролируемых технологических параметров производства аммиака проведена оценка работоспособности и эффективности предложенного метода.

9. Разработана схема прогнозирующей модели, которая обеспечивает прием разнородных данных и комплексную оценку ситуации. Механизм прогноза поведения технологических параметров прошел проверку адекватности, которая составила 81,679%, что в полной мере удовлетворяет поставленным требованиям по реализации прогноза.

10. Научные и практические результаты работы использованы при разработке специализированного программного модуля прогнозирования, включенного в состав АСУ ТП производства аммиака.

11. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение внедрено в ЗАТ «Северодонецкое объединение «Азот», что подтверждено соответствующими актами. При этом было достигнуто сокращение количества аварийных остановок производства аммиака на 25% за год, сокращение длительности простоев цеха за счёт снижения трудоёмкости на поиск неисправности до 30% за год.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абзалов А.В. Проблема идентификации предаварийных ситуаций аммиачной холодильной установки и подход к ее решению / А.В. Абзалов // Вестник АГТУ. – 2007. - № 2(37). – С. 152-155.
2. Айвазян С. А. Прикладная статистика : исследование зависимостей : справ. пособие / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1983. - 472 с.
3. Алберг Дж. Теория сплайнов и ее применения / Дж. Алберг, Э. Нильсон, Дж. Уолш. – М : Мир, 1972. - 318 с.
4. Алтунин А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях : монография / А. Е. Алтунин, М. В Семухин. – Тюмень : Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.
5. Аммиак. Вопросы технологии / Под ред. Н. А. Янковского. – Донецк : ГИК «Новая печать», ООО «Лебедь», 2001. – 497 с.
6. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон ; под ред. Ю. К. Беляева ; пер. с англ. И. Г. Журбенко, В. П. Носко. – М. : Мир, 1976. – 757 с.
7. Аносов О. Л. Восстановление динамических систем по хаотическим временным рядам / О. Л. Аносов, О. Я. Бутковский, Ю. А. Кравцов. // Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. – 2000. – т. 8, № 1. – С. 29-51.
8. Асаи К. Прикладные нечеткие системы : [пер. с японского] / К. Асаи, Т. Тэрано, М. Сугэно. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
9. Афанасьев В. Н. Анализ временных рядов и прогнозирование / В. Н. Афанасьев, М. М. Юзбашев. – М. : Инфра-М, 2010. – 320 с.
10. Бабешко Е. В. Возможности совместного использования современных методов анализа отказов систем важных для безопасности / Е. В. Бабешко, В. С. Харченко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 6(40). – С. 60-64.

11. Бассвиль М. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем. / Бассвиль М. [и др.]. – М. : Мир, 1989. – 278 с.
12. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М. : Физматлит, 2001. – 632 с.
13. Безручко Б. П. Математическое моделирование и хаотические временные ряды / Б. П. Безручко, Д. А. Смирнов. – Саратов : ГосУНЦ «Колледж», 2005. – 320 с.
14. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 44 с.
15. Белов П. Г. Автоматизированное прогнозирование риска каскадных техногенных происшествий / П. Г. Белов // Стратегия гражданской защиты : проблемы и исследования. – 2013. – № 1(4). – С.13-23.
16. Белов П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере / П. Г. Белов. – М. : Академия, 2003. – 512 с.
17. Богатилов В. Н. Построение дискретных моделей химико-технологических систем. Теория и практика / В. Н. Богатилов, Б. В. Палюх. – Апатиты : Изд. Кольского научного центра, 1995. – 164 с.
18. Бодянский Е. В. Интеллектуальная нейросетевая on-line технология обработки информации в автоматизированных системах принятия решений и управления : сб. науч. пр. / Е. В. Бодянский, Н. В. Рябова, В. В. Волкова // Вестник Сев. ГТУ. - Автоматизация процессов и управления. – Вып. 95. – 2009. – С. 20-23.
19. Бодянский Е. В. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем / Е. В. Бодянский, Е. И. Кучеренко, А. И. Михалев. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 311 с.
20. Бодянский Е. В. Диагностика и прогнозирование временных рядов с помощью многослойной радиально-базисной нейронной сети / Е. В. Бодянский, Е. И. Кучеренко, А. П. Чапланов // Труды VIII Всероссийской конференции «Нейрокомпьютеры и их применение». – М. : Век книги, 2002. – С. 209-213.

21. Бодянский Е. В. Гибридные нейро-фаззи модели и мультиагентные технологии в сложных системах : монография / Е. В. Бодянский, В. Е. Кучеренко, Е. И. Кучеренко и др. – Д. : Систем. технологии, 2008. – 403 с.
22. Бокс Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Мир, 1974. – 406 с.
23. Большев Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.
24. Бочаров П. П. Теория вероятностей и математическая статистика / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. – М. : Гардарика, 1998. – 328 с.
25. Букреев В. Г. Выявление закономерностей во временных рядах в задачах распознавания состояний динамических объектов: монография / В. Г. Букреев, С. И. Колесникова, А. Е. Янковская; Томский политехнический университет. – 2-е изд., испр. и дополн. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 254 с.
26. Вальд А. Последовательный анализ / А. Вальд ; пер. с англ. П. А. Бакута [и др.] ; под ред. Б. А. Севостьянова. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. – 326 с.
27. Гаврилова Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский - СПб. : Питер. – 2001. – 384 с.
28. Гартман Т. Н. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов : учеб пособие / Т. Н. Гартман, Д. В. Клушин. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2006. – 416 с.
29. Голяндина Н. Э. Метод «Гусеница-SSA» : Прогноз временных рядов: учеб. пособие / Н. Э. Голяндина. – СПб. : Изд-во СПб. ун-та, 2004. – 56 с.
30. Горский В. Г. Анализ аварийного риска и обеспечение безопасности химически опасных объектов / В. Г. Горский [и др.] // Химическая промышленность. – 2002. – № 4. – С. 1-14.
31. ГОСТ 24.104-85. Автоматизированные системы управления. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1986. 20 с.

32. ГОСТ 27.310-95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
33. Гребенюк Е.А. Методы оперативного определения не измеряемых поточными приборами качественных показателей химико-технологических процессов / Е. А. Гребенюк, Э. Л. Ицкович // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 6. – С. 5-13.
34. Григорьев С. Г. STATGRAPHICS на персональном компьютере / С. Г. Григорьев, В. В. Левандовский, А. М. Перфилов. – СПб., 1992. – 200 с.
35. Давние В. В. Прогнозные модели экспертных предпочтений : монография / В. В. Давние, В. И. Тинякова; Воронеж. гос. ун-т. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005. – 248 с.
36. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион ; пер. с англ. под ред. Э. К. Лецкого. – М. : Мир, 1980. – 610 с.
37. Дилигенский Н. В. Нечёткое моделирование и многократная оптимизация производственных систем в условиях неопределённости : технология, экономика, экология / Н. В. Дилигенский, Л. Г. Дымова, Р. В. Севастьянов. – М. : Машиностроение, 2004. – 397 с.
38. Дородницын А. А. Проблема математического моделирования в описательных науках / А. А. Дородницын. // Кибернетика. – 1983. – № 4. – С. 6-10.
39. Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. Интеллектуальные системы и инженерное творчество в задачах интенсификации химико-технологических процессов и производств / И. Н. Дорохов, В. В. Меньшиков. – М. : Наука, 2005. – 583 с.
40. Дранишников Л. В. Анализ техногенного риска резервированием / Л. В. Дранишников, В. Ф. Стоецкий // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. – 2013. – Вип. 3. – С. 165-172.

41. Дюбуа Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний и информатике : [пер. с фр.] / Д. Дюбуа, А. Прад. – М. : Радио и связь, 1990. – 288 с.
42. Дюк В. Обработка данных на ПК в примерах / В. Дюк. – СПб. : Питер, 1997. – 240 с.
43. Егоров А. Ф. Методы и модели анализа риска и управления безопасностью химических производств / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая // Теоретические основы химической технологии. – 2010. – Т. 44, № 3. – С. 341-353.
44. Егоров А. Ф. Управление безопасностью химических производств на основе новых информационных технологий / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая. – М. : КолосС, 2004. – 416 с.
45. Егоров А. Ф. Логическое моделирование в условиях неопределенности на базе интервальных нечетких сетей Петри / А. Ф. Егоров, А. Н. Шайкин // Известия РАН, Теория и системы управления. – 2002. – № 2. – С.136-141.
46. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 166 с.
47. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки», прийнятий Верховною Радою України 18.01.01 № 2245-III.
48. Згуровский М. З. Модели и методы принятия решений в нечетких условиях / М. З. Згуровский, Ю. П. Зайченко – К. : Наукова думка, 2011. – 275 с.
49. Згуровский М. З. Принятие решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами : монография / М. З. Згуровский, А. А. Павлов. – К. : Наукова думка, – 2010. – 573 с.
50. Ивахненко А. Г. Предсказание случайных процессов / А. Г. Ивахненко, В. Г. Лапа. – К. : Наукова думка, 1971. – 416 с.
51. Исследовательский программный комплекс моделирования аварий и оценки риска «РизЭкс - 2» [Электронный ресурс] / Научный центр изучения

рисков. – Режим доступа: [www. URL: http://rizikon.ua/pages/?id=130](http://rizikon.ua/pages/?id=130) – 14.01.2016 г.

52. Ицкович Э. Л. Методология построения MES-систем химико-технологического производства непрерывного типа / Э. Л. Ицкович // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2009. - № 12. – С. 1-11.

53. Ицкович Э. Л. Оперативное управление непрерывным производством: задачи, модели, методы / Э. Л. Ицкович, Л. Р. Соркин. – М. : Наука, 1988. – 160 с.

54. Ицкович Э. Л. Рациональная последовательность модернизации существующих систем автоматизации производства / Э. Л. Ицкович // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 1. – С. 11-13.

55. Каргин А. А. Введение в интеллектуальные машины. Книга 1. Интеллектуальные регуляторы / А. А. Каргин. – Донецк : Норд-Пресс, Дон. Н, 2010. – 526 с.

56. Карл де Бор Практическое руководство по сплайнам / Карл де Бор. – М. : Радио и связь, 1985. – 303 с.

57. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1985. – 448 с.

58. Кафаров В. В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем / В. В. Кафаров, В. Л. Перов, В. П. Мешалкин. – М. : Химия, 1974. – 344 с.

59. Кафаров В. В. Принципы разработки интеллектуальных систем в химической технологии / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин // Доклады АН СССР. – 1989. – Т. 306, № 2. – С. 409-413.

60. Кац М. Д. Повышение эффективности использования производственных ресурсов на основе новой методологии исследования технологических процессов / М. Д. Кац, А. Е. Буфалова, Л. А. Шумова // Вісник Східноукраїнського державного університету. – 1999. – № 5 (20). – С. 177-179.

61. Кендалл М. Дж. Временные ряды : [пер. с англ.] / М. Дж. Кендалл. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 199 с.
62. Клименкова Л. А. Основы интеллектуального управления химико-технологическими системами : учеб. пособие / Л. А. Клименкова, В. П. Мешалкин; НИ РХТУ им. Д. И. Менделеева. – Новомосковск, 2001. – 95 с.
63. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь – М. : Физматлит, 2006. – 816 с.
64. Козырев А. А. Информационные технологии в экономике и управлении : учебник / А. А. Козырев. – СПб. : Изд-во Михайлова В. А., 2003. – 495 с.
65. Котов В. Е. Сети Петри / В. Е. Котов. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 160 с.
66. Кофман А. Введение в теорию нечётких множеств / А. Кофман. – М. : Радио и связь, 1982. – 432 с.
67. Краскевич В. Е. Численные методы в инженерных исследованиях / В. Е. Краскевич, К. Х. Зеленский, В. И. Гречко – К. : Вища школа. Головное изд-во, 1986. – 263 с.
68. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределённости: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В. М. Кунцевич. – К. : Наукова думка, 2006. – 264 с.
69. Куцевич Н. А. Инструментарий для интеграции разнородных подсистем / Н. А. Куцевич // Мир Компьютерной Автоматизации. – М. : ЗАО РТСофт, 2001.– № 1. – С. 37-41.
70. Лебедев А. В. Индикатор оптимальной длины сканирования нестационарного временного ряда [Электронный ресурс] / А. В. Лебедев, Ю. Н. Орлов, Д. О. Шагов // Режим доступа [www. URL: http://www.keldysh.ru/papers/2013/prep2013_17.pdf](http://www.keldysh.ru/papers/2013/prep2013_17.pdf) - 28.10.2013 г.
71. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 719 с.

72. Лескин А. А. Сети Петри в моделировании и управлении / А. А. Лескин, П. А. Мальцев, А. М. Спиридонов. – Л. : Наука, 1989. – 133с.
73. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / Ю. П. Лукашин. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
74. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – М. : Наука, 1991. – 432 с.
75. Маршалл В. Основные опасности химических производств : [пер. с англ.] / В. Маршалл. – М.: Химия, 1992. – 489 с.
76. Мелихов А. Н. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой / А. Н. Мелихов, Л. С. Берштейн, С. Я. Коровин. – М. : Наука, 1990. – 288 с.
77. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки: Затв. Наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 04.12.2002 № 637.
78. Методика прогнозирования чрезвычайных ситуаций, вредных и нежелательных явлений / В. Л. Злотин, А. В. Зусман. – Кишинёв : Межотраслевой НТЦ «Прогресс», 1991.
79. Мешалкин В. П. Химическое предприятие как объект ситуационного управления / В. П. Мешалкин, Л. А. Клименкова // Российское предпринимательство. – 2002. – № 7 (31). – С. 65-69.
80. Мешалкин В. П. Экспертные системы в химической технологии / В. П. Мешалкин. – М. : Химия, 1995. – 368 с.
81. Минашкин В. Г. Бизнес-статистика и прогнозирование / В. Г. Минашкин, Н. А. Садовникова, Р. А. Шмойлова ; Московский государственный университет экономики, статистики и информатики. – М., 2008. – 154 с.
82. Минскер И. Н. Методы анализа АСУ химико-технологическими процессами / И. Н. Минскер, Э. Л. Ицкович. – М. : Химия, 1990. – 120 с.

83. Мишулина О. А. Статистический анализ и обработка временных рядов / О. А. Мишулина. – М. : МИФИ, 2004. – С. 180.
84. Можаяев А. С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001) / А. С. Можаяев // Труды Международной Научной Школы «Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах». – СПб. : Изд-во ООО "НПО "Омега"", 2001. – С. 56-61.
85. Муромцев Д.Ю. Информационная система энергосберегающего управления сложными объектами / Д.Ю. Муромцев // Информационно-управляющие системы. – 2005. – №5. – С. 2-5.
86. Мусаев А. А. Интеграция автоматизированных систем управления крупных промышленных предприятий: принципы, проблемы, решения / А. А. Мусаев, Ю. М. Шерстюк // Автоматизация в промышленности. М. : 2003. – №10. – С. 40-45.
87. Никифоров И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов / И. В. Никифоров. – М. : Наука, 1983. – 199 с.
88. Норман Р. Дрейпер Прикладной регрессионный анализ // Норман Р. Дрейпер, Гарри Смит. – Москва, Санкт-Петербург, Киев, 2007. – 911с.
89. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем : пер. с англ. / М. Бассвиль, А. Вилски, А. Банвенист и др.; ред.: М. Бассвиль, И. Б. Вильховченко. – Москва : Мир, 1989. – 278 с.
90. Орлов А. И. Методы поиска наиболее информационного множества признаков в регрессионном анализе / А. И. Орлов // Заводская лаборатория. – 1995. – № 1. – С. 56-58.
91. Орлов А. И. Теория принятия решений. Учебник для вузов / А. И. Орлов. – М. : Экзамен, 2006. – 576 с.
92. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – М. : Наука, 1981. – 208 с.

93. Острейковский В. А. Прогнозирование техногенного риска методами теории катастроф / В. А. Острейковский, С. П. Саакян, Я. В. Силин // *Фундаментальные исследования*. – 2012. № 3-2. – С. 399-402.
94. Отнес Р. Прикладной анализ временных рядов / Р. Отнес, Л. Эноксон. – М. : Мир, 1982. – 428 с.
95. Палюх Б. В. Основы построения и разработки автоматизированной системы управления эксплуатационной надежностью химических производств: дис. ... доктора техн. наук : 05.13.06 / Палюх Борис Васильевич. – М., 1991. – 360 с.
96. Палюх Б. В. Приложение метода разделения состояний для управления технологической безопасностью промышленных процессов на основе нечетко определенных моделей : монография / Б. В. Палюх [и др.]. – Тверь : ТГТУ, 2009. – 368 с.
97. Панарин В. М. Использование экспертной системы для исследования закономерностей развития чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах / В. М. Панарин, В. Г. Павпертов, А. А. Зуйкова, Т. А. Короткова. // *Вестник БГТУ*. – 2004. – № 8. – С. 53-55.
98. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон. – М. : Мир, 1984. – 264 с.
99. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления / Д. А. Поспелов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 232 с.
100. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. – М. : Наука, 1986. – 288 с.
101. Рыков А.С. Системный анализ: Модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации / А. С. Рыков.- М.: МИСиС, 2009. – 608 с.
102. Рязанцев О. І. Дослідження критеріїв оптимальності при прогнозуванні аварійних ситуацій на хімічному виробництві / О. І. Рязанцев, І. С. Скарга-Бандурова, Л. О. Шумова // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. – 2009. – № 6 (136). – С. 271-274.

103. Рязанцев А.И. Информационные технологии обеспечения экологической и техногенной безопасности промышленного региона (Лисичанск, Рубежное, Северодонецк): дис. ... докт. тех. наук : 05.13.06 / А. И. Рязанцев; ХНТУ – Херсон, 2012. – 310 с.
104. Рязанцев А. И. Математические модели прогнозирования опасных технологических ситуаций / А. И. Рязанцев, Л. А. Шумова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2007. – № 5 (111), ч. 2. – С. 79-83.
105. Рязанцев А. И. Моделирование безаварийных режимов в системах управления технологическими процессами / А. И. Рязанцев, Л. А. Шумова // Тези доповідей Першої міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні системи в промисловості і освіті - 2007», 7-9 листопада 2007 р. – Суми, 2007. – С. 144-145.
106. Рязанцев А. И. Модель оценки опасности состояния химического производства с использованием методов регрессии / А. И. Рязанцев, А. Л. Бродский, Л. А. Шумова // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2008. – № 1 (30). – С. 30-34.
107. Рязанцев А. И. Сети Петри как топологические модели анализа технологических ситуаций / А. И. Рязанцев, И. С. Скарга-Бандурова, Л. А. Шумова // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво / Луцький національний технічний університет. – 2011. – № 6. – С. 211-215.
108. Рязанцев А. И. Система поддержки принятия решений при управлении технологическим процессом в предаварийных ситуациях / А. И. Рязанцев, И. С. Скарга-Бандурова, Л. А. Шумова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2010. – № 9 (151), ч. 1. – С. 189-193.
109. Рязанцев А. И. Система прогнозирования аварийных ситуаций крупнотоннажного химического производства / А. И. Рязанцев, И. С. Скарга-Бандурова, Л. А. Шумова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2009. – № 2 (132), ч. 2. – С. 55-60.

110. Савицкая Т. В. Системный анализ и управление безопасностью химических производств с использованием новых информационных технологий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01 / Т. В. Савицкая. – М., 2004. – 37 с.
111. Савицкая Т. В. Управление безопасностью химических производств на основе новых информационных технологий / Т. В. Савицкая, А. Ф. Егоров. – М. : Химия, КолосС. – 2004. – 416 с.
112. Садовникова Н. А. Анализ временных рядов и прогнозирование : вып. 5 : [учебно-методический комплекс] / Н. А. Садовникова, Р. А. Шмойлова. – М.: Изд. центр ЕАОИ, 2011. – 260 с.
113. Скарга-Бандурова І. С. Автоматизація методів розрахунку залишкового ресурсу об'єктів підвищеної небезпеки / І. С. Скарга-Бандурова, Л. О. Шумова, Г. В. Харитоновна // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2011. – № 7 (161), ч. 1. – С. 235-240.
114. Скарга-Бандурова І. С. Автоматизированная система повышения безопасности функционирования экологически опасных химических производств (на примере производства формалина) : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.06 / И. С. Скарга-Бандурова. – Донецк, 2006. – 157 с.
115. Скарга-Бандурова І. С. Модели, методы и информационные технологии поддержки принятия решений в области природоохранной деятельности промышленных комплексов: дис. ... д-ра. техн. наук : 05.13.06 / И. С. Скарга-Бандурова; ХНТУ. – Херсон, 2015. – 422 с.
116. Скарга-Бандурова І. С. Модели повышения качества безаварийного управления крупнотоннажным химическим производством / И. С. Скарга-Бандурова, Л. А. Шумова // Проблеми інформаційних технологій. – 2016. – № 1(19). – С. 18-30.
117. Скарга-Бандурова І. С. Разработка компьютерных обучающих комплексов с целью повышения надёжности управления опасными химическими производствами / И. С. Скарга-Бандурова, Л. А. Шумова, А. И. Рязанцев // I Всеукраїнська науково-методична конференція «Розвиток науки

- та освіти в регіональних освітніх закладах в контексті Болонського процесу», 18-19 жовтня 2007 р. : матеріали конф. – Северодонецьк, 2007. – С. 33-34.
118. Солдатов А. Н. Экономический аспект в оценке современного экологического состояния химических регионов / А. Н. Солдатов, Л. А. Шумова // Вісник Східноукраїнського державного університету. – 2000. – № 4 (26). – С. 313-315.
119. Сочнев А. Н. Алгоритм управляемой имитации сети Петри / А. Н. Сочнев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия : Техника и технологии. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 356-368.
120. Статюха Г. А. Автоматизированное проектирование химико-технологических систем / Г. А. Статюха. - К. : Вища шк., 1989. - 400 с.
121. Статюха Г. О. Інтелектуальні системи прийняття рішень при дослідженні та проектуванні хіміко-технологічних процесів / Г. О. Статюха, Ю. О. Безносик, Л. М. Бугаєва. – К. : Політехніка, 2004. – 416 с.
122. Стоянов В. В. Вероятностный подход к оценке риска возникновения аварий на химических объектах / В. В. Стоянов // Строительство и техногенная безопасность. – Вып. 51. – 2014. – С. 84-91.
123. Суконщиков А. А. Системы поддержки принятия решений на базе аппарата сетей Петри / А.А. Суконщиков, Д.Ю. Крюкова // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2008. – № 3. С. 45-49.
124. Технологический регламент цеха аммиака 1-Б реестр №114 Утверждён 02.12.2000 г.
125. Тюрин Ю. Н. Анализ данных на компьютере / Ю. Н. Тюрин, А.А. Макаров. – М. : ИНФА-М, 2003. – 544 с.
126. Управление техногенной безопасностью объектов промышленной опасности./ В. Ф. Стоецкий, Л. В. Драшников В. М. Жартовский и др. – Тернополь. Издательство Астон, 2006. – 424с.
127. Федоров Ю. Н. Справочник инженера по АСУ ТП : проектирование и разработка : учеб.-практ. пособие [Электронный ресурс] / Ю. Н. Федоров. –

Изд-во : Инфра-Инженерия, 2008. - 928 с. – Режим доступа – [www. URL: http://galaxy797.net/spr/asutp.pdf](http://www.URL: http://galaxy797.net/spr/asutp.pdf) – 21.10.2013 г.

128. Харченко В. С. Гарантоспособность и гарантоспособные системы: элементы методологии / В.С. Харченко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 5. – С. 7-19.

129. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото; пер. с англ. В. С. Сыромятникова, Г. С. Деминой; под общ. ред. В. С. Сыромятникова. М. : Машиностроение, 1984. – 528 с.

130. Хеннан Э. Многомерные временные ряды / Э. Хеннан. – М. : Мир, 1974. – 576 с.

131. Химическая и биологическая безопасность : модели, методы и интеллектуальные системы управления безопасностью : учеб. Пособие / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, П. Г. Михайлова, С. А. Лёвушкина. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2011. – 220 с.

132. Химмельблау Д. Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах / Д. Химмельблау. – Л. : Химия, 1983. – 352 с.

133. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1973. – 957 с.

134. Шайкин А. Н. Моделирование и управление химико-технологическими процессами с использованием нечетких сетей Петри : автореф. дис. . канд. техн. наук : спец. 05.13.06 / А. Н. Шайкин. – М., 2002. – 20 с.

135. Шенон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука / Р. Шенон. – М. : Мир, 1987. – 418 с.

136. Ширяев А. Н. Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений / А. Н. Ширяев. – М. : ФМОП, МЦНМО, 2011. – 144 с.

137. Шумова Л. А. Автоматизация процесса верификации прогнозных моделей в задачах управления динамическими системами / Л. А. Шумова // VI Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и

образовании», 4-11 июня 2010 г., Варна, Болгария : материалы. – Д. ; Варна, 2010. – Т. 2, (ч. 2). – С. 678-680. – Парал. загл. англ.

138. Шумова Л. А. Интеграция автоматизированных систем промышленного предприятия на основе стандарта OPC / Л. А. Шумова, М. Е. Щербакова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2011, № 15 (169), ч. 2 – С. 151-154.

139. Шумова Л. А. Использование алгоритмов интеллектуального анализа в автоматизированных системах управления крупнотоннажным производством / Л. А. Шумова // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Динаміка наукових досліджень», 28 жовтня – 4 листопада 2002 р., Дніпропетровськ – Дніпродзержинськ – Черкаси. – Д., 2002. – Т. 1 : Сучасні комп'ютерні інформаційні технології. – С. 50.

140. Шумова Л. А. Исследование методов повышения качества оценки состояния динамической системы / Л. А. Шумова // Збірник тез доповідей IV Всеукраїнської науково-методичної конференції «Розвиток науки і освіти в освітніх закладах України у контексті Болонського процесу», 19-20 листопада 2010 р. – Сєверодонецьк, 2010. – С. 72.

141. Шумова Л. А. Критерии тренда в задачах раннего обнаружения опасных тенденций технологических параметров / Л. А. Шумова, А. И. Рязанцев, А. А. Хорбенко // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2013) : міжнар. наук. конф., збірка наук. праць, 20–24 травня 2013 р. - Євпаторія, 2013. – С. 332-334. – Парал. загл. англ., рус.

142. Шумова Л. А. Метод раннего обнаружения опасной тенденции технологических параметров / Л. А. Шумова, И. С. Скарга-Бандурова // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2014. – Вип. 37. – С. 126-129.

143. Шумова Л. О. Модель оцінки й прогнозування стану динамічних систем із застосуванням модифікованої нечіткої мережі Петрі / Л. О. Шумова // Наука і життя: українські тенденції, інтеграція у світову наукову думку :

матеріали п'ятої всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., 20 - 22 трав. 2009 р. – К., 2009. – Ч. 4. – С. 10-11.

144. Шумова Л. А. Повышение эффективности управления технологическими процессами действующих производств / Л. А. Шумова // Економіка, менеджмент, підприємництво : зб. наук. праць. – 2001. – № 4. – С. 121-123.

145. Шумова Л. А. Прогнозирование в управлении технологическим объектом / Л. А. Шумова // Збірник тез доповідей VI Всеукраїнської науково-методичної конференції «Розвиток науки і освіти в освітніх закладах України у контексті Болонського процесу», 23-24 листопада 2012 р. – Сєверодонецьк, 2012. – С. 44.

146. Шумова Л. А. Энергосберегающие информационные технологии в химическом производстве / Л. А. Шумова // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні наукові дослідження – '2006», 20-28 лютого 2006 р. – Д., 2006. – Т. 17. Технічні науки. – С. 65.

147. Шумова Л. А. Эффективные средства поддержки обучения проектированию компьютерных систем / Л. А. Шумова // Збірник тез доповідей V Всеукраїнської науково-методичної конференції «Розвиток науки і освіти в освітніх закладах України у контексті Болонського процесу», 25-26 листопада 2011 р. – Сєверодонецьк, 2011. – С. 76.

148. Ярушкина Н. Г. Основы теории нечётких и гибридных систем: Учебное пособие. М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.

149. A handbook of time-series analysis, signal processing and dynamics / S. G. Pollock, R. C. Green, T. Nguyen (Eds.). – Academic Press, 1999. – 807 p.

150. Box G. E. P. Time Series Analysis: Forecasting and Control / G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel. Prentice-Hall. : Englewood Cliffs, 1994. – 3rd ed. – 537 с.

151. Brockwell P. J. Introduction to Time Series and Forecasting / P. J. Brockwell, R. A. Davis ; Springer-Verlag, Berlin, 2002. – 451 p.

152. Chen Q. The differentiation and decision matrix risk assessment of accident precursors and near-misses on construction sites / Q. Chen, W. Wu, X. Zhang // Intern. J. of Engineering & Technology IJET-IJENS. – 2012. – Vol. 12 No 3. – pp. 38-53.
153. Chen S. M. Temperature prediction using fuzzy time series / Chen, S. M., and Hwang, J. R. // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics. – 2000. – 30(2). – pp. 263-275.
154. Cox D. R. Quick sign tests for trend in location and dispersion / D. R. Cox, A. Stuart // Biometrika. – 1955. – V.42. – P. 80-95.
155. Efficient algorithms of time series processing and their applications / G. Sh. Tsitsiashvili [Ed.]. – Nova Science Publishers Inc, 2009. – 97 p.
156. Espinosa J. Fuzzy logic, identification and predictive control / J. Espinosa, J. Vandewalle, V. Wertz. – Springer, 2005. – 265 p.
157. Event Tree Analysis (ETA) [Электронный ресурс] / Режим доступа: www. URL: <http://www.sohar.com/reliability-software/eta.html> – 15.04.2016 г.
158. Foster F. G. Distribution-free tests in timeseries dated on the breaking of records / F. G. Foster, A. Stuart // JRSS. – 1954. – V. B16, № 1. – P. 1-22.
159. IEC: International Electrotechnical Commission, 61025 Fault Tree Analysis 2006 (Stability date 2017) – 103 p.
160. Jaiswal A. K. A textbook of computer based numerical and statistical techniques / A. K. Jaiswal, A. Khandelwal. – New Age International (P) Ltd., 2009. – 624 p.
161. Kantz H. Nonlinear time series analysis / H. Kantz, T. Schreiber. - Cambridge University Press, – 1997. – P. 168-171.
162. Kolarik W. J. Human Performance Reliability: On-Line Assessment Using Fuzzy Logic / W. J. Kolarik, J. C. Woldstad, S. Lu, H. Lu // IIE Transactions. – 2004. – V. 36. – P. 457-467.
163. Korbicz J. Modeling, diagnostics and process control implementation in the DiaSter System / J. Korbicz, J. M. Kościelny (Eds.) ; Springer-Verlag, Heidelberg, 2011. – 400 p.

164. Marsh L. Spline Regression Models / L. Marsh, D. Cormier // Sage university papers. Series : Quantitative Applications in Social Sciences. – 2002. – 69 p.
165. Marhavidas P. K. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009 / P.K. Marhavidas, D. Koulouriotis, V. Gemeni // Journal of Loss Prevention in the Process Industries No. 24. – 2011. – p. 477-523.
166. Montgomery D. C. Introduction to time series analysis and forecasting / D. C. Montgomery, C. L. Jennings, M. Kulahci. – Wiley, 2008. – 472 p.
167. Pavan M. Scientific data ranking methods: theory and applications / M. Pavan, R. Todeschini. – Elsevier Science, 2008. – 224 p.
168. Palmberg P. Quantitative Risk Analyses in the Process Industries: Methodology, Case Studies, and Cost-Benefit Analysis [Электронный ресурс] / P. Palmberg, N. Prophet // Режим доступа: [www. URL: http://www.palisade.com/downloads/UserConf/ioMosaic-Pantektor.pdf](http://www.palisade.com/downloads/UserConf/ioMosaic-Pantektor.pdf) – 21.04.2016 г.
169. Rare association rule mining and knowledge discovery: Technologies for infrequent and critical event detection / Y. S. Koh, N. Rountree (Eds.). – Information Science Reference, 2010. – 320 p.
170. Rosenberg D. Trend analysis and interpretation / D. Rosenberg, Div. of Science, Education and Analysis, – 1997. – 43 p.
171. Seppala C. T. Time series methods for dynamic analysis of multiple controlled variables / C. T. Seppala, T. J. Harris, D. W. Bacon // Journal of Process Control. – 2002. V. 22. – P. 257-276.
172. Shalizi C., “Methods and techniques of complex systems science: An overview,” in Complex Systems Science in Biomedicine, 2006, pp. 33–114.
173. Shumway R. Time Series Analysis and its Applications / R. Shumway, D. S. Stoffer.- Springer, 2000.
174. Skarga-Bandurova I. Methods to assessing critical parameters and early warnings of dangerous situations / I. Skarga-Bandurova, L. Shumova, A.

Ryazantsev // Journal of Information, Control and Management Systems. – V. 12. – 2014. – No 1. – P. 83-91.

175. The RiskSpectrum Software Suite [Электронный ресурс] / Режим доступа: www. URL: <http://www.sohar.com/reliability-software/eta.html> – 15.04.2016 г.

176. Vinnem J. E. Analysis of root causes of major hazard precursors (hydrocarbon leaks) in the Norwegian offshore petroleum industry / J. E. Vinnem, J. A. Hestad, J. T. Kvaløy // Reliability Engineering and System Safety. - 2010. – vol. 95. – P. 1142-1153.

177. Volkanovski A. Application of the Fault Tree Analysis for Assessment of Power System Reliability. Reliability Engineering & System Safety / A. Volkanovski, M. Cepin, B. Mavko // Elsevier. – 2009. – 94(6). – P. 1116–1127.

178. Wald A. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation / A. Wald, J. Wolfowitz // AMS. – 1943. – V. 14. – P. 378-388.

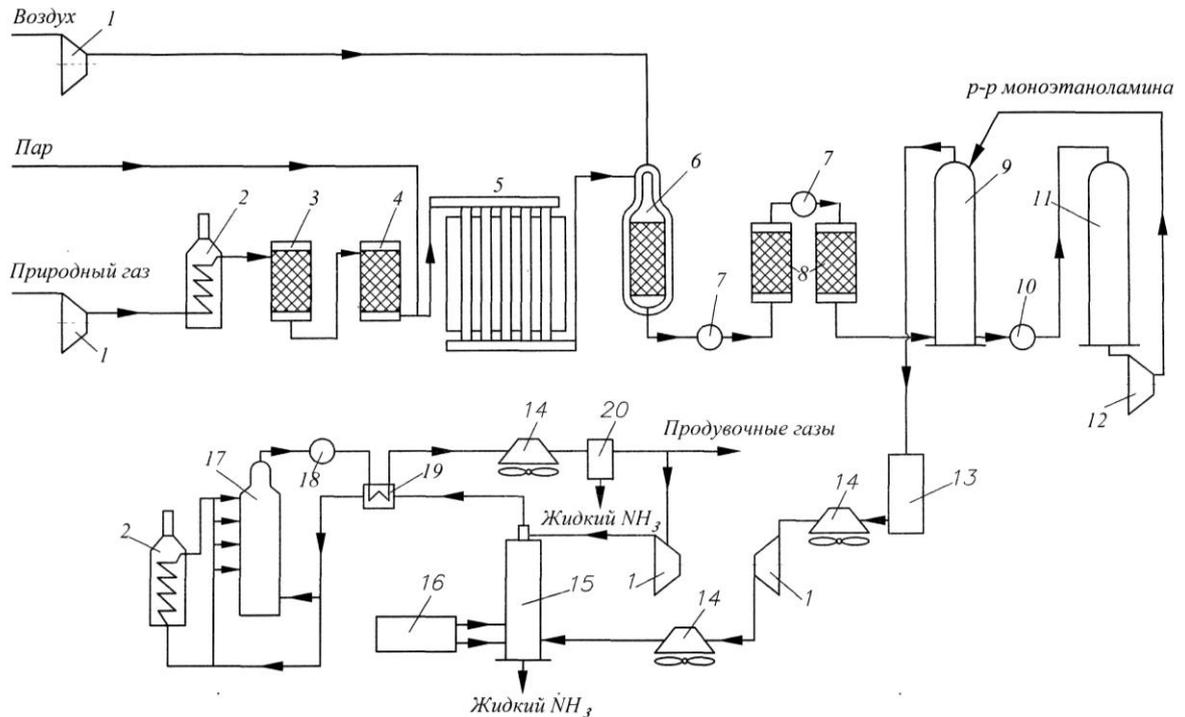
179. Wolkenhauer O. Fuzzy Mathematics: fuzzy sets, relations, logic, graphs, mappings and the extension principle / O. Wolkenhauer. Control Systems Center: Umist, 2003.

180. Zadeh L. A. Fuzzy Sets as a Basic for a Theory of Possibility / L. A Zadeh // Fuzzy Sets and Systems. – 1978. – V. 1. – P. 3-28.

181. Zhang N. F. Forecasting and time series analysis / N. F. Zhang // Journal of the American Statistical Association. – 2012. – V. 34. – P. 97-99.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А



1 – компрессоры; 2 – подогреватели; 3 – аппарат для тарирования сераорганических соединений; 4 – адсорбер H₂S; 5 – трубчатая печь (первичный риформинг); 6 – шахтный конвертор (вторичный риформинг); 7 – паровые котлы; 8 – конверторы CO; 9 – абсорбер CO₂; 10 – кипятильник; 11 – регенератор р-ра моноэтаноламина; 12 – насос; 13 – аппарат для гидрирования остаточных CO и CO₂; 14 – воздушные холодильники; 15 – конденсационная колонна; 16 – испаритель жидкого NH₃; 17 – колонна синтеза NH₃; 18 – водоподогреватель; 19 – теплообменник; 20 – сепаратор.

Рис. А.1. Принципиальная технологическая схема анализируемого производства аммиака

Основные технологические параметры, характеризующие аварийную ситуацию

Обозначение параметра	Характеристика	Допустимые значения	Критические значения	Событие
1	2	3	4	5
FCSA4	Расход воздуха на нагнетании компрессора 101-J	42000 - 57500	32500м ³ /час	Срабатывает блокировка по группе В
РА-407	Давление вторичного масла компрессора воздуха 101-J	>0,18 МПа (1.8 гс/см ²)	P min = 0,18 МПа (1.8 гс/см ²)	Остановка цеха по группе "В" Открытие клапана FCV-4
TCSA101	Температура газа после поз.103	360-400	≥420 ⁰ С	При поступлении импульса с задержкой 2 сек. закрывается клапан TCV 101
PSA101	Давления газа после поз.103	0,02÷0,07 (0,2-0,7)	0.012 МПа (0.12 кгс/см ²)	При поступлении импульса закрывается клапан TCV 101
FCSA2	Расход технологического пара в первичный риформинг	95-120 т/ч	80т/час	Срабатывает блокировка по гр А с задержкой 40 секунд
			70т/час	Срабатывает блокировка по гр А без задержки
PCSA5	Давление топливного газа перед горелкам печи первичного риформинга	0,26-0,35 (2,6-3,5)	P min =0.1 МПа (1 кгс/см ²)	Срабатывает блокировка по гр А с задержкой в 5 секунд
PSA2	Разрежение в печи первичного риформинга	50-120 Па (5-12)	≥ 5мм.вод.ст.	Блокировка срабатывает с временной задержкой 5 секунд
TSA3	Температура конвертированного газа после печи поз.107	<835 ⁰ С	835 ⁰ С – сигнализация макс знач 860 ⁰ С – остановка цеха по гр А	Блокировка срабатывает с задержкой в 5 секунд
FCSA3	Расход воздуха в реактор вторичного риформинга	42000-57500 м ³ /час	F min = 35000 м ³ /час	Прекращается подача воздуха в реактор вторичного риформинга поз.110, Останавливается компрессор 103-J, компрессор 101-J стоит или работает на свечу (в зависимости от первопричины срабатывания группы)

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5
TSA4-2	Температура в лобовом слое катализатора вторичного риформинга	900-1245 °С	870°С	Срабатывает блокировка по группе В
FCSA1	Объемный расход смеси ПГ и АВС на входе в печь 107(до подогрева в кон векционной зоне). м3/ч	38000-43500	≤ 25000 м ³ /час	Автоматическая остановка производства за исключением вспомогательного котла 108, системы парообразования, компрессор 101-Ж стоит или работает на свечу Блокировка срабатывает с задержкой в 5 секунд
TSA502	Температура в слоях катализатора метанатора	310-380 °С	Max 420 °С	Частичная остановка производства – технологический газ сбрасывается на свечу перед метанатором
PS18A/B	Давление первичного масла дымососов 121 А/В	не менее 0,12 (1,2)	0.08 МПа (0.8 кгс/см ²)	Сигналы остановки турбин дымососов -.-.-.- Блокировка срабатывает с временной задержкой 5 секунд
LCSA3	Уровень в паросборнике 109		L _{min} =10% шкалы измерения	Срабатывает блокировка по гр А по схеме “два из трех” при поступлении импульса от любых двух датчиков уровня.
FSA 10	Расход топливного газа на горелки вспомогательного котла 108	3800-8000	F _{min} = 2000 м ³ /час	Частичная остановка производства - технологический газ сбрасывается на свечу перед метанатором

Описание основных схем блокировок

Блокировка группы "В" срабатывает при недопустимом снижении расходов воздуха (FCSA3) в реактор вторичного риформинга до $F_{\min} = 35000 \text{ м}^3/\text{час}$ и снижении температуры (TSA4-2) в любом слое катализатора вторичного риформинга до $870 \text{ }^\circ\text{С}$, недопустимом снижении давления вторичного масла (РА-407) компрессора воздуха 101-Ж до $P_{\min} = 0,18 \text{ МПа}$

(1.8 кгс/см²). При снижении расхода воздуха (FCSA4) на нагнетании компрессора 101-J до 32500 м³/час по блокировке открывается клапан расхода воздуха, что приводит к его снижению (FCSA3).

Формирование импульса на срабатывание блокировки по снижению расхода воздуха во вторичный риформинг, осуществляется по схеме "два из трех" от двух датчиков расхода воздуха, а в качестве третьего используется датчик температуры (TSA4-2) в лобовом слое катализатора вторичного риформинга.

При появлении импульса от двух датчиков (FCSA3) блокировка срабатывает с задержкой 5 секунд. Если параметр (расход воздуха) в течение этого времени возвратился в норму, то блокировка не срабатывает. В случае появления импульса по минимальному расходу воздуха от любого из двух датчиков и условия, что в это время температура в лобовом слое катализатора вторичного риформинга (TSA4-2) достигла минимума (870 °С)-блокировка срабатывает без временной задержки.

При этом отключающее устройство переводит установку в безопасное состояние, воздействуя на арматуру и оборудование.

В результате блокировки прекращается подача воздуха в реактор вторичного риформинга, останавливается компрессор 103-J, компрессор 101-J стоит или работает на свечу (в зависимости от первопричины срабатывания группы).

Время простоя - до 10 часов (если остановка не сопровождалась существенными поломками).

Пусковые затраты на запуск компрессоров не значительные, при этом потери выражаются перерасходом ПГ за время простоя, недовыработкой аммиака, вредными выбросами. При выработке аммиака – 56 т/ час, потери ПГ за час составляют около 31 тонны (73 м³).

Блокировка группы "А" срабатывает в любом из перечисленных случаев:

1) снижение расхода газовой смеси в первичный риформинг (FCSA1) до 25000 м³/час и рост температуры КГ после печи первичного риформинга (TSA3) до 860 °С. При появлении импульса от двух датчиков расхода технологического газа блокировка срабатывает с задержкой в 5 секунд. При появлении импульса от датчика температуры (TSA3) и импульса от любого из двух датчиков расхода газа блокировка срабатывает без временной задержки;

2) снижение расхода технологического пара в первичный риформинг (FCSA2) до минимального значения (при поступлении импульсов от двух из трех датчиков расхода пара блокировка срабатывает с задержкой 40 секунд при расходе 80 т/час, при расходе 70 т/час – без задержки);

3) снижение давления топливного газа перед горелкам печи первичного риформинга (PCSA5) до $P_{\min} = 0.1$ МПа (1 кгс/см²);

4) снижение разрежения в печи первичного риформинга (PSA2) и его повышение до давления 5 мм. вод. ст., снижение давления первичного масла дымососов (PS18A/B) до 0.08 МПа (0.8 кгс/см²). В блокировке используются два датчика давления (PSA2, PS2) и сигналы остановки турбин дымососов (PS18A и PS18B). При поступлении импульсов от обоих датчиков разрежения блокировка срабатывает с временной задержкой 5 секунд. Если параметр в течении этого времени вернется к норме – блокировка не срабатывает. При поступлении импульса от одного любого датчика разрежения и от любого или обоих датчиков остановки турбины дымососов – блокировка срабатывает без задержки);

5) снижения уровня в паросборнике (LCSA3) до $L_{\min} = 10\%$ шкалы измерения (по схеме "два из трех" при поступлении импульса от любых двух датчиков уровня);

6) повышение температуры газа после подогревателя на стадии сероочистки (TCSA101) до 420 °С, при поступлении импульса с задержкой 2 секунды закрывается клапан TCV101;

7) снижение давления газа до подогревателя стадии сероочистки (PSA101) до 0.012 МПа (0.12 кгс/см²), при поступлении импульса закрывается клапан TCV101.

В результате блокировки происходит автоматическая остановка производства за исключением вспомогательного котла, системы парообразования, компрессор 101-Ж стоит или работает на свечу.

Время простоя - до 100 часов (если остановка не сопровождалась существенными поломками). Пусковые затраты значительные.

Блокировка группы "АА" срабатывает при остановке обоих дымососов. При этом отключающее устройство группы "АА" закрывает клапан на линии топливного газа к горелкам вспомогательного котла и воздействует на отключающие устройства групп "А" и "В" с целью их срабатывания.

В результате блокировки происходит полная остановка производства за исключением пускового котла.

Время простоя - более 100 часов. Запуск агрегата - 7 суток, перерасход газа достигает при этом 7-8 млн. \$.

Локальная блокировка по минимальному расходу топливного газа на горелки вспомогательного котла (FSA10) срабатывает при снижении до $F_{\min} = 2000 \text{ м}^3/\text{час}$ (по схеме "два из трех" при поступлении импульса от любых двух датчиков расхода FSA10).

При этом происходит частичная остановка производства. Технологический газ сбрасывается на свечу перед метанатором.

Локальная блокировка по максимальной температуре в слоях катализатора метанатора (TSA502 = 420 °С). Срабатывает при поступлении двух импульсов от одного любого из двух датчиков температуры во втором слое катализатора и от одного любого из двух датчиков температуры в третьем слое катализатора.

При этом так же происходит частичная остановка производства – технологический газ сбрасывается на свечу.

При срабатывании блокировок агрегат переводится в безопасное положение автоматически. Однако обслуживающий персонал должен внимательно следить за положением арматуры при срабатывании блокировок и при необходимости переводить ее в нужное положение вручную.

Приложение Б

Таблица Б.1

Исходные данные для формирования временного ряда

t, с	ТП, °С						
0	804,85	80	802,45	160	801,10	240	817,95
2	804,69	82	799,19	162	801,08	242	820,06
4	804,85	84	803,58	164	802,00	244	818,95
6	807,35	86	803,39	166	801,08	246	819,01
8	808,5	88	805,54	168	803,08	248	820,05
10	808,83	90	803,65	170	803,92	250	820,93
12	806,7	92	809,75	172	803,04	252	821,02
14	803,34	94	799,94	174	803,99	254	820,09
16	808,23	96	800,23	176	803,95	256	820,78
18	801,47	98	796,58	178	803,94	258	820,99
20	800,55	100	801,01	180	803,93	260	822,98
22	798,25	102	800,94	182	803,96	262	825,03
24	798,19	104	801,03	184	805,04	264	826,08
26	803,19	106	803,00	186	805,95	266	826,98
28	798,58	108	802,03	188	805,97	268	826,99
30	801,92	110	802,98	190	805,99	270	826,97
32	803,73	112	802,00	192	805,09	272	827,08
34	803,82	114	799,96	194	805,94	274	828,04
36	800,71	116	801,01	196	806,01	276	830,00
38	804,82	118	800,01	198	807,02	278	833,02
40	803,23	120	801,98	200	807,00	280	832,98
42	807,97	122	803,09	202	805,95	282	834,01
44	804,02	124	799,99	204	806,96	284	834,00
46	802,22	126	796,98	206	807,02	286	834,07
48	802,29	128	798,04	208	807,96	288	835,04
50	808,03	130	797,99	210	808,99	290	836,03
52	807,44	132	798,97	212	809,05	292	837,95
54	809,16	134	800,94	214	810,05	294	840,94
56	802,99	136	799,97	216	810,02	296	842,99
58	809,71	138	801,02	218	810,95	298	845,00
60	799,68	140	801,09	220	810,99	300	844,93
62	805,98	142	801,02	222	810,96	302	845,03
64	807,98	144	800,94	224	810,99	304	846,11
66	810,56	146	801,05	226	811,99	306	847,98
68	804,66	148	801,00	228	811,99	308	848,01
70	802,69	150	802,00	230	812,06	310	849,02
72	807,45	152	801,52	232	814,12	312	850,07
74	803,52	154	801,01	234	815,99	314	856,00
76	808,71	156	800,94	236	815,94	316	856,97
78	801,88	158	801,08	238	816,05	318	860,12

Таблица Б.2

Результаты расчетов по модели до появления опасной тенденции

t, c	x, °C	x*, °C	Sh=2 c		Sh=4c		Sh= 6c		Sh=8c		Sh=10c	
			rx	Class	rx	Class	rx	Class	rx	Class	rx	Class
1	2	3	4	5	7	8	10	11	13	14	16	17
0	804,85	55,15										
2	804,69	55,31	0,16	0								
4	804,85	55,15	-0,16	1	0,00	0						
6	807,35	52,65	-2,50	1	-2,66	1	-2,50	1				
8	808,5	51,50	-1,15	1	-3,65	1	-3,81	1	-3,65	1		
10	808,83	51,17	-0,33	1	-1,48	1	-3,98	1	-4,14	1	-3,98	1
12	806,7	53,30	2,13	0	1,80	0	0,65	0	-1,85	1	-2,01	1
14	803,34	56,66	3,36	0	5,49	0	5,16	0	4,01	0	1,51	0
16	808,23	51,77	-4,89	1	-1,53	1	0,60	0	0,27	0	-0,88	1
18	801,47	58,53	6,76	0	1,87	0	5,23	0	7,36	0	7,03	0
20	800,55	59,45	0,92	0	7,68	0	2,79	0	6,15	0	8,28	0
22	798,25	61,75	2,30	0	3,22	0	9,98	0	5,09	0	8,45	0
24	798,19	61,81	0,06	0	2,36	0	3,28	0	10,04	0	5,15	0
26	803,19	56,81	-5,00	1	-4,94	1	-2,64	1	-1,72	1	5,04	0
28	798,58	61,42	4,61	0	-0,39	1	-0,33	1	1,97	0	2,89	0
30	801,92	58,08	-3,34	1	1,27	0	-3,73	1	-3,67	1	-1,37	1
32	803,73	56,27	-1,81	1	-5,15	1	-0,54	1	-5,54	1	-5,48	1
34	803,82	56,18	-0,09	1	-1,90	1	-5,24	1	-0,63	1	-5,63	1
36	800,71	59,29	3,11	0	3,02	0	1,21	0	-2,13	1	2,48	0
38	804,82	55,18	-4,11	1	-1,00	1	-1,09	1	-2,90	1	-6,24	1
40	803,23	56,77	1,59	0	-2,52	1	0,59	0	0,50	0	-1,31	1
42	807,97	52,03	-4,74	1	-3,15	1	-7,26	1	-4,15	1	-4,24	1
44	804,02	55,98	3,95	0	-0,79	1	0,80	0	-3,31	1	-0,20	1
46	802,22	57,78	1,80	0	5,75	0	1,01	0	2,60	0	-1,51	1
48	802,29	57,71	-0,07	1	1,73	0	5,68	0	0,94	0	2,53	0
50	808,03	51,97	-5,74	1	-5,81	1	-4,01	1	-0,06	1	-4,80	1
52	807,44	52,56	0,59	0	-5,15	1	-5,22	1	-3,42	1	0,53	0
54	809,16	50,84	-1,72	1	-1,13	1	-6,87	1	-6,94	1	-5,14	1
56	802,99	57,01	6,17	0	4,45	0	5,04	0	-0,70	1	-0,77	1
58	809,71	50,29	-6,72	1	-0,55	1	-2,27	1	-1,68	1	-7,42	1
60	799,68	60,32	10,03	0	3,31	0	9,48	0	7,76	0	8,35	0
62	805,98	54,02	-6,30	1	3,73	0	-2,99	1	3,18	0	1,46	0
64	807,98	52,02	-2,00	1	-8,30	1	1,73	0	-4,99	1	1,18	0
66	810,56	49,44	-2,58	1	-4,58	1	-10,88	1	-0,85	1	-7,57	1
68	804,66	55,34	5,90	0	3,32	0	1,32	0	-4,98	1	5,05	0
70	802,69	57,31	1,97	0	7,87	0	5,29	0	3,29	0	-3,01	1

Продолжение таблицы Б.2

1	2	3	4	9	5	10	6	11	7	12	8	13
72	807,45	52,55	-4,76	1	-2,79	1	3,11	0	0,53	0	-1,47	1
74	803,52	56,48	3,93	0	-0,83	1	1,14	0	7,04	0	4,46	0
76	808,71	51,29	-5,19	1	-1,26	1	-6,02	1	-4,05	1	1,85	0
78	801,88	58,12	6,83	0	1,64	0	5,57	0	0,81	0	2,78	0
80	802,45	57,55	-0,57	1	6,26	0	1,07	0	5,00	0	0,24	0
82	799,19	60,81	3,26	0	2,69	0	9,52	0	4,33	0	8,26	0
84	803,58	56,42	-4,39	1	-1,13	1	-1,70	1	5,13	0	-0,06	1
86	803,39	56,61	0,19	0	-4,20	1	-0,94	1	-1,51	1	5,32	0
88	805,54	54,46	-2,15	1	-1,96	1	-6,35	1	-3,09	1	-3,66	1
90	803,65	56,35	1,89	0	-0,26	1	-0,07	1	-4,46	1	-1,20	1
92	809,75	50,25	-6,10	1	-4,21	1	-6,36	1	-6,17	1	-10,56	1
94	799,94	60,06	9,81	0	3,71	0	5,60	0	3,45	0	3,64	0
96	800,23	59,77	-0,29	1	9,52	0	3,42	0	5,31	0	3,16	0
98	796,58	63,42	3,65	0	3,36	0	13,17	0	7,07	0	8,96	0
100	801,01	58,99	-4,43	1	-0,78	1	-1,07	1	8,74	0	2,64	0
102	800,94	59,06	0,07	0	-4,36	1	-0,71	1	-1,00	1	8,81	0
104	801,03	58,97	-0,09	1	-0,02	1	-4,45	1	-0,80	1	-1,09	1
106	803,00	57,00	-1,97	1	-2,06	1	-1,99	1	-6,42	1	-2,77	1
108	802,03	57,97	0,97	0	-1,00	1	-1,09	1	-1,02	1	-5,45	1
110	802,98	57,02	-0,95	1	0,02	0	-1,95	1	-2,04	1	-1,97	1
112	802,00	58,00	0,99	0	0,03	0	1,01	0	-0,97	1	-1,06	1
114	799,96	60,04	2,03	0	3,02	0	2,07	0	3,04	0	1,07	0
116	801,01	58,99	-1,04	1	0,99	0	1,98	0	1,02	0	2,00	0
118	800,01	59,99	0,99	0	-0,05	1	1,98	0	2,97	0	2,01	0
120	801,98	58,02	-1,97	1	-0,97	1	-2,02	1	0,01	0	1,00	0
122	803,09	56,91	-1,11	1	-3,07	1	-2,08	1	-3,12	1	-1,09	1
124	799,99	60,01	3,10	0	1,99	0	0,02	0	1,02	0	-0,03	1
126	796,98	63,02	3,01	0	6,11	0	5,00	0	3,04	0	4,03	0
128	798,04	61,96	-1,06	1	1,96	0	5,05	0	3,95	0	1,98	0
130	797,99	62,01	0,05	0	-1,01	1	2,00	0	5,10	0	3,99	0
132	798,97	61,03	-0,98	1	-0,93	1	-1,99	1	1,02	0	4,12	0
134	800,94	59,06	-1,97	1	-2,95	1	-2,90	1	-3,96	1	-0,94	1
136	799,97	60,03	0,97	0	-1,00	1	-1,98	1	-1,93	1	-2,99	1
138	801,02	58,98	-1,05	1	-0,08	1	-2,05	1	-3,03	1	-2,98	1
140	801,09	58,91	-0,07	1	-1,13	1	-0,16	1	-2,12	1	-3,11	1
142	801,02	58,98	0,08	0	0,00	0	-1,05	1	-0,08	1	-2,05	1
144	800,94	59,06	0,08	0	0,15	0	0,08	0	-0,97	1	0,00	1
146	801,05	58,95	-0,10	1	-0,03	1	0,05	0	-0,03	1	-1,08	1
148	801,00	59,00	0,05	0	-0,06	1	0,02	0	0,10	0	0,02	0
150	802,00	58,00	-1,00	1	-0,96	1	-1,06	1	-0,98	1	-0,91	1

Продолжение таблицы Б.2

1	2	3	4	9	5	10	6	11	7	12	8	13
152	801,52	58,48	0,48	0	-0,53	1	-0,48	1	-0,58	1	-0,51	1
154	801,01	58,99	0,51	0	0,99	0	-0,01	1	0,03	0	-0,07	1
156	800,94	59,06	0,08	0	0,59	0	1,07	0	0,06	0	0,11	0
158	801,08	58,92	-0,14	1	-0,07	1	0,44	0	0,92	0	-0,08	1
160	801,10	58,90	-0,02	1	-0,16	1	-0,09	1	0,43	0	0,90	0
162	801,08	58,92	0,02	0	0,00	0	-0,14	1	-0,07	1	0,44	0
Lmax^{норм.}				4		6		6		7		7

Таблица Б.3

Результаты расчетов по модели с момента появления опасной тенденции

t, c	x, °C	x*, °C	Sh=2 c		Sh=4c		Sh= 6c		Sh=8c		Sh=10c	
			rx	Class	rx	Class	rx	Class	rx	Class	rx	Class
1	2	3	4	5	7	8	10	11	13	14	16	17
164	802,00	58,00	-0,92	1	-0,90	1	-0,92	1	-1,06	1	-0,98	1
166	801,08	58,92	0,92	0	0,00	0	0,02	0	0,00	0	-0,14	1
168	803,08	56,92	-2,00	1	-1,08	1	-2,00	1	-1,98	1	-2,00	1
170	803,92	56,08	-0,84	1	-2,84	1	-1,92	1	-2,84	1	-2,82	1
172	803,04	56,96	0,87	0	0,03	0	-1,96	1	-1,05	1	-1,96	1
174	803,99	56,01	-0,94	1	-0,07	1	-0,91	1	-2,91	1	-1,99	1
176	803,95	56,05	0,04	0	-0,90	1	-0,03	1	-0,87	1	-2,87	1
178	803,94	56,06	0,01	0	0,05	0	-0,90	1	-0,02	1	-0,86	1
180	803,93	56,07	0,01	0	0,01	0	0,05	0	-0,89	1	-0,02	1
182	803,96	56,04	-0,03	1	-0,02	1	-0,02	1	0,02	0	-0,92	1
184	805,04	54,96	-1,08	1	-1,11	1	-1,10	1	-1,10	1	-1,05	1
186	805,95	54,05	-0,91	1	-1,99	1	-2,02	1	-2,01	1	-2,01	1
188	805,97	54,03	-0,01	1	-0,93	1	-2,00	1	-2,03	1	-2,03	1
190	805,99	54,01	-0,02	1	-0,04	1	-0,95	1	-2,03	1	-2,06	1
192	805,09	54,91	0,90	0	0,87	0	0,86	0	-0,05	1	-1,13	1
194	805,94	54,06	-0,85	1	0,05	0	0,03	0	0,01	0	-0,90	1
196	806,01	53,99	-0,07	1	-0,92	1	-0,02	1	-0,04	1	-0,06	1
198	807,02	52,98	-1,01	1	-1,08	1	-1,93	1	-1,03	1	-1,05	1
200	807,00	53,00	0,02	0	-0,99	1	-1,06	1	-1,91	1	-1,01	1
202	805,95	54,05	1,05	0	1,07	0	0,07	0	-0,01	1	-0,85	1
204	806,96	53,04	-1,02	1	0,04	0	0,05	0	-0,95	1	-1,02	1
206	807,02	52,98	-0,06	1	-1,08	1	-0,02	1	0,00	1	-1,01	1
208	807,96	52,04	-0,94	1	-1,00	1	-2,02	1	-0,96	1	-0,94	1
210	808,99	51,01	-1,02	1	-1,96	1	-2,02	1	-3,04	1	-1,99	1
212	809,05	50,95	-0,06	1	-1,09	1	-2,03	1	-2,09	1	-3,11	1
214	810,05	49,95	-0,99	1	-1,06	1	-2,08	1	-3,02	1	-3,08	1
216	810,02	49,98	0,03	0	-0,97	1	-1,03	1	-2,06	1	-3,00	1
218	810,95	49,05	-0,93	1	-0,91	1	-1,90	1	-1,96	1	-2,99	1
220	810,99	49,01	-0,04	1	-0,97	1	-0,95	1	-1,94	1	-2,01	1
222	810,96	49,04	0,03	0	-0,01	1	-0,94	1	-0,91	1	-1,91	1
224	810,99	49,01	-0,04	1	0,00	1	-0,04	1	-0,98	1	-0,95	1
226	811,99	48,01	-1,00	1	-1,03	1	-1,00	1	-1,04	1	-1,97	1
228	811,99	48,01	0,00	1	-1,00	1	-1,03	1	-1,00	1	-1,04	1
230	812,06	47,94	-0,07	1	-0,07	1	-1,06	1	-1,10	1	-1,07	1
232	814,12	45,88	-2,06	1	-2,13	1	-2,13	1	-3,12	1	-3,16	1
234	815,99	44,01	-1,87	1	-3,93	1	-4,00	1	-4,00	1	-4,99	1
236	815,94	44,06	0,05	0	-1,82	1	-3,88	1	-3,95	1	-3,95	1
238	816,05	43,95	-0,11	1	-0,07	1	-1,93	1	-4,00	1	-4,06	1

Продолжение таблицы Б.3

1	2	3	4	5	7	8	10	11	13	14	16	17
240	817,95	42,05	-1,89	1	-2,01	1	-1,96	1	-3,83	1	-5,89	1
242	820,06	39,94	-2,11	1	-4,00	1	-4,12	1	-4,07	1	-5,94	1
244	818,95	41,05	1,11	0	-1,00	1	-2,90	1	-3,01	1	-2,96	1
246	819,01	40,99	-0,06	1	1,05	0	-1,06	1	-2,96	1	-3,07	1
248	820,05	39,95	-1,03	1	-1,09	1	0,01	0	-2,10	1	-3,99	1
250	820,93	39,07	-0,88	1	-1,92	1	-1,98	1	-0,87	1	-2,98	1
252	821,02	38,98	-0,09	1	-0,97	1	-2,01	1	-2,07	1	-0,96	1
254	820,09	39,91	0,93	0	0,84	0	-0,04	1	-1,08	1	-1,14	1
256	820,78	39,22	-0,69	1	0,24	0	0,14	0	-0,74	1	-1,77	1
258	820,99	39,01	-0,21	1	-0,91	1	0,02	0	-0,07	1	-0,95	1
260	822,98	37,02	-1,98	1	-2,19	1	-2,89	1	-1,96	1	-2,05	1
262	825,03	34,97	-2,05	1	-4,03	1	-4,25	1	-4,94	1	-4,01	1
264	826,08	33,92	-1,05	1	-3,10	1	-5,09	1	-5,30	1	-5,99	1
266	826,98	33,02	-0,90	1	-1,95	1	-4,00	1	-5,99	1	-6,20	1
268	826,99	33,01	-0,01	1	-0,91	1	-1,96	1	-4,01	1	-5,99	1
270	826,97	33,03	0,02	0	0,01	0	-0,89	1	-1,94	1	-3,99	1
272	827,08	32,92	-0,11	1	-0,09	1	-0,10	1	-1,00	1	-2,05	1
274	828,04	31,96	-0,96	1	-1,08	1	-1,06	1	-1,06	1	-1,96	1
276	830,00	30,00	-1,96	1	-2,92	1	-3,04	1	-3,02	1	-3,02	1
278	833,02	26,98	-3,02	1	-4,98	1	-5,94	1	-6,05	1	-6,04	1
280	832,98	27,02	0,04	0	-2,98	1	-4,94	1	-5,90	1	-6,01	1
282	834,01	25,99	-1,03	1	-0,99	1	-4,01	1	-5,97	1	-6,93	1
284	834,00	26,00	0,01	0	-1,02	1	-0,98	1	-4,00	1	-5,95	1
286	834,07	25,93	-0,07	1	-0,06	1	-1,09	1	-1,05	1	-4,07	1
288	835,04	24,96	-0,97	1	-1,04	1	-1,03	1	-2,06	1	-2,02	1
290	836,03	23,97	-0,99	1	-1,96	1	-2,03	1	-2,02	1	-3,05	1
292	837,95	22,05	-1,92	1	-2,91	1	-3,88	1	-3,95	1	-3,94	1
294	840,94	19,06	-2,99	1	-4,91	1	-5,90	1	-6,87	1	-6,94	1
296	842,99	17,01	-2,05	1	-5,04	1	-6,96	1	-7,96	1	-8,92	1
298	845,00	15,00	-2,01	1	-4,06	1	-7,05	1	-8,97	1	-9,96	1
300	844,93	15,07	0,06	0	-1,94	1	-4,00	1	-6,98	1	-8,91	1
302	845,03	14,97	-0,09	1	-0,03	1	-2,03	1	-4,09	1	-7,08	1
304	846,11	13,89	-1,08	1	-1,17	1	-1,11	1	-3,11	1	-5,17	1
306	847,98	12,02	-1,88	1	-2,95	1	-3,05	1	-2,98	1	-4,99	1
308	848,01	11,99	-0,03	1	-1,90	1	-2,98	1	-3,07	1	-3,01	1
310	849,02	10,98	-1,01	1	-1,04	1	-2,91	1	-3,99	1	-4,08	1
312	850,07	9,93	-1,05	1	-2,06	1	-2,08	1	-3,96	1	-5,04	1
314	856,00	4,00	-5,94	1	-6,98	1	-7,99	1	-8,02	1	-9,90	1
316	856,97	3,03	-0,97	1	-6,91	1	-7,95	1	-8,96	1	-8,99	1
318	860,12	0,12	-2,91	1	-3,88	1	-9,81	1	-10,86	1	-11,87	1
Лтах				9		24		30		62		78
Количество серий				29		17		13		7		1

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ректор Східноукраїнського національного
університету ім. В. Даля

_____ д.т.н. Поркуян О.В.

«_____» _____ 2016 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес
Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля результатів
кандидатської дисертаційної роботи
Шумової Лариси Олександрівни

**Цим актом підтверджується, що результати досліджень, які проводились у
межах наукового напрямку «Інформаційні технології в промисловості, екології,
медицині» за:**

1) науково-дослідними роботами:

1. «Розробка програмно-технічного комплексу хімічного виробництва» (№ Д.Р.
0104U000391),

2. «Засоби підтримки прийняття рішень у критичних системах» (№ Д.Р.
0111U001749),

3. «Інтегрована інформаційна система природоохоронної діяльності
промислових підприємств» (№ ДР 0113U002235).

2) тематичними планами науково-дослідних робіт Технологічного інституту
Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Сєвєродонецьк)
протягом 2003 - 2015 рр.;

впроваджені на кафедрі комп'ютерної інженерії в процес підготовки студентів за
напрямом 6.050102 – «Комп'ютерна інженерія» та напрямом 6.050101 – «Комп'ютерні
науки».

Впровадження результатів дисертаційної роботи полягає в їх використанні при
викладанні навчальних дисциплін як окремих розділів лекційних курсів, так і в циклах
практичних і лабораторних робіт.

Основні результати впровадження в курси дисциплін:

1. «Технологія проектування комп'ютерних систем» - введений теоретичний матеріал за темами «Технології імітаційного моделювання в проектуванні комп'ютерних систем», «Комп'ютерне моделювання в задачах проектування комп'ютерних систем» та матеріали для практичного засвоєння «Моделювання процесів з використанням нечітких мереж Петрі».

2. «Автоматизовані інформаційні системи» - введений теоретичний матеріал за темою «Технології проектування систем підтримки прийняття рішень» та матеріали для практичного засвоєння «Моделі та методи побудови інструментальних засобів підтримки прийняття рішень в складних людино-машинних системах».

3. «Автоматизовані системи організаційного управління» - введений теоретичний матеріал за темою «Методи аналізу трендів у виробничих базах даних» та матеріал для практичного засвоєння «Метод комплексної оцінки негативної тенденції в умовах невизначенності на основі ситуаційної моделі».

4. «Теорія прийняття рішень» - введений теоретичний матеріал за темою «Моделі прийняття рішень при наявності передаварійних ситуацій» та матеріали для практичного засвоєння «Синтез моделей прийняття рішень в складних системах».

Декан факультету інформаційних
технологій та електроніки, к.т.н., доц.

В.М. Барбарук

Завідувач кафедри комп'ютерної
інженерії, д.т.н., проф.

О.І. Рязанцев