

На правах рукописи

АЛЬМАСРИ ХУСАМ ФАИЗ

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И СОЗДАНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И
УПРАВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫМИ РЕАКТОРАМИ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в вычислительной технике)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

7 ДЕК 2016

Автор:



Москва 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Научный
руководитель:** **Жучков Александр Александрович**
кандидат технических наук, доцент,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

**Официальные
оппоненты:** **Алферов Владимир Николаевич,**
доктор физико-математических наук, профессор, главный
научный сотрудник ГНЦ «Институт физики высоких энергий»,
г. Протвино

Боженков Олег Леонидович,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
главный эксперт АО «Русатом Автоматизированные системы
управления» (АО «РАСУ»), г. Москва

**Ведущая
организация:** **АО «ВНИИАЭС»** (Всероссийский научно-исследовательский
институт по эксплуатации атомных электростанций), г. Москва

Защита состоится «29» декабря 2016г. в 15 часов. на заседании
диссертационного совета Д 212.130.03 на базе Национального исследовательского
ядерного университете «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе,
31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте:
<http://ods.mephi.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба
направлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, диссертационные
советы НИЯУ МИФИ (тел. +7(499)324-84-98).

Автореферат разослан «28» октября 2016г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.130.03
доктор технических наук, доцент



Н.М. Леонова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В последнее время в РФ и за рубежом наметилась тенденция к созданию интеллектуальных систем управления с применением алгоритмов нечетких и нейронных сетей, реализуемых на базе программно-технических комплексов, которые находятся в различных состояниях готовности к применению на реальных объектах управления. Поэтому представляет интерес создание интеллектуальных алгоритмов, повышающих качество и надежность параметров управления опасными и сложными объектами, например ядерными реакторами; а также дающих возможность быстро и надежно (достоверно) принимать решения в спорных вопросах управления, исключая влияние «человеческого фактора» (ошибки, которые может допустить оперативный персонал). Поэтому алгоритмическая и функциональная структуры систем управления должны обеспечивать их правильное функционирование при заданной степени показателей качества и надежности в среде влияния на систему разнообразных возмущающих факторов. Использование традиционных методов для целостности такого рода систем в случае управления сложными и опасными динамическими объектами оказывается довольно трудоемким. Все ранее упомянутые факторы обуславливают необходимость разработки новых и совершенствования уже имеющихся методов проектирования интеллектуальных систем автоматического управления для того, чтобы использовать их при решении масштабного класса прикладных задач управления опасными и сложными объектами, в том числе ядерными реакторами.

В настоящее время проблемы создания различных классов интеллектуальных систем и алгоритмов управления активно исследуются отечественным и зарубежными учеными, о чем свидетельствуют работы как отечественных (А.И. Галушкин, Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, В.Н. Захаров, С.В. Ульянов, А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров, А.И. Гаврилов, И.С. Константинов, А.Г. Филатов, Ю.В. Касьянов, Д.А. Поспелова и др.), так и зарубежных ученых (Cohen M.A., Grossberg S.O., Zadeh L., White D.A., Sofge D.A. и др.).

Таким образом, актуальной является задача разработки алгоритмов интеллектуальной оптимизации управления опасными объектами и производствами на базе программно-технических комплексов. Решению этой актуальной проблемы и посвящена данная диссертация.

Цель диссертационного исследования. Целью данной диссертации является разработка и реализация ряда алгоритмов интеллектуального управления для исследования и создания системы контроля и управления в составе АСУТП ядерных энергетических установок и проверки решений на моделях объекта, включая принятие проектных решений, с целью повышения надежности и качества управления с использованием принципов нейронных сетей и нечеткого логического управления.

Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих задач **диссертационного исследования**:

- провести анализ основных трудностей создания традиционных АСУТП для сложных и опасных объектов управления на примере ядерных энергетических установок (ЯЭУ);
- провести анализ и исследование основных проблем создания АСУТП АЭС и функционирования автоматического регулятора мощности ЯЭУ с использованием компьютерного многофункционального анализатора реакторной установки АЭС с ВВЭР;
- провести исследование возможности применения интеллектуальных нейронных сетей и нечетких алгоритмов, а также способов их реализации для использования в области автоматизации опасных и сложных объектов управления на примере АСУТП АЭС;
- разработать и провести тестирование предложенных интеллектуальных алгоритмов на типовых объектах управления и сделать выводы о целесообразности их дальнейшего применения;
- разработать на основе проведенного анализа алгоритмы на базе нейронных сетей для обучения адаптивных систем автоматического регулирования мощности с целью повышения качества управления в АСУТП ЯЭУ;
- разработать и реализовать нечеткие алгоритмы оптимизации оценки вариантов резервирования каналов контроля и управления в составе распределенной АСУТП ЯЭУ с целью построения эффективных и надежных автоматизированных систем управления опасными технологическими процессами.

Объект диссертационного исследования. Объектом исследования является АСУТП АЭС, в частности, алгоритмы контроля и управления ЯЭУ, реализованные на компьютерном многофункциональном анализаторе реакторной установки АЭС с ВВЭР.

Методы исследования. В работе использовались методы искусственного интеллекта, такие как нечеткая логика и алгоритмы нейронных сетей, методы математического и компьютерного моделирования, методы математического программирования, методы проектирования программного обеспечения.

Научная новизна заключается в следующем:

- предложено использовать алгоритмы на базе нейронных сетей для обучения адаптивных систем автоматического регулирования в АСУТП АЭС с целью повышения качества управления;
- разработано программное обеспечение, реализующее интеллектуальные алгоритмы, позволяющее осуществлять обучение адаптивных систем управления;
- предложено использовать нечеткие алгоритмы для решения задач

выбора оптимальной структуры резервированной распределенной АСУТП;

- созданы программные интеллектуальные средства оценки вариантов схемы резервирования каналов системы контроля и управления в составе распределенной АСУТП ЯР.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- предложенный подход реализуем на используемых в настоящее время современных аппаратных средствах, и может быть использован либо как дополнение к существующим регуляторам систем управления мощностью, либо как принципиально новый вариант на базе программно-технического комплекса;

- показана целесообразность оснащения современных программно-технических комплексов систем контроля и управления средствами нейронных сетей и нечетких алгоритмов, позволяющих значительно расширить класс применяемых технологий управления;

- предложен интеллектуальный алгоритм адаптации параметров автоматического регулятора мощности ядерного реактора для построения качественных и надежных автоматизированных систем управления опасными технологическими процессами;

- разработанные в среде MATLAB программы синтеза нейронных сетей и нечетких алгоритмов использованы для реализации и проведения лабораторного практикума по изучению дисциплин «Управление ЯЭУ», «Методы оптимального управления», «Автоматизация АЭС» и «Цифровые системы автоматического управления» на кафедре «Автоматика» НИЯУ МИФИ;

- результаты могут быть использованы при разработке новых систем управления сложными и опасными динамическими объектами, например, при разработке систем адаптивного управления в АСУТП АЭС.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа проблем в создании САР в составе АСУТП для сложных и опасных объектов управления на примере ядерных энергетических установок (ЯЭУ);

- результаты исследований функционирования автоматического регулятора мощности ЯР, реализованного в составе многофункционального компьютерного анализатора режимов ЯЭУ АЭС с ВВЭР, показывающие целесообразность использования нейронных сетей для создания адаптивных систем с целью повышения качества управления;

- основанные на нейронных сетях варианты алгоритмов адаптивной коррекции параметров автоматического регулятора мощности ядерного реактора, обеспечивающие повышение качества регулирования;

- алгоритмические средства нечеткой логики, позволяющие оптимизировать выбор структур резервирования каналов контроля и управления АСУТП ЯЭУ с целью повышения их эффективности и надежности.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационного

исследования использованы в учебном процессе НИЯУ МИФИ при разработке практических, лекционных, семинарских занятий и лабораторных работ по дисциплинам «Методы оптимального управления», «Цифровые системы автоматического управления», «Управление ядерными энергетическими установками» и «Автоматизация АЭС» на кафедре «Автоматика» НИЯУ МИФИ.

Апробация диссертации. Основные результаты диссертационного исследования были изложены на следующих конференциях:

- научной сессии НИЯУ МИФИ – 2013 – с 01 по 06 февраля 2013 г. (один доклад);
- научной сессии НИЯУ МИФИ – 2014 – с 27 января по 01 февраля 2014 г. (два доклада);
- научной сессии НИЯУ МИФИ – 2015 – с 16 по 20 февраля 2015 г. (два доклада);
- международной научно-практической конференции «Международная конференция молодых специалистов, ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов» – с 5 по 9 сентября 2016 г. (один доклад).

Достоверность результатов обусловлена совпадением теоретических результатов с экспериментальными данными, подтверждающим корректность применения используемого математического аппарата и достоверность выводов, а также успешной практической реализацией результатов в научно-практической и образовательной деятельности и апробацией результатов исследований на научно-практических конференциях и семинарах.

Публикации. Результаты диссертации отражены в 10 работах, в числе которых 3 статьи – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 докладов и аннотаций докладов научных конференций, 2 статьи – в других изданиях.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, полученные лично автором, заключаются в разработке и реализации алгоритмов нечеткой логики и нейронных сетей для решения задач разработки алгоритмов адаптивного управления и многопараметрической оптимизации структуры резервированной АСУТП с целью повышения качества и надежности процессов управления ядерными реакторами.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 113 страниц машинописного текста: введение, четыре главы, заключение, список использованных источников. Основная часть диссертации содержит 106 страниц текста, 34 рисунка и 13 таблиц. Список использованных источников включает 58 наименований.

Основное содержание работы

Во введении рассматриваются проблемы и трудности автоматизации сложных технологических процессов, в частности при создании АСУТП АЭС, а также актуальная целесообразность использования современных

интеллектуальных технологий для совершенствования систем управления. Ввиду того, что стремительное движение в развитии в области АСУТП позволило решить довольно обширный класс новых задач автоматизации технологических процессов, возникает потребность использования новых методов для решения задач контроля и управления, основанных на качественной имитации и воссоздании процессов интеллектуального управления. Такое направление как искусственный интеллект способно решать данный класс задач.

В первой главе выполнен обзор состояния проблем, возникающих при построении автоматизированной системы управления технологическим процессом атомных электростанций, и выдвинуты основные требования к средствам построения АСУТП АЭС. Проанализированы особенности автоматизации управления сложными и опасными технологическими объектами.

Далее автор описывает основные понятия теории интеллектуального управления и основные области исследований и разработок, формируемые и развивающиеся как инструмент для построения интеллектуальных систем управления.

Показана целесообразность использования теории интеллектуального управления и основные способы построения систем на основе искусственных нейронных сетей и нечетких алгоритмов для решения задач автоматизации сложных технологических объектов.

Анализ современных систем управления показал, что применение интеллектуальных алгоритмов управления все больше проникает в различные отрасли народного хозяйства, но в атомной отрасли до настоящего времени данные интеллектуальные алгоритмы не нашли широкого применения.

На основе сделанных выводов по проведенному обзору литературы и анализу применения методов искусственного интеллекта для решения задач автоматизации можно отметить следующее:

- использование методов искусственного интеллекта (ИИ) для создания систем управления сложными технологическими объектами в настоящее время еще не получило широкой практики;
- методы искусственного интеллекта не следует рассматривать как альтернативные к классическим методам автоматизации технологических процессов в связи с тем, что для задач управления достаточно полно идентифицированными объектами детерминированные технологии обеспечивают достаточную эффективность;
- отсутствуют устоявшиеся подходы к применению методов искусственного интеллекта для управления технологическими процессами в реальном времени.

Вторая глава посвящена описанию объекта автоматизации и постановке задач диссертации, а также разработке и решению интеллектуальных базовых

задач.

Рассмотрена типовая структура АСУТП АЭС, анализ функционирования которой позволяет выявить ряд новых направлений и задач, направленных на повышение качества управления и эффективности технологического процесса. Раскрываются особенности АСУТП ядерных энергетических установок с реакторами типа ВВЭР и приводятся характеристики объекта автоматизации и его функциональная структура

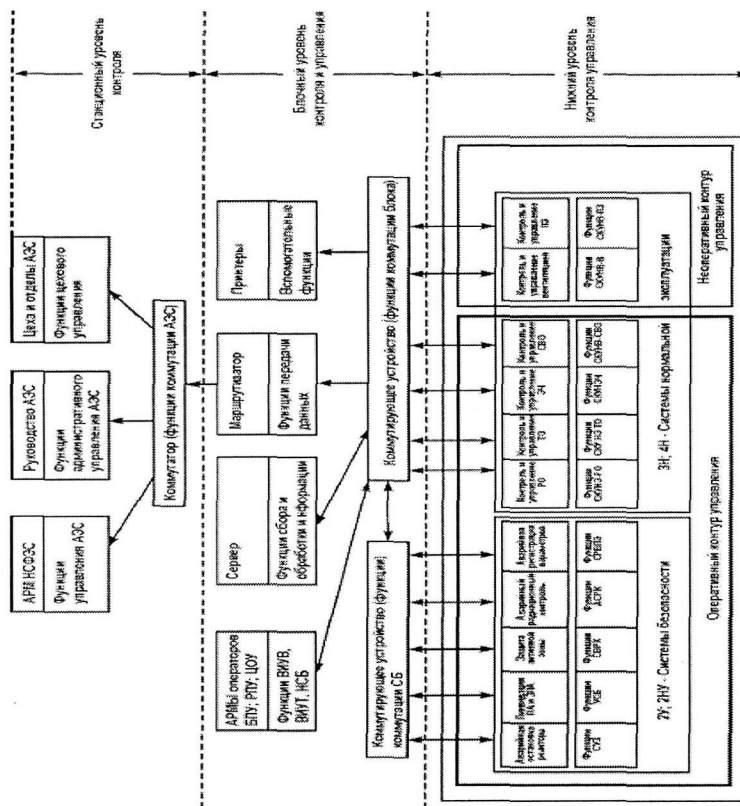


Рис. 1. Функциональная структура АСУТП АЭС

На рис. 1 приведена упрощенная функциональная структура АСУТП для энергоблока с ВВЭР-1000.

Рассматриваются принципиальные различия алгоритмов интеллектуального управления: нейронных сетей, от и нечеткой логики. Эти

оба метода используют допустимые отклонения по отношению к неопределенности и неточностям, но при этом используют абсолютно разные алгоритмы обработки данных. Нечеткая логика основана на математическом моделировании на базе неполной определенности, нейронные сети используют в основе своего функционирования модель восприятия информации и принятия решений, осуществляемых человеком. На рис. 2 показаны области наиболее эффективного применения современных технологий управления. Классические методы управления хорошо работают при полностью детерминированном объекте управления и детерминированной среде, а для систем с неполной информацией и достаточно высокой сложностью описания объекта управления оптимальными являются методы нейронных сетей и нечеткой логики.

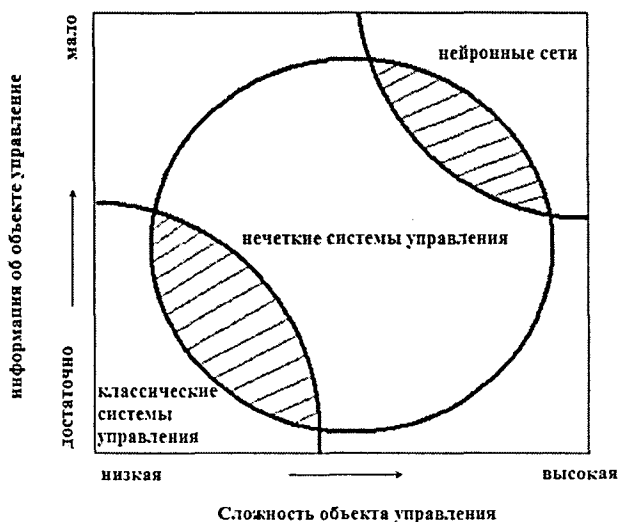


Рис. 2. Области применения современных технологий управления

Выяснено, что имеется класс задач, включающий задачи интеллектуального типа, которые в настоящее время слабо отражены при проектировании и реализации АСУТП АЭС.

Разработаны и реализованы алгоритмы решения тестовых задач, которые позволяют, при введении некоторых упрощений, познакомиться с интеллектуальными способами решения задач управления. В частности, на основе применения нечетких множеств и алгоритмов нейронных сетей предложено решение теплотехнических задач. Под «теплотехническими задачами» подразумеваются задачи прогнозирования и контроля температуры и объема жидкости в гидротехнических системах.

Рассмотрены два варианта алгоритмов интеллектуального управления: нечеткие множества и нейронные сети.

Задачи прогнозирования заключаются в определении температуры, которая получится при смешивании горячей и холодной воды различного объема.

Задачи управления заключаются в контроле объема холодной воды, который будет смешиваться с горячей водой, чтобы образовалась смесь заданной температуры.

В качестве базового эксперимента предлагается использовать задачу управления и прогнозирования оптимального смешивания теплоносителей. Имеется установка, представленная на рис. 3.

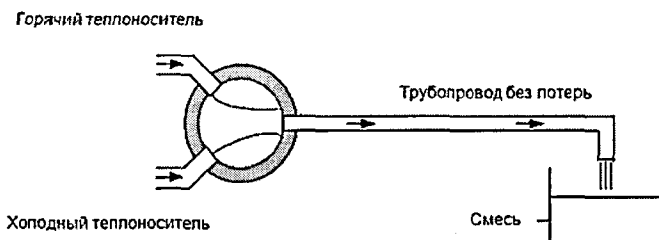


Рис. 3. Схема установки для проведения эксперимента по прогнозированию оптимального смешивания

Были применены алгоритмы нечеткого анализа и алгоритмы на базе нейронных сетей для решения задач прогнозирования и управления типовыми объектами, полученные результаты информативны и удовлетворительны.

В третьей главе предлагается применить интеллектуальные алгоритмы для повышения качества регулирования технологическим объектом на примере автоматического регулирования мощности ЯР в АСУТП АЭС. Все эксперименты проводились на компьютерном многофункциональном анализаторе реакторной установки АЭС с ВВЭР. Полученные выходные данные использовались в качестве информационной базы и проверки на соответствие процесса регулирования. Данный компьютерный анализатор создан на кафедре «Автоматика» НИЯУ МИФИ на базе лаборатории «Управление и безопасность АЭС». Учебная лаборатория «Управление и безопасность АЭС» оборудована комплексной моделью ЯЭУ. Подобные лаборатории эффективно используются для изучения алгоритмов управления энергоблоком в режимах эксплуатации, для которых имеется дефицит эксплуатационного опыта, и процедуры управления недостаточно полно регламентированы. В лаборатории используется компьютерная система, осуществляющая моделирование нейтронно-физических, тепло-

гидравлических, электрических процессов, алгоритмов систем контроля и управления. В частности на компьютерном имитаторе объектом исследования является подсистема «автоматический регулятор мощности АРМ», который полностью имитирует работу реального автоматического регулятора мощности реактора. АРМ нацелен на поддержание мощности реакторов в соответствии с мощностью турбины при параллельном поддержании заданного давления пара и ограничения его увеличения, поддержания фиксированного значения нейтронной мощности реактора. На рис. 4 представлен интерфейс АРМ реактора на компьютерном многофункциональном анализаторе реакторной установки исследования АЭС с ВВЭР.

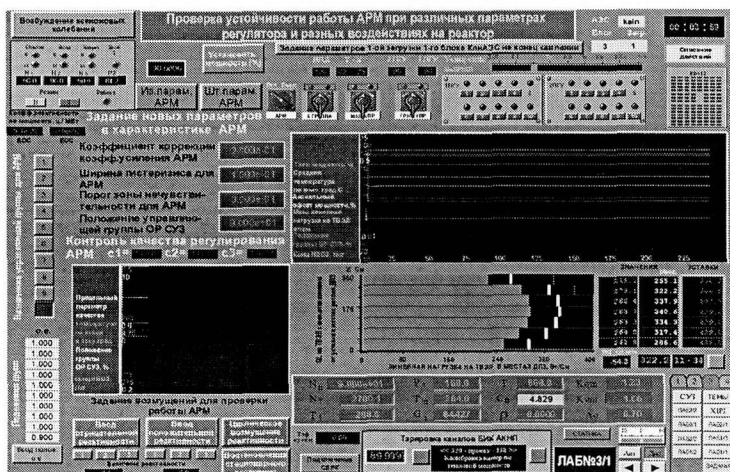


Рис. 4. Интерфейс автоматического регулятора мощности реактора на компьютерном многофункциональном анализаторе реакторной установки АЭС с ВВЭР

На рисунке видны все функциональные параметры регулятора, подлежащие настройке, а также в этом имитаторе есть возможность ввести различные типы и амплитуды возмущений. Имитатор обладает возможностью визуализировать динамическое состояние системы регулирования в виде графика. На графическом изображении можно наблюдать мгновенное изменение мощности реактора и текущих параметров регулирования. Также есть возможность менять и настраивать множество параметров регулятора, что дает большую возможность проводить разнообразные опыты и испытать нестандартные ситуации.

В данной главе была проведена оценка качества регулирования и оптимизация настроек автоматического регулятора мощности. К трудностям

решения данной задачи относится необходимость учета наличия в объекте управления разнообразных возмущающих воздействий, которые достаточно сложно предусмотреть заранее. Рассмотрен общий подход к решению многокритериальной задачи для выбора оптимальной настройки АРМ, и приведены решения частных задач. Автоматический регулятор мощности, используемый в исследуемом анализаторе, позволяет менять настройки следующих параметров:

К – коэффициент пропорциональности (усиления) АРМ;

З – зона нечувствительности АРМ;

А – тип и характер возмущающего воздействия на ЯР (прирост реактивности).

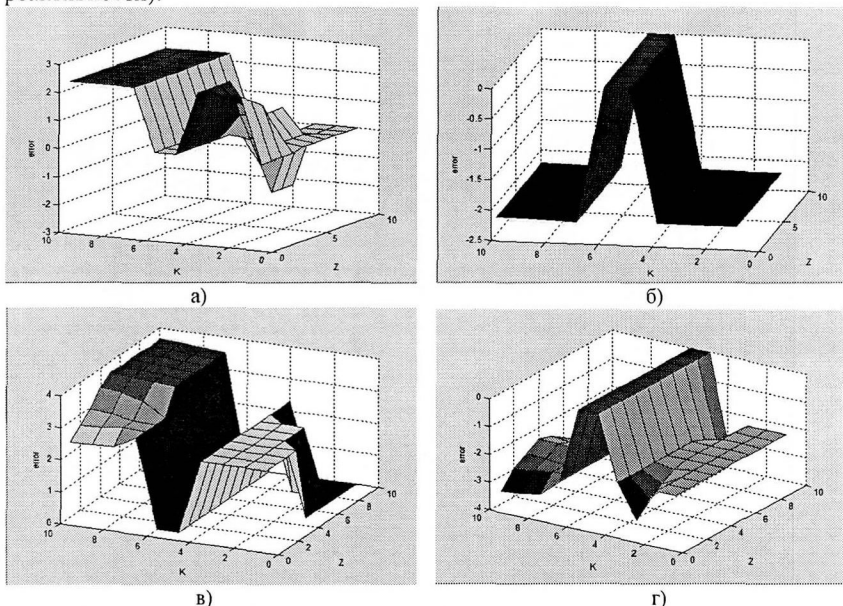


Рис. 5. Представление погрешностей работы АРМ при разных возмущениях:

а) $Epsilon$ при возмущении A^{3-} ; б) $Epsilon$ при возмущении A^{3+} ; в) $Sigma$ при возмущении A^{3-} ; г) $Sigma$ при возмущении A^{3+} .

Для различных допустимых значений параметров настройки регулятора мощности К и З при различных характерах возмущений ЯР соответствуют значения статической ошибки $Epsilon$ и абсолютные значения величины выброса перерегулирования $Sigma$. Погрешности работы АРМ ($Epsilon$ и $Sigma$) при разных возмущениях A^{3-} и A^{3+} отражены на рис. 5.

На основе полученных результатов был сделан вывод о выборе настроек автоматического регулятора мощности при учете различных типов возмущений для достижения наилучших показателей $Epsilon$ и $Sigma$

одновременно.

Так же был сформирован нечеткий алгоритм (метод Fuzzy) ранжирования и оптимизации полученных экспериментальных данных для достижения наилучших значений *epsilon* и *sigma* одновременно при различных типах возмущения. Нечеткий алгоритм оптимизации включает выполнение следующих этапов:

- 1) подготовка вариантов схем и исходных данных для оценок надежности вариантов;
- 2) оценка частных критериев оптимизации (ранжирования);
- 3) фазификация частных критериев;
- 4) установление логических правил предпочтения;
- 5) задание дефазификации;
- 6) нечеткая оценка глобального критерия оптимизации для *Epsilon* и *Sigma*;
- 7) ранжирование вариантов по глобальному критерию оптимизации;
- 8) определение оптимального и запасных вариантов на основе ранжирования;
- 9) окончательный выбор с учетом реализуемости, дополнительных требований и неформальных предпочтений.

Нечеткий алгоритм реализован с использованием пакета «Fuzzy Logic Toolbox» в MATLAB. Его структурная схема представлена на рис. 6 и 7.

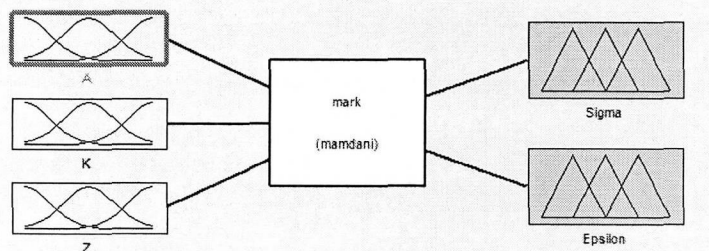


Рис. 6. Общая схема предлагаемого подхода нечеткой логики

Структурная схема алгоритма состоит из трех входов, на которые подаются *K*, *З*, *A* – некоторые известные частные критерии. Эти данные обрабатываются при помощи нечеткого алгоритма (Mamdani), который позволяет оценить вклад каждой входной переменной с учетом его веса и накопленного опыта, на этапе создания правил для функционирования многокритериального алгоритма. Выходы структурной схемы содержат результаты работы алгоритма в виде оценки величин *Epsilon* и *Sigma*. Учитывая, что алгоритм Mamdani предлагает всегда положительно определенные оценки, то имеет смысл, в общем случае, для нахождения суммарной оценки использовать среднее арифметическое от оценок *Epsilon* и *Sigma*. В частных случаях интеллектуальный алгоритм позволяет отдавать

предпочтение одной наиболее важной из совокупности оценок.

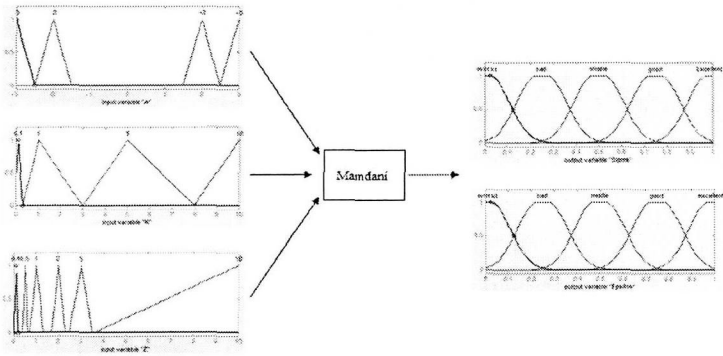


Рис. 7. Структура нечеткого оценивания и ранжирования с алгоритмом (Mamdani)

В итоге решения задачи были получены результаты оценки настраиваемых параметров регулятора при различных по величине и типу возмущениях реактивности ЯР, представленные на рис. 8 и в табл. 1.

Табл. 1. Оценка показателей качества АРМ на основе нечеткого подхода

K	β	A^{3+}		A^{3-}		Средние значения оценок
		σ	ϵ	σ	ϵ	
1	0,5	0,251	0,754	0,5	0,754	0,5647
1	0,8	0,251	0,754	0,754	0,87	0,6572
1	1	0,251	0,9254	0,754	0,87	0,70005
1	1,1	0,251	0,754	0,5	0,87	0,5937
1	1,2	0,251	0,754	0,754	0,87	0,6572
1	1,4	0,251	0,87	0,754	0,87	0,6862
1	1,5	0,251	0,9254	0,9254	0,87	0,7429
1	1,6	0,251	0,2508	0,754	0,9254	0,54525
1	1,8	0,251	0,2508	0,754	0,87	0,5314
1	2	0,251	0,2508	0,5	0,87	0,4679

Каждый рассмотренный случай имеет свою индивидуальную оценку, что позволяет найти оптимальную настройку параметрического регулятора мощности для каждого из типов возмущения. Из таблицы видно, что оптимальные настройки параметров регулятора существуют при выборе параметров K равном 1, и β равном 1,5.

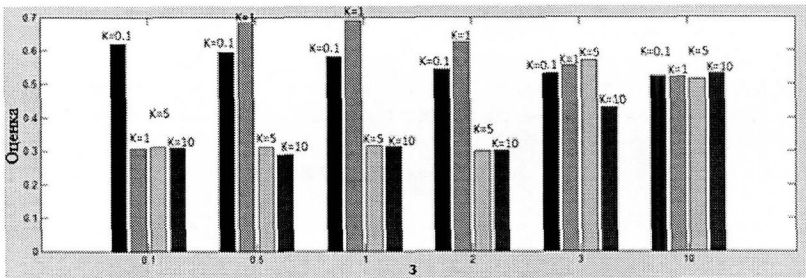


Рис. 8. Оценка показателей качества АРМ на основе нечеткого подхода

На основе экспериментальных данных работы АРМ видно, что имеется достаточно большое количество случаев управления со значительными величинами статических ошибок, примерно 2 – 3 %. На рис. 9 представлены гистограммы для различных типов возмущений A для того, чтобы продемонстрировать величину статической ошибки *Epsilon*. Для повышения качества регулирования АРМ предложена реализация алгоритма на базе нейронных сетей, которая обеспечит заданное быстродействие, непрерывность адаптивного управления и уменьшение статической ошибки.

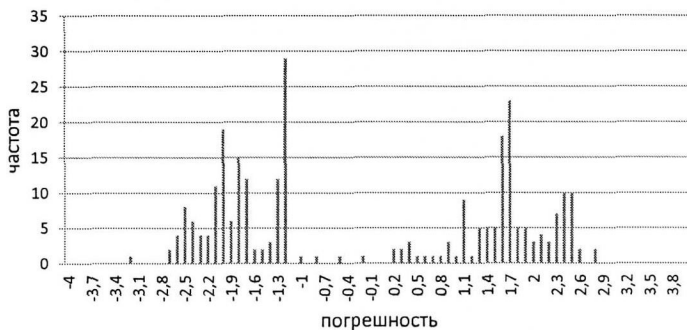


Рис. 9. Гистограмма экспериментальных результатов при различных видах возмущений

Для реализации данных целей разработан алгоритм нейронных сетей на основе интеллектуального подхода, сформирована обучающая выборка и выбран алгоритм обучения. С помощью пакета прикладных программ «Neural Network Toolbox» в MATLAB была написана программа формирования, обучения и тестирования работы нейронных сетей. При помощи данного инструмента можно создавать, обучать, визуализировать и моделировать нейронные сети. Набор исходных данных был разделен на три части – обучающую выборку, утвержденные данные и тестовые данные. Обучающие

данные используются для обучения нейронной сети, а проверочные используются для расчета ошибки сети. При анализе полученных данных возникает идея реализовать систему прогноза работы автоматического регулятора мощности для того, чтобы построить адаптивную систему управления, поэтому исходная задача делится на две части: прогноз работы объекта управления и непосредственно адаптивного управления.

Задача прогноза функционирования автоматического регулятора мощности

Задача построения прогноза заключается в том, что предлагается на основе измеренного возмущения A и желаемого значения уровня мощности $\Phi_{жс}$ путем моделирования нейросхемы определить будущий результат значения реальной мощности Φ_p . Для построения модели нейронной сети необходимо выбирать в качестве входных данных K, Z, A и $\Phi_{жс}$, а в качестве выходных данных – Φ_p . Рис. 10 показывает общую схему моделирования.

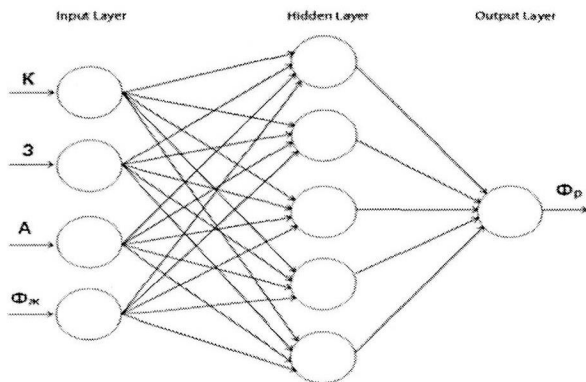


Рис. 10. Общая схема моделирования для части прогноза

Процесс обучения адаптивной системы и последующей обработки результатов для анализа качества построенной нейронной сети отражены на рис. 11. На рис. 11, а отображена среднеквадратичная ошибка уровня мощности на валидационном наборе данных для последовательных эпох обучения. На рис. 11, б представлено распределение ошибок моделирования процесса обучения в реализованной сети в виде гистограмм, а процесс распределения ошибок для нейронной сети отображен на рис. 11, в.

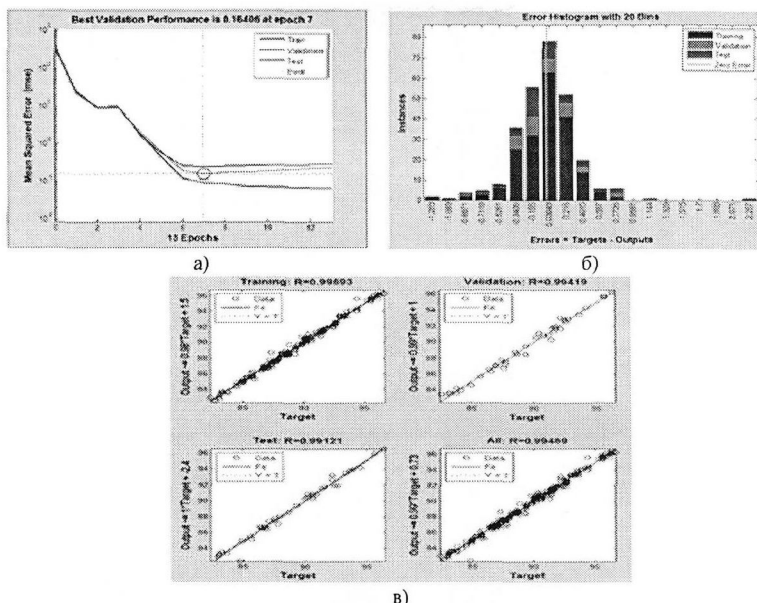


Рис. 11. Оценка качества нейронной сети
 а) Лучшее исполнение проверки; б) Гистограмма ошибки; в) Регрессия

Алгоритм адаптивного управления мощностью ЯР.

Суть предложенного алгоритма заключается в том, что на основе измеренного текущего уровня мощности реактора Φ_p , текущего возмущения реактивности A и применяемых настроек регулятора (K и Z), используя алгоритм нейромодели, рассчитывается нейропрогноз значения мощности реактора Φ_n и затем определяется скорректированная величина разбаланса на входе автоматического регулятора мощности, обеспечивающая уменьшение статической ошибки регулируемой величины.

На рис. 12 изображена структурная схема, предназначенная для реализации алгоритма адаптивного управления с применением принципа (концепции) нейронных сетей. Структурная схема содержит блок адаптивного управления, реализованный в интеллектуальном контроллере, связанный с автоматическим регулятором мощности, и непосредственно объектом управления в данном случае является ядерный реактор. На данной схеме отображены входные и выходные параметры многослойной нейронной сети.

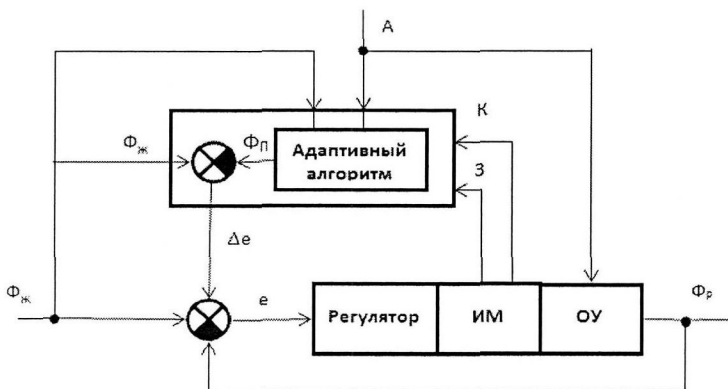


Рис. 12. Структурная схема адаптивного управления

Результаты работы алгоритма адаптивного управления на базе нейронной сети представлены на рис. 13, в том числе отражен процесс обучения адаптивной нейронной сети.

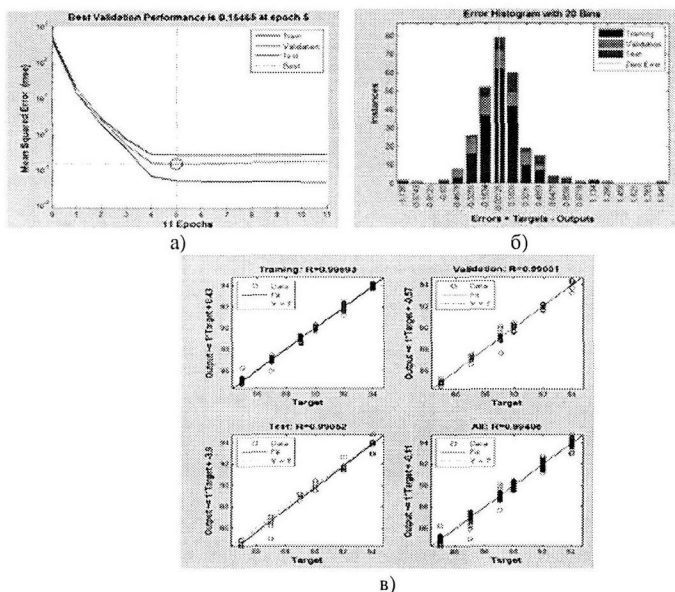


Рис. 13. Оценка качества нейронной сети:

а) Лучшее исполнение проверки; б) Гистограмма ошибки; в) Регрессия

На рис. 13, *а* отображена среднеквадратичная ошибка уровня мощности на валидационном наборе данных для последовательных эпох обучения. На рис. 13, *б* представлено распределение ошибок моделирования процесса обучения в реализованной сети в виде гистограмм, а процесс распределения ошибок для нейронной сети отображен на рис. 13, *в*.

Табл. 2 Результаты оценки качества работы АРМ

Произвольная выборка	$\Phi_{ж}$	K	$З$	A	Φ_p	$Epsilon_1$	Φ_n	Φ_a	$Epsilon_2$
1	85	0,1	0,1	3	87,06	2,06	82,67	84,71	-0,29
2	85	1	1	3	85,8	0,8	84,08	85,57	0,57
3	85	1	2	3	87,08	2,08	83,69	85,76	0,76
4	87	0,1	1	3	87,3	0,3	85,48	87,32	0,32
5	87	1	0,5	-3	84,97	-2,03	89,13	87,19	0,19
6	87	1	2	-3	84,96	-2,04	89,28	87,19	0,19
7	87	1	10	2	88,58	1,58	85,31	86,98	-0,02
8	89	0,1	1	-2	87,73	-1,27	90,32	88,82	-0,18
9	89	1	1	3	89,83	0,83	88,19	89,03	0,03
10	89	1	2	-2	87,75	-1,25	90,33	89,07	0,07
11	89	1	10	-3	86,8	-2,2	91,58	89,05	0,05
12	90	0,1	10	3	92,45	2,45	87,68	89,99	-0,01
13	90	0,1	10	-3	87,4	-2,6	92,57	90,23	0,23
14	90	1	1	3	90,23	0,23	89,36	90,02	0,02
15	90	1	1	-3	87,94	-2,06	92,37	90,1	0,1
16	90	1	3	3	91,87	1,87	87,73	89,71	-0,29
17	90	1	3	-3	87,65	-2,35	92,41	90,24	0,24
18	90	1	10	3	92,73	2,73	87,21	89,62	-0,38
19	90	1	10	-3	87,37	-2,63	92,64	90,11	0,11
20	92	0,1	0,5	-2	90,7	-1,3	93,43	92,11	0,11
21	92	0,1	3	2	93,67	1,67	90,42	91,88	-0,12
22	92	1	0,5	-3	88,8	-3,2	94,38	92,2	0,2
23	92	1	3	3	93,86	1,86	89,99	91,82	-0,18
24	94	0,1	0,5	-2	92,67	-1,33	94,43	93,02	-0,98
25	94	1	0,5	2	95,66	1,66	92,76	94,18	0,18
26	94	1	1	3	96,25	2,25	92,96	94,45	0,45
27	94	1	3	-3	91,89	-2,11	96,17	93,95	-0,05

В табл. 2 представлены результаты работы алгоритма адаптивного управления на базе нейронных сетей, где $\Phi_{ж}$ – желаемый уровень мощности (в процентах), Φ_p – реальная мощность без адаптивного управления (в процентах), Φ_n – рекомендуемый уровень мощности, рассчитанный адаптивным алгоритмом (в процентах), Φ_a – реальный уровень мощности на объекте управления при использовании рекомендуемого адаптивного

алгоритма управления (в процентах), *Epsilon1* и *Epsilon2* – статическая ошибка до и после применения адаптивного алгоритма в процентах.

Из таблицы видно, что при применении предложенного адаптивного алгоритма статическая ошибка *Epsilon1* имеет значительно меньшее значение по сравнению со значением *Epsilon2*, когда управление ведется без применения адаптивного алгоритма. Более наглядно это сравнение показано на рис. 14.

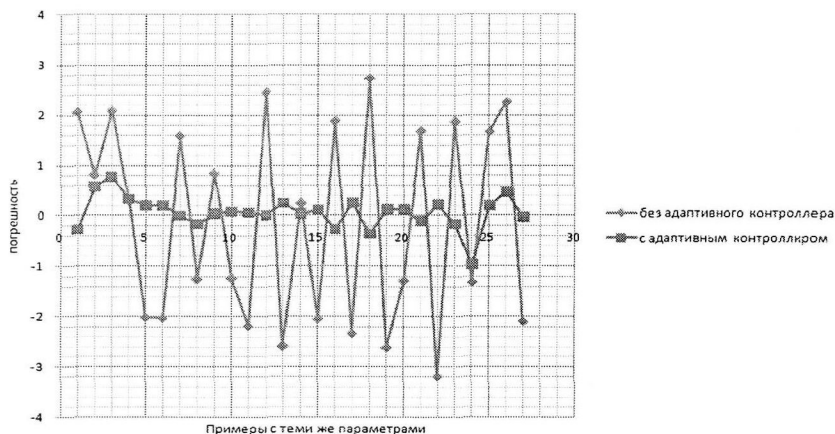


Рис. 14. Сравнительный график статической ошибки уровня мощности

В результате проведения экспериментов для работы автоматического регулятора мощности реактора со штатным алгоритмом и с применением адаптивного алгоритма расчета разбаланса уровня мощности видно, что статическая ошибка регулирования значительно уменьшается, что позволяет повысить качество управления.

В четвертой главе предложена методика, обосновывающая реализацию задачи оптимизации эффективности и надежности при многокритериальном выборе вариантов мажоритарных схем измерительных каналов АСУТП АЭС. В частности предлагается, на основе применения нечетких множеств, оптимизация мажоритарных схем каналов с учетом различия их отказов по последствиям. Автором предложено в качестве базовой задачи решение совокупности нечетких алгоритмов для ранжирования по глобальному критерию, которые включают этапы начальных оценок фазификации, построения правил, дефазификации. Автором проведено сравнение нечетких решений с традиционными решениями. Приводятся программные реализации нечеткого подхода, разработанные в пакете «Fuzzy Logic Toolbox» в MATLAB.

На основе базовой задачи предлагаются двухэтапные варианты информационных технологий с предоставлением пользователю для упрощенного ранжирования полиномов с найденными весами критериев.

АСУТП АЭС включает ряд подсистем, таких как, например, система управления и защиты (СУЗ), управляющая система безопасности технологическая (УСБТ), для которых характерны типовые каналы прохождения сигналов от датчиков к устройствам визуализации или от командных устройств к исполнительным механизмам. Структуры каналов часто имеют схемы с резервированием и, в частности, мажоритарные схемы (рис. 15).

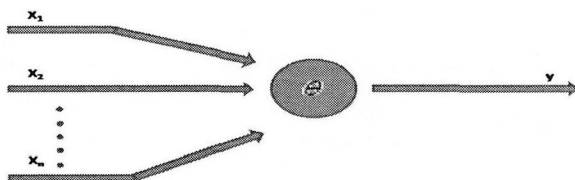


Рис. 15. Структура мажоритарной схемы

Можно отметить, что мажоритарные схемы пропускают сигнал на выход Y , если число сигналов на входах X больше или равно порогу срабатывания $\theta = m$ (m – порог срабатывания, n – число каналов в схеме).

Особенностью таких схем является необходимость учета различных типов отказов, отличаемых по последствиям отказов. В частности, необходимо различать отказы типа «катастрофа» – «к» и отказы типа «ложные срабатывания» – «л». Отказы типа «катастрофа» означают, что отсутствует срабатывание защиты в то время, когда это необходимо. Отказы типа «ложные срабатывания» означают, что произошло срабатывание защиты, когда этого не требуется.

Для выделенной схемы следует найти показатели надежности отдельно для отказов типа «к» и «л». Например, можно оценить вероятности безотказной работы P_k и P_l для схемы из альтернатив или вероятности отказов для той же схемы. Потери от последствий отказов оценить достаточно трудно. Для рассматриваемой схемы всегда есть варианты, отличающиеся кратностью или способом введения резерва, что влияет на достоверность принятого решения.

Тогда задача оптимизации вариантов схем рассматривается как многокритериальная задача с ограничениями, где существуют частные критерии качества, например вероятности P_k и P_l , а также стоимости вариантов C . Веса частных критериев практически неизвестны, но могут быть приблизительно оценены экспертно. В качестве ограничений могут быть взяты требования стандартов или мнения экспертов. Тогда формально требуется на матрице A , где столбцами j являются частные критерии x_j , такие как: P_k, P_l, C ,

строками – варианты i , a ; элементами a_{ij} – оценки значений частных критериев x_j для вариантов, найти оптимальное решение, т.е. лучшие варианты при ранжировании по оценкам глобального критерия X с учетом ограничений.

В качестве примера рассмотрим оптимизацию мажоритарной схемы, в которой варианты возникают при изменении числа каналов n от 1 до 5, и числа порога срабатывания m тоже от 1 до 5 ($i=1, \dots, 15; j=1, \dots, 3$).

На практике для решения данной задачи часто используют простые решения. Имеем матрицу A , ($i=1, \dots, 15; j=1, \dots, 3$), приведенную в табл. 3. В данной таблице P_k, P_n, C – частные критерии: вероятность наступления катастрофы, вероятность ложного срабатывания и стоимость схемы АСУТП (задается оценка для одного элемента $P_k = 0,9, P_n = 0,9, C = (6-n) / 6$), где n – максимальное число используемых каналов. Достаточно большие значения вероятностей P_k и P_n для каждого элемента АСУТП выбраны из соображений, что осуществляется управление сложным и опасным технологическим объектом.

Табл. 3. Оценки надежности для мажоритарной схемы с учетом двух типов отказов по последствиям

Конфигурация	Кат.	Лож.	P_k	P_n	C
1 из 1	1	1	0,9	0,9	0,83
1 из 2	2	1	0,99	0,81	0,66
2 из 2	1	2	0,81	0,99	0,66
1 из 3	3	1	0,999	0,729	0,5
2 из 3	2	2	0,972	0,972	0,5
3 из 3	1	3	0,729	0,999	0,5
1 из 4	4	1	0,999	0,6561	0,33
2 из 4	3	2	0,9963	0,9477	0,33
3 из 4	2	3	0,9477	0,9963	0,33
4 из 4	1	4	0,6561	0,999	0,33
1 из 5	5	1	0,99999	0,59049	0,16
2 из 5	4	2	0,99954	0,91854	0,16
3 из 5	3	3	0,99144	0,99144	0,16
4 из 5	2	4	0,91854	0,9995	0,16
5 из 5	1	5	0,59049	0,99	0,16

В столбцах 2 и 3 табл. 3 приведено число отказов каналов АСУТП, после которых возникает полный отказ системы. Оценки вероятностей даны в соответствии с формулами для вариантов схем, определяемых по таблицам

состояний в теории надежности. Для выбора оптимального варианта при решении той же задачи, с учетом требования простоты и наглядности, можно также использовать метод баллов и метод мест, иными словами традиционные алгоритмы.

Однако простые традиционные методы имеют существенные недостатки: возможны одинаковые оценки для различных вариантов ранжирования, отсутствие учета опыта, предпочтений и стандартов проектирования, по сути, линейный характер оценок, отсутствие учета погрешностей при использовании различных вариантов ранжирования.

Структурная схема предложенного нечеткого алгоритма представлена на рис. 16. Эти данные предлагается обрабатывать при помощи нечеткого алгоритма «Mamdani», который позволяет оценить вклад каждого входного сигнала с учетом его веса и накопленного опыта создателя на этапе созданий правил для алгоритма.

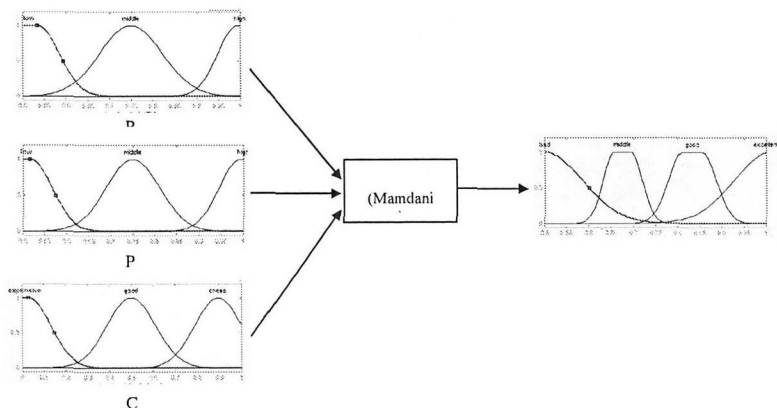


Рис. 16. Структура нечеткого оценивания и ранжирования с алгоритмом Mamdani

Правила нечеткого алгоритма содержат в себе набор условий, которые охватывают всевозможные варианты развивающихся событий. Они учитывают вес каждой входной величины, иными словами каждого входного фактора, тем самым они передают опыт специалиста для выбора наилучшего варианта.

Применены результаты рассматриваемого алгоритма для мажоритарных схем, они представлены в табл. 4. Из пятнадцати вариантов схем, исследованных методом нечеткой логики, видно, что в отличие от традиционных мажоритарных алгоритмов каждый предложенный вариант имеет свою уникальную, не повторяющуюся оценку, где лучший выбор схем получил наивысшую оценку, причем оценки в отличие от традиционных методов имеют различные величины. Были выбраны наилучшие предложенные варианты схем, которые логически соответствуют не формальному выбору по

какому-либо количественному критерию, а выбору с учетом опыта и логического и мышления специалиста.

Экспертная оценка и сравнение традиционного ранжирования с нечетким алгоритмом показывает предпочтительность, как часто происходит, предлагаемой нечеткой технологии. Однако нечеткая технология имеет и недостатки: повышенная трудоемкость, необходимость использования программ работы с нечеткими множествами.

Табл. 4. Ранжирование по нечеткому подходу

Метод Fuzzy		
№	Схема	Оценка
1	2 из 4	0,93
2	2 из 3	0,911
3	3 из 4	0,887
4	3 из 5	0,831
5	2 из 5	0,823
6	1 из 1	0,793
7	4 из 5	0,78
8	1 из 2	0,724
9	1 из 3	0,676
10	1 из 4	0,675
11	1 из 5	0,675
12	2 из 2	0,598
13	4 из 4	0,588
14	5 из 5	0,578
15	3 из 3	0,566

Автором предложено использование нечеткой идентификации весов упрощенного полинома для многокритериальной оптимизации оценки надежности. Упрощенный полином основан на линейных математических алгоритмах, реализованных с применением метода наименьших квадратов (МНК), используя результаты ранжирования по нечеткому подходу. Полином определяется путем нахождения весовых коэффициентов частных критериев для упрощенного ранжирования выбора наилучших решений. В этом заключается суть дополнительной задачи. Использование полученного весового полинома составляет суть предлагаемой упрощенной задачи, которая применяется для быстрых оценок.

Применяя метод наименьших квадратов для решения системы уравнений требуется определить матрицы A и b . При наличии матрицы оценок частных критериев A и найденных по нечеткому алгоритму оценок вектора глобального

критерия b , на основе формулы (1), можно решить систему уравнений, где:

$$A = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.9 & 0.833333333 \\ 0.99 & 0.81 & 0.666666667 \\ 0.81 & 0.99 & 0.666666667 \\ 0.999 & 0.729 & 0.5 \\ 0.972 & 0.972 & 0.5 \\ 0.729 & 0.999 & 0.5 \\ 0.999 & 0.6561 & 0.333333333 \\ 0.9963 & 0.9477 & 0.333333333 \\ 0.9477 & 0.9963 & 0.333333333 \\ 0.6561 & 0.999 & 0.333333333 \\ 0.99999 & 0.59049 & 0.166666667 \\ 0.99954 & 0.91854 & 0.166666667 \\ 0.99144 & 0.99144 & 0.166666667 \\ 0.91854 & 0.99954 & 0.166666667 \\ 0.59049 & 0.99999 & 0.166666667 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0.793261 \\ 0.724082 \\ 0.598772 \\ 0.676075 \\ 0.930026 \\ 0.566622 \\ 0.675616 \\ 0.911458 \\ 0.887942 \\ 0.588204 \\ 0.675614 \\ 0.82352 \\ 0.83153 \\ 0.780381 \\ 0.578131 \end{bmatrix}$$

Для нахождения матрицы X требуется решить следующее уравнение:

$$Ax = b. \quad (1)$$

Используя оператор псевдо инверсии, решение можно переписать в виде формулы:

$$x = A^+b. \quad (2)$$

После решения системы уравнений упрощенный полином можно представить так:

$$W = \sum (d_j \times x_j), \quad (3)$$

где x_j – искомые веса критериев, d_j – частные критерии (решается, например, в программах MATLAB). Применяя метод МНК, получим следующие величины для d_j : $x_1 = 0,58$, $x_2 = 0,27$, $x_3 = 0,07$, где $d_1 = P_k$, $d_2 = P_n$, $d_3 = C$.

В итоге получим:

$$W = 0.58P_k + 0.27P_n + 0.07C., \quad (4)$$

Результаты применения рассматриваемого метода для мажоритарных схем представлены в табл. 5. Анализ полученных результатов ранжирования при применении предлагаемого метода по сравнению с рассматриваемой нечеткой технологией также дают достаточно хороший результат.

Для проверки предлагаемых интеллектуальных алгоритмов было проведено сравнение результатов работы мажоритарной логики выбора достоверных каналов передачи информации, основанных на линейных

математических алгоритмах, реализованных с применением метода наименьших квадратов с результатами, полученными с использованием нечеткой логики, результаты которых представлены на рис. 17.

Табл. 5. Ранжирование по методу упрощенного полинома

Метод упрощенного полинома		
№	Схема	Оценка
1	2 из 3	0,866
2	2 из 4	0,861
3	3 из 5	0,858
4	3 из 4	0,846
5	1 из 2	0,845
6	2 из 5	0,843
7	1 из 1	0,829
8	4 из 5	0,817
9	1 из 3	0,816
10	2 из 2	0,788
11	1 из 4	0,784
12	1 из 5	0,755
13	3 из 3	0,731
14	4 из 4	0,676
15	5 из 5	0,625

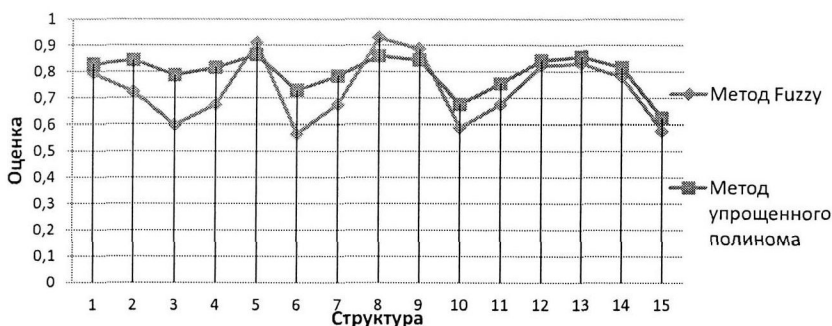


Рис. 17. Сравнительные результаты применения алгоритма нечеткой логики и метода упрощенного полинома

Сравнение показало, что оба метода дают сопоставимые результаты, при этом метод наименьших квадратов целесообразно использовать для проведения экспресс – оценок, а метод, основанный на использовании нечеткой логики, целесообразно использовать для более глубокого анализа.

В заключении приводятся основные теоретические, экспериментальные и практические результаты диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации разработаны алгоритмы и модели на основе принципов искусственного интеллекта для создания систем контроля и управления в АСУТП ЯЭУ, с целью повышения надежности, эффективности и качества регулирования.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1) Анализ современных систем управления показал, что применение интеллектуальных алгоритмов управления повсеместно все больше и больше проникает в различные отрасли народного хозяйства. Но в атомной отрасли до настоящего времени данные интеллектуальные алгоритмы не нашли широкого применения.

2) С целью формирования и отработки технологии создания интеллектуальных алгоритмов управления был исследованы тестовые примеры реализации интеллектуальных методов управления и прогнозирования показателей функционирования системы управления типовыми объектами на базе алгоритмов нечеткой логики и нейронных сетей. Достоверность результатов прогнозирования и управления по разработанной методике для данного класса задач была подтверждена экспериментально.

3) Предложен интеллектуальный метод оптимизации параметров регулятора мощности ядерного реактора, основанный на применении нечеткого алгоритма для выбора его оптимальных настроек. Были проведены эксперименты на компьютерном многофункциональном анализаторе реактора ВВЭР 1000, которые показали положительный эффект от применения интеллектуальных технологий, позволяющий повысить качество регулирования.

4) Предложен адаптивный алгоритм коррекции параметров автоматического регулирования мощности ядерного реактора, Данный алгоритм позволяет на основе опыта нейронной сети формировать корректирующее значение разбаланса мощности, в зависимости от внешних возмущений ядерного реактора и текущих настроек регулятора, для улучшения качества регулирования, в частности, уменьшения статической ошибки и перерегулирования в контуре управления мощностью ЯР.

5) Исследована задача оптимизации выбора мажоритарной схемы каналов контроля и управления в АСУТП АЭС при применении мажоритарной

логики для задач повышения эффективности и надежности АСУТП. Предложены алгоритмы оценки на базе нечеткой логики, а также основанной на этой базе метод экспресс-анализа схем резервирования каналов контроля.

б) Применение разработанных интеллектуальных алгоритмов позволяет проводить эффективные исследования в области развития методов управления техническими системами и проектировать элементы систем контроля и управления сложными технологическими объектами, в том числе компоненты АСУТП АЭС.

Основные публикации по теме диссертации

I. Публикации в журналах, включенных ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых научных журналов

1. Жучков А.А., Кульшин А.В., Альмасри Х.Ф. Типовые задачи нечеткого управления, контроля и прогноза в АСУ ТП тепловых и атомных объектов [Текст] / А.А. Жучков // Вестник МИФИ. – 2013. – Т. 2, № 4. – С. 490-295.
2. Жучков А.А., Альмасри Х.Ф. Нечеткая оптимизация надежности и идентификация весов для многокритериального выбора вариантов схем АСУ ТП ядерных реакторов и АЭС [Текст] / А.А. Жучков // Вестник МИФИ. – 2015. – Т. 4, № 1. – С. 85-91.
3. Альмасри Х.Ф. Нейросетевые варианты адаптивного регулирования мощности ядерного реактора ВВЭР 1000 [Текст] / Х.Ф. Альмасри // Глобальная ядерная безопасность. – 2016, № 3(20). – С. 76-82.

II. Публикации в других журналах

4. Жучков А.А., Кульшин А.В., Альмасри Х.Ф. Возможности интеллектуального нечеткого управления (контроль прогнозирование кластеризация) в АСУ ТП АЭС и тепловых объектов. // Сб. статей МНТК. – Пенза, 2013. – с 328-331.
5. Жучков А.А., Кульшин А.В., Альмасри Х.Ф. Реализация и сравнительные исследования нечеткого интеллектуального управления при натурном и компьютерном моделировании для АСУ ТП тепловых объектов. // Сб. статей МНТК. – Пенза, 2013. – с.331-334.

III. Публикации в материалах научных конференций

6. Жучков А.А., Альмасри Х.Ф. Типовые задачи нечеткого управления, контроля и прогноза в АСУТП тепловых и атомных объектов. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013. Аннотации докладов. – Т.1. – М., 2013.
7. Жучков А.А., Альмасри Х.Ф. Нечеткая оптимизация надежности вариантов схем АСУ ТП ядерных реакторов. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов. – Т.1. – М., 2014.

8. Жучков А.А., Альмасри Х.Ф. Нечеткая оптимизация весов для многокритериальной оптимизации надежности подсистем АСУ ТП ядерных реакторов. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов. – Т.1. – М., 2014.
9. Жучков А.А., Альмасри Х.Ф. Нечеткие оценки функциональной безопасности и рейтингов надежности вариантов схем АСУ ТП ядерных реакторов АЭС. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015. Аннотации докладов. – Т.1. – М., 2015.
10. Жучков А.А., Альмасри Х.Ф. Нечеткие и нейросетевые варианты прототипа коррекции автоматического регулятора мощности в АСУ ТП ядерного реактора АЭС. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015. Аннотации докладов. – Т.1. – М., 2015.

Подписано в печать: 22.11.2016

Заказ № 11705 Тираж - 100 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(977) 518-13-77 (499) 788-78-56

www.autorferat.ru