

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УДК 004.891.3



На правах рукописи

**ЧЕРНОВА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА**

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ  
МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Специальность: 05.13.06. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Набережные Челны – 2016 г.

Работа выполнена на кафедре «Автоматизации и управления» в Набережночелнинском институте (филиале) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
Набережночелнинского института (филиал)  
ФГАОУ ВО К(П)ФУ, заведующий кафедрой  
«Автоматизации и управления»  
**Симонова Лариса Анатольевна**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
кафедры автоматизированных систем  
управления ФГБОУ ВПО «Уфимский  
государственный авиационный технический  
университет»  
**Куликов Геннадий Григорьевич**

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ  
ВПО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»,  
заведующий кафедрой автоматизированных  
систем управления  
**Андреев Сергей Михайлович**

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ»

Защита состоится «25» марта 2016 г. в 14:00 на заседании  
диссертационного совета Д 212.081.31 в Набережночелнинском институте  
(филиале) ФГАОУ ВО Казанского (Приволжского) федерального  
университета по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира,  
13А, УЛК-5, ауд. 309.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО Казанского  
(Приволжского) федерального университета и на сайте <http://kpfu.ru>.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 423810, Татарстан, г.  
Набережные Челны, пр. Мира, 68/19, в диссертационный совет Д 212.081.31.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



к. т. н., доцент  
Мавлеев Ильдус Рифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Управление технологическими комплексами нанесения покрытий вызвано необходимостью получения заданных показателей качества технологического процесса и обеспечения необходимых их физико-химических свойств. Модификация поверхностного слоя деталей и инструмента получила широкое распространение в машиностроении. Это позволяет придавать поверхности необходимое качество по заданным эксплуатационным требованиям. Внедрение автоматизированных систем управления технологическими комплексами модификации поверхностей приводит к высоким показателям качества и стабильности параметров поверхностного слоя деталей. Это обосновано высокой производительностью и эффективностью процесса нанесения покрытий.

Несмотря на то, что существующие системы управления технологическими комплексами автоматизированы, обнаружение причин неполадок блоков комплекса является трудоемким процессом. Контроль параметров технологического процесса и диагностирование работоспособности установок затруднено вследствие быстро протекающих процессов в высокоэнергетических установках. В этом случае обработка и анализ полученных результатов значений параметров технологического процесса с выдачей управляющих воздействий на исполнительные механизмы в реальном времени практически невозможны.

Использование предыдущего опыта по анализу отклонений от номинальных значений параметров технологического процесса возможно с использованием элементов искусственного интеллекта.

Исследованиям в области применения методов и алгоритмов интеллектуальных систем управления посвящены работы: Городецкого В.И., Вулриджа М., Хьюита С., Инмана Д., Фербера Д., Вагнера Г., Карцана И.Н., Макарова И.М., Ходашинского И.А., Никитина А. П., Константинова А. В., Писарева А. С., Поспелова Д.А., Тарасова В.Б. и др.

Эффективность системы управления технологическими комплексами модификации поверхностей в значительной мере предопределяется научной обоснованностью принимаемых решений и своевременностью управляющих воздействий на исполнительные механизмы. В связи с этим поставлена задача по разработке системы управления технологическим процессом напыления покрытий и обеспечения требуемых показателей качества продукции (адгезию, толщину напыляемого слоя, отсутствие дефектов на поверхности детали, равномерность модифицированного слоя, механические характеристики и т.п.). Выбор рациональных режимов технологического процесса напыления покрытий требует проведения большого количества экспериментальных исследований, сравнительного анализа их результатов с результатами решения оптимизационной задачи. Это приводит к дополнительным временным потерям и финансовым затратам. Исключение взаимопроверяющих требований к системе управления достигается применением комплексного подхода к ее разработке, аккумулирующего в

себе теорию, практику и экспериментальные исследования. Решение данной задачи позволяет применение методов искусственного интеллекта.

Комплексный подход к разработке технологического процесса дает возможность корректировки режимов модификации поверхностного слоя и выявления скрытых взаимосвязей показателей качества покрытия с параметрами технологического комплекса.

Использование элементов искусственного интеллекта в системах управления технологическими комплексами недостаточно полно отражено в технической литературе. Исследования показали, что их применение позволяет повышать качество технологического процесса.

Необходимость создания системы управления технологическим комплексом по напылению покрытий с применением элементов искусственного интеллекта и возможностью ее адаптации к изменению входных параметров и возмущающих воздействий является **актуальной** задачей.

**Объект исследования** - управление технологическим процессом напыления покрытий с элементами искусственного интеллекта.

**Предметом исследования** является система управления технологическим комплексом, реализующая обработку информации с периферийных устройств на основе использования элементов искусственного интеллекта.

**Цель исследования** - повышение эффективности технологического процесса модификации поверхностей деталей за счет внедрения системы управления с элементами искусственного интеллекта.

Для достижения поставленной цели была определена следующая **задача**: разработка системы и способа управления технологическим комплексом напыления с использованием элементов искусственного интеллекта, выбор оптимальных режимов технологического процесса напыления на основе анализа его параметров и определение зависимостей выходных сигналов от характеристик датчиков диагностирования.

Для достижения поставленной цели и решения научной задачи сформулированы следующие **основные вопросы** диссертационного исследования:

1. На основе анализа патентно-информационных исследований систем управления технологическими процессами и комплексного подхода разработать многоуровневую структурную модель системы управления технологическим комплексом напыления покрытий.

2. Разработать математическую модель системы управления технологическим комплексом нанесения покрытий с целью выбора рациональных режимов.

3. Разработать методику комплексного подхода к синтезу систем автоматического управления технологическим комплексом, обеспечивающего требуемые показатели качества модифицированного слоя поверхности деталей.

4. Разработать способ управления технологическим комплексом напыления покрытий для повышения эффективности принимаемых решений в системе управления с применением нечеткой логики.

5. Определить влияние параметров технологического процесса на выходные сигналы с системы управления с целью диагностики работоспособности технологической установки.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач в работе использовались: теория системного анализа; методы построения систем с использованием искусственного интеллекта, метод имитационного моделирования.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов работы обеспечивались корректным применением известных научных методов исследования и обработки данных, современного математического аппарата, а также проверкой эффективности внедрения программного комплекса.

В процессе диссертационного исследования получены следующие результаты, обладающие **научной новизной**:

1. Разработана многоуровневая структурная модель системы управления технологическим процессом напыления покрытий на основе многоагентной системы, обеспечивающая достижение заданных показателей качества.

2. Рассчитаны зависимости управляющих выходных сигналов с системы управления по показаниям датчиков, снимаемых в реальном времени хода технологического процесса для повышения точности диагностирования блоков технологической установки.

3. Разработан способ управления технологическим комплексом напыления покрытий для повышения эффективности принимаемых решений с применением нечеткой логики.

4. Разработана математическая модель, на основе многоагентной структуры системы управления экспериментальной технологической установкой, позволяющая рассчитать параметры технологического процесса на этапе его моделирования.

#### **Общетеоретическая значимость и практическая ценность.**

Диссертационное исследование проведено в рамках научно-исследовательской работы «Построение интеллектуальной системы проектирования, подготовки и управления в машиностроительном производстве» рег. номер ЦИТИС 01201365666. Оно связано с разработкой математической модели и способа управления технологическим комплексом напыления покрытий на основе нечеткой логики программного обеспечения поддержки принятия решения на базе методов искусственного интеллекта для технологических установок.

Результаты диссертационной работы внедрены и использованы в Технологическом центре ПАО «КАМАЗ», в ОАО РЦИ «КАИ-Лазер» и учебном процессе Набережночелнинского института (филиал) ФГАОУ ВО Казанского (Приволжского) федерального университета.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

В соответствии с формулой специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» в диссертации приведены теоретические основы в соответствии с пунктом 4 паспорта, позволяющие разработку математической модели, на основе многоагентной структуры системы управления с оптимизацией параметров технологического процесса на этапе его моделирования. В соответствии с пунктом 14 паспорта, в диссертации приведены теоретические исследования, позволяющие разработку алгоритмов диагностирования блоков технологической установки на основе зависимости управляющих выходных сигналов с системы управления по показаниям датчиков, снимаемых в реальном времени. В соответствии с пунктом 15 паспорта, в диссертации содержатся теоретические и экспериментальные исследования, позволяющие разработку способа управления технологическим комплексом для повышения эффективности процесса модификации поверхностей деталей с применением нечеткой логики. В соответствии с пунктом 16 паспорта, приведены теоретические основы и алгоритмы построения экспертных систем с разработкой многоуровневой структурной модели системы управления технологическим процессом нанесения покрытий.

**Личный вклад** автора в диссертационную работу заключается в выборе и обосновании методики выполнения теоретических и экспериментальных исследований, включая разработку структурной модели системы управления и формирования правил управления технологической установкой на основе нечеткой логики, анализе и обобщении полученных данных.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты, полученные в работе, опубликованы в статьях, доложены и обсуждены на заседаниях кафедры «Автоматизации и управления» в 2013-2015 г.г., а также международных научных и научно-практических конференциях: VIII-я Международная (заочная) научно-техническая конференция. Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации (г. Курск, 2010). Камская государственная инженерно-экономическая академия «Камские чтения» (г. Набережные Челны, 2011). Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии. Автоматизация. Актуализация и решение проблем подготовки высококвалифицированных кадров (ИТАП-2011)» (дистанционная форма) (г. Набережные Челны, 2011). Материалы VIII Международной научной конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (Курск, 2011). «III Камские чтения» межрегиональная научно-практическая конференция (г. Набережные Челны, 2011). «Перспективы развития информационных технологий» (г. Новосибирск, 2012). Публикации в журналах: World Applied Sciences Journal (2013). Вестник Казанского технологического университета (2013). Вестник Казанского технологического университета (2014) Социально-экономические и технические системы: Исследование, проектирование, оптимизация (г. Набережные Челны, 2015).

**Структура и объем диссертации:** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, включающего 91 наименование. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков, 23 таблицы.

**Публикации:** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 статьи SCOPUS, а так же 7 статей в материалах Международных, Всероссийских и Республиканских конференций.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрыта актуальность задачи по разработке системы и способа управления технологическим комплексом с использованием элементов искусственного интеллекта. По выбору оптимальных режимов технологического процесса напыления покрытий на основе анализа его параметров и определение зависимостей выходных сигналов от характеристик датчиков диагностирования. Сформулированы цель и основные решаемые вопросы диссертационной работы, показана научная новизна и общетеоретическая значимость, и практическая ценность диссертации. Представлены сведения о структуре диссертации.

**В первой главе** проведен патентно-информационный обзор по системам управления технологическими установками модификации поверхностей деталей с выявлением особенностей заданного технологического процесса. Дана характеристика поставленной задачи, изложены предпосылки и необходимость исследований в данной области.

Проведенный обзор показал, что в рассмотренных автоматизированных системах управления технологическим процессом напыления покрытий УНИП-900, VACLEADER и др. использование накопленных результатов исследований затруднено из-за отсутствия взаимосвязи качества напыляемого слоя с параметрами технологического процесса. Диагностирование параметров блоков системы управления выполняется с участием оператора, что является трудоемким процессом, приводит к временным затратам.

В рассматриваемых системах качество продукции будет известно только после извлечения изделия из камеры. Автоматизированные системы управления используются в определенном классе установок. Расширение класса технологических установок по напылению покрытий возможно за счет использования современных систем управления.

Для повышения показателей качества технологического процесса необходимо внедрять в систему управления интеллектуальные надстройки управления. Обзор существующих надстроек интегрированных и инструментальных сред G2 (Gensum corp., США) и системы GURU (Micro Data Base System), показал, что данные решения обладают высокой стоимостью и сопровождаются трудностями при внедрении.

В процессе анализа моделей представления знаний было отдано предпочтение продукционной, основанной на правилах, модели. Она отличается высокой модульностью правил: при добавлении или изменении правила, все, что было создано ранее, сохраняет актуальность.

Проанализировав рассмотренные решения задач по управлению технологическим комплексом напыления покрытий, был выбран логический подход с использованием элементов искусственного интеллекта, как наиболее предпочтительный. Использование нечеткой логики позволит уйти от однозначных формулировок закономерностей.

Разработанная система управления технологическими комплексами модификации поверхностей диагностирует работу узлов установки, формирует управляющие воздействия на основе базы знаний. По ходу технологического процесса формируются база прецедентов и база знаний.

**Во второй главе** разработана структурная модель системы управления для сопровождения процесса нанесения покрытий. Логические функции в этой системе распределены по трем уровням. Нижний уровень производит сбор и передачу аналоговых и цифровых данных. Средний уровень реализует управление в режиме реального времени, связан как с уровнем 1, так и с уровнем 3. Верхний уровень содержит интеллектуальную надстройку, осуществляющую оптимизацию в целом, обработку и анализ информации, поступающей с нижних уровней. Система управления иерархическая, 3 уровня выделено согласно подчиненности устройств.

На нижнем уровне, для получения более полной информации об объекте, в систему автоматического управления - на примере конкретного оборудования, установки УВН-4М – дополнительно установлены датчики. Информация с аппаратуры нижнего уровня передается на модули удаленного ввода - вывода, а затем на контроллер. Система имеет возможность расширения, посредством добавления измерительной аппаратуры и исполнительных механизмов.

Второй уровень системы управления реализует оперативное управление. Вся информация выводится на дисплее оператора в режиме реального времени. Реализована возможность накопления статистики по параметрам технологического процесса на сервере scada-системы, хранение архива. Оператор необходим в системе при возникновении нештатных ситуаций, для отладки режима нанесения покрытий, а так же подготовки и загрузки заготовок, выгрузки обработанных изделий.

Верхний уровень системы представляет собой интеллектуальную надстройку для анализа информации, получаемой с нижних уровней, диагностирования узлов установки.

На рисунке 1 представлена структурная модель 3 - х уровневой системы управления процессом нанесения покрытий в технологическом комплексе.



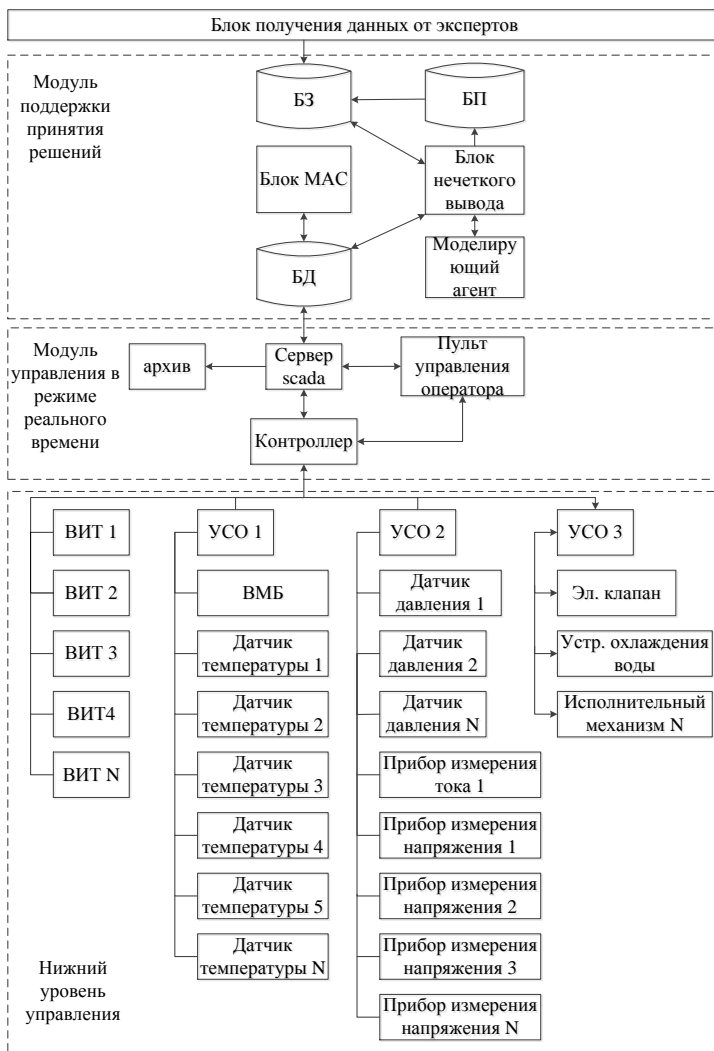


Рисунок 1. – Структурная модель 3 - х уровневой системы управления процессом нанесения покрытий в технологическом комплексе.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: БЗ – база знаний, МАС – многоагентная система, БП – база прецедентов, БД – база данных, УСО – устройство согласования с объектом, ВИТ - Вакуумметр комбинированный ионизационно-тепловой, ВМБ - вакуумметр магнитный блокировочный.

Основой системы является база знаний, которая хранит в себе информацию о параметрах протекающих процессов нанесения покрытий с заданной точностью. Эти данные хранятся в виде математических

зависимостей и практического опыта, формализация этих знаний выполнена в виде продукционных правил. Выявленные и утвержденные закономерности преобразованы в правила и занесены в базу знаний. Для базы знаний использована продукционная модель представления знаний, которая обеспечивает наглядность, высокую модульность, легкостью внесения дополнений и изменений и простотой механизма логического вывода. База знаний имеет матричную структуру, в которой знания выражены в явном виде и организованы так, чтобы упростить принятие решений.

Структурная схема установки разбита на звенья. Для получения параметров, описывающих состояние каждого звена, ее оснастили дополнительными датчиками. В ходе процесса напыления осуществляется сбор информации со всех контрольных точек установки, на значения каждого датчика заданы пределы отклонений. Это обеспечивает необходимую достаточность контроля параметров. Результаты заносятся в базу данных. В ней реализована возможность архивирования, построения отчетов и т.п. Для обработки набора данных применяется блок многоагентной системы (МАС) (рисунок 2).

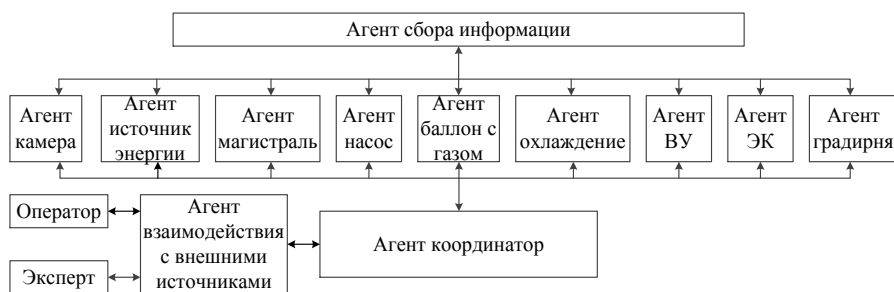


Рисунок 2. - Структура МАС.

Все новые зависимости из базы прецедентов анализируются в блоке проверки правил на соответствие общепринятым. После добавления в базу знаний новых зависимостей, система более точно диагностирует состояния узлов установки, что приводит к снижению брака.

**В третьей главе** разработан способ управления установкой напыления покрытий.

Оператор корректирует параметры технологического процесса, и заново опрашиваются агенты. Такие корректировки происходят до тех пор, пока система не выдаст сообщение о нормальном состоянии протекания процесса. Полученная новая закономерность заносится в базу данных технологического процесса.

Если отклонения превышают заложенные экспертами допуски, включается моделирующий агент, который выполняет адаптацию отклонений к существующим правилам. После моделирования система выдает сообщение оператору о причинах отклонений параметров и предлагает меры для их

устранения. Если система не отработала отклонения, в работу включается эксперт. Эксперт либо подтверждает новую закономерность, либо выполняет корректировку существующих правил. При этом на основе анализа характеристик влияния значимых параметров делает предположения о причинах отклонения. Таким способом образуются новые знания, которые используются для последующего управления технологическим процессом производства.

База прецедентов основана на данных, обработанных с использованием методов многоагентной системы. Под прецедентом понимается зафиксированное отклонение состояния ключевых звеньев системы.

После взаимодействия агентов формируется выражение, затем осуществляется поиск похожего правила в базе знаний. В случае отсутствия полного совпадения из базы выбирается максимально близкое выражение. Затем производится сравнение, начиная с наиболее значимых параметров. В зависимости от степени совпадения правила и нового выражения производится его оценка. Зафиксированное состояние значений параметров либо превращается в прецедент, который заносится в базу прецедентов, либо производится запись только в базе данных.

В первую очередь происходит сбор данных с аппаратных средств, декомпозиция и определение состояния измерительных элементов, затем формирование агентами локального представления о состоянии объекта.

После этого составляется общая картина течения технологического процесса, проверяется на соответствие правилам. Если система не находит идентичного правила в базе знаний, то происходит проверка схожести текущей ситуации с правилами с выделением отличного от определенного в правиле значения. Если хватает информации для принятия решения, то новый вид правила становится допустимым и заносится в базу прецедентов. Если решение принять невозможно, то привлекаются эксперты, дорабатывают правило. Новое правило также заносится в базу знаний (рисунок 3).

Дальнейшее пополнение базы знаний возможно следующими способами: от эксперта и на основе базы прецедентов. Каждый запуск технологического процесса напыления покрытий имеет свои особенности. Анализ накопленного технологического опыта, выявленных зависимостей дает эксперту возможность выделить новые правила и также добавить их в базу знаний. Второй вариант на основе зафиксированных прецедентов. База знаний пополняется утвержденными правилами.

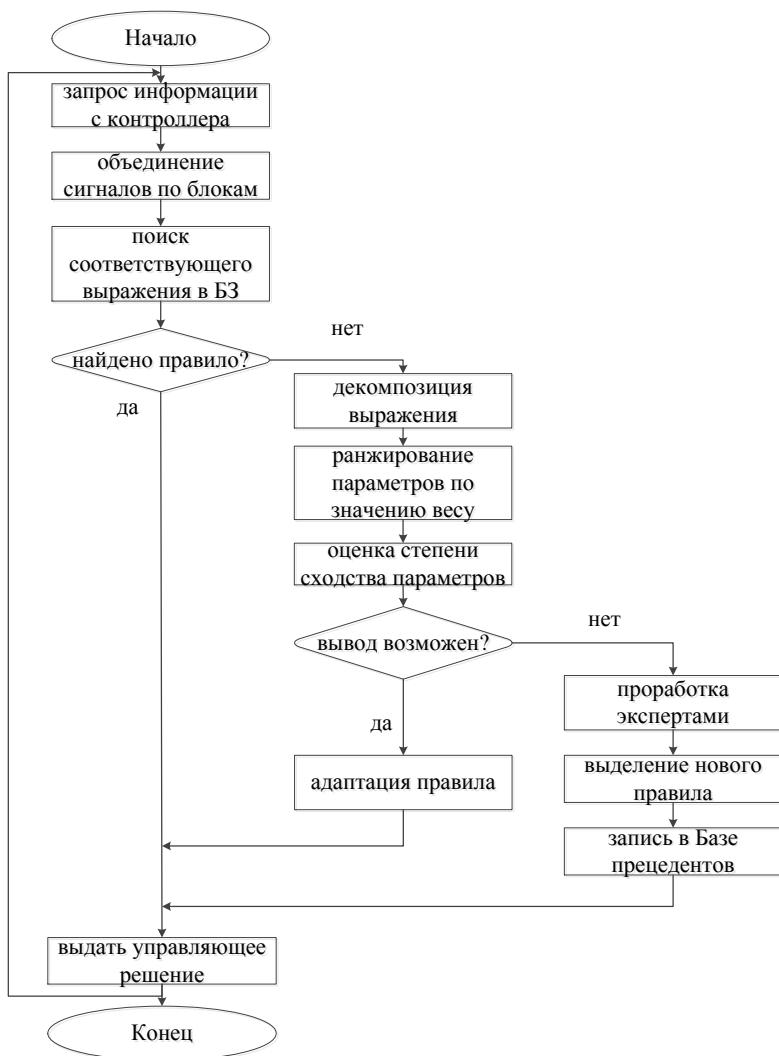


Рисунок 3. - Алгоритмы формирования базы прецедентов

Применение математической модели системы управления установкой для численного моделирования параметров процесса напыления, позволило оптимизировать режим технологического процесса.

Построена математическая модель системы на основе многоагентной структуры.

Передаточные функции агентов (Таблица 1).

Таблица 1. - Передаточные функции агентов

Элемент	Передаточная функция
Агент охлаждения	$W(p) = \frac{(0.0005p + 0.015)(0.0045p + 0.15)(0.006p + 0.2)}{(0.00003p^3 + 0.0043p^2 + 0.14p + 0.99)(0.03p + 0.99)(0.03p + 0.99)}$
Агент магистраль	$W(p) = \frac{(0.000025p + 0.025)(0.000025p + 0.00025)}{(0.00001p^3 + 0.0021p^2 + 0.12p + 0.99)(0.00001p^3 + 0.0021p^2 + 0.12p + 0.99)}$
Агент камера	$W(p) = \frac{(0.003p + 0.15)(0.0006p + 0.06)}{0.0002p^2 + 0.0297p + 0.98}$
Агент насос	$W(p) = \frac{0.0015p + 0.15}{0.01p + 0.99}$
Агент баллон с газом	$W(p) = \frac{0.0025p + 0.25}{0.00001p^3 + 0.0021p^2 + 0.12p + 0.99}$
Агент источник энергии	$W(p) = \frac{0.000006p + 0.0006}{0.01p + 0.99}$
Агент – электромагнитный клапан – АЭ1	$W(p) = 0.25p$
Агент – градирня - АГс	$W(p) = \frac{0.25}{0.1 \cdot p + 1} \cdot \frac{0.2}{0.1 \cdot p + 1}$
Агент – координатор - АК	$W(p) = p$

Разработан способ взаимодействия ключевых звеньев на примере установки УВН-4М. Под звеном понимаем не только физическую часть комплекса, а так же программу, делающую интеллектуальный вывод, которую будем называть агентом.

Все взаимодействия агентов для наибольшей наглядности представлены в виде графа  $A \rightarrow B, C$ . Вершинам (B) графа соответствуют агенты защиты, а рёбрам (C) – процесс передачи того или иного типа сообщений, которыми они обмениваются в зависимости от ситуации (рисунок 4).

Присвоим следующие обозначения:

Агент – камера – А1;

Агент – источник энергии – А2;

Агент – магистраль – А3;

Агент – насос – А4;

Агент – баллон с газом – А5;

Агент - охлаждение – А6;

Агент – выключение установки – АВ;

S1-S16 – сигналы с датчиков;

Агент – электромагнитный клапан – АЭ1;

Агент – градирня - АГ;

Агент – координатор – АК.

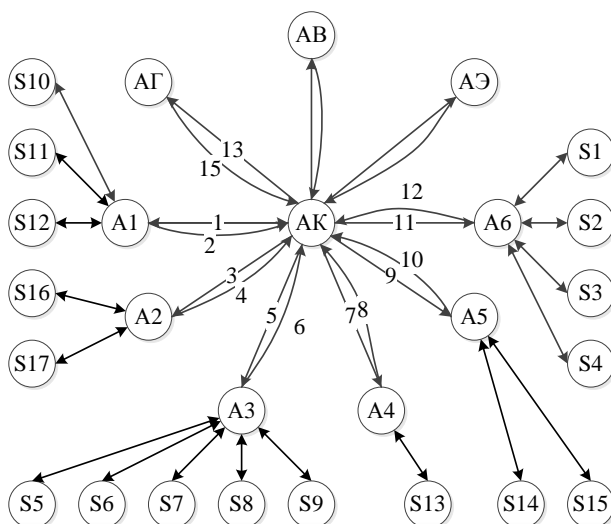


Рисунок 4. – Граф переходов сигналов между агентами

Посылается сообщение агента-координатора агенту-камере А1. Затем посылается ответное сообщения агенту-координатору о состоянии агента А1. Далее взаимодействие продолжается, посылаются агентом-координатором сообщения агентам в соответствии со степенью интенсивности взаимовлияния, схема которого отражена в базе знаний. Также в базе знаний происходит определение содержания сообщения. Если значение переменной состояния очередного опрашиваемого агента 1, то агенту-координатору отсылается сообщение, что процесс проходит в нормальном режиме. Если значение переменной 0, агент посылает сообщение об этом агенту-координатору, завершает опрос других агентов, ищет в базе правило, если находит, то агент-координатор посылает сообщение агенту прерывания работы с требованием выключения установки. Агент выключения установки передает сведения агенту-координатору об удачной или неудачной попытке отключения и выводится сообщение оператору.

Программный агент - координатор управляет потоками сообщений агентов.

В данной системе две разновидности кооперативных отношений: запрос/ответ сведений у агента: запрос(QIP), ответ(ANSWER), и требование выполнения агентом определенных действий при некотором условии (RWIP). Взаимодействуют лишь агенты, которые соответствуют друг другу и поставленной задаче. В таблице 2 приведен пример взаимодействия агентов.

Таблица 2. - Взаимодействие агентов.

Номер дуги	Ребро графа	Тип сообщения	Действие агента
------------	-------------	---------------	-----------------

1	<AK,A1>	QIP	Запрос о значении состояния агента
2	<A1,AK>	ANSWER	Передача значения состояния агента =1
3	<AK,A2>	QIP	Запрос о значении состояния агента
4	<A2,AK>	ANSWER	Передача значения состояния агента = 1
5	<AK,A3>	QIP	Запрос о значении состояния агента
6	<A3,AK>	ANSWER	Передача значения состояния агента = 0
7	<AK,A4>	QIP	Запрос о значении состояния агента
8	<A4,AK>	ANSWER	Передача значения состояния агента =1
9	<AK,A5>	QIP	Запрос о значении состояния агента
10	<A5,AK>	ANSWER	Передача значения состояния агента = 1
11	<AK,A6>	QIP	Запрос о значении состояния агента
12	<A6,AK>	ANSWER	Передача значения состояния агента = 0
13	<AK,AG>	RWIP	Требование запуска градирни
14	<AG, M>	Message	Объясняющее сообщение оператору
15	<AG,AK>	ANSWER	Сообщение об удачном/неудачном запуске

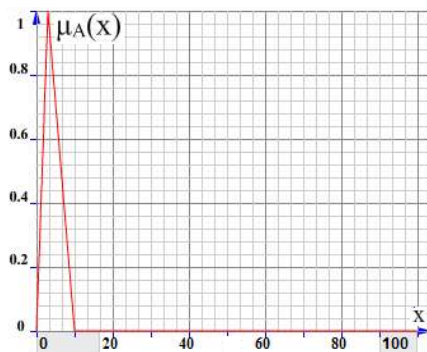
При этом взаимодействие происходит между агентами, которые соответствуют друг другу и поставленной задаче.

Управление системой основано на элементах искусственного интеллекта. За счет применения нечеткой логики выполнена оптимизация технологического процесса, путем выбора наилучшего управляющего решения в каждый момент времени. Если для четких множеств результатом вычисления характеристической функции могут быть только два значения – 0 или 1, то для нечетких множеств это количество бесконечно, но ограничено диапазоном от нуля до единицы.

Для примера была взята установка УВН-4М, предназначенная для нанесения покрытий на поверхность изделий различной геометрической формы. Экспертом выбрана треугольная функция принадлежности.

Значение температуры преобразуется в термины естественного языка представленное тремя значениями: «низкая», «нормальная», «высокая». Пример перехода от измеренного значения к его «нечеткой» интерпретации, переменной «температура воды на входе» (рисунок 5).

$$\mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x}{3}, & 0 \leq x \leq 3 \\ \frac{10-x}{7}, & 3 \leq x \leq 10 \\ 0, & x \geq 10 \end{cases}$$



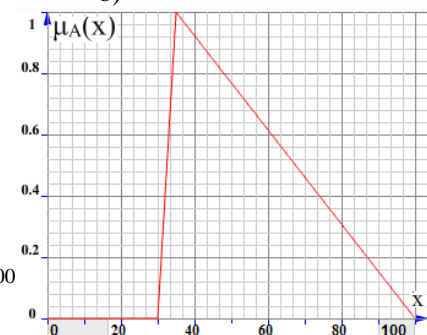
a)

$$\mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 10 \\ \frac{x-10}{10}, & 10 \leq x \leq 20 \\ \frac{30-x}{10}, & 20 \leq x \leq 30 \\ 0, & x \geq 30 \end{cases}$$



b)

$$\mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 30 \\ \frac{x-20}{15}, & 20 \leq x \leq 35 \\ \frac{100-x}{65}, & 35 \leq x \leq 100 \\ 0, & x \geq 100 \end{cases}$$



с)

Рисунок 5. - Графики функции «принадлежности значений лингвистической переменной» «температура воды на входе»

Принадлежность каждого точного значения к лингвистическим переменным «низкая», «нормальная», «высокая» определяется посредством функции принадлежности. Логическое заключение предполагает формирование функции принадлежности выходной лингвистической переменной с помощью предварительно составленных правил базы знаний,



затем ее переход к числовому значению. База знаний составляется опытным экспертом из прикладной области на основании ассоциативных правил и заключений, которыми бы стал пользоваться оператор при управлении данным процессом.

Определили продукционные правила, представляющие знания в виде выражений типа «Если (условие), то (действие)», связывающие лингвистические переменные.

Данная логика была апробирована и на других звеньях технологического комплекса модификации покрытий. В базу знаний была заложена априорная информация о состоянии элементов установки вакуумной в виде нечетких правил управления. В системе управления предусмотрена возможность адаптации, создания новых правил в реальном времени к изменяющимся параметрам объекта, взаимодействующего с окружающей средой.

Выявленные зависимости выходных сигналов от характеристик датчиков позволяют выполнить более точное диагностирование.

Пример Агент – камера (A1). Его состояние определяется тремя датчиками:

T1-Датчик «Температура воздуха в камере»

I1- Датчик «Давление в камере»

U1- Датчик «напряжение на тэнах камеры»

Если температура воздуха в камере  $100\text{ }^{\circ}\text{C} < T1 < 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то сообщение «Нормальная работа».

Если давление в камере  $0,5\text{ МПа} < I1 < 10^2\text{ Па}$ , то Нормальная работа. Выход из строя возможен при выгорании электродов.

Если  $1В \leq U1 \leq 380\text{ В}$ , то – Нормальная работа. Выход из строя возможен при перегрузке. В результате рабочие элементы сгорают и выходной сигнал с рабочего элемента будет 0. Значение напряжения будет выходить за пределы 380 В.

A1 : {T1, I1, U1}

Если  $5\text{ }^{\circ}\text{C} < T1 < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то сообщение «Проверить контакты датчика»

Если  $100\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T1 \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то сообщение «Нормальная работа»

Если  $0,5\text{ МПа} < I1 < 10^2\text{ Па}$ , то сообщение «Нормальная работа»

Если  $U1 > 380\text{ В}$ , то сообщение «Проверить рабочие элементы гальванометра»

Если  $10 \leq U1 \leq 380\text{ В}$ , то сообщение «Нормальная работа».

На мониторе оператора отображается вся информация о технологическом процессе, система осуществляет поддержку работы пользователя, ведет архив.

**В четвертой главе** выполнена программная реализация системы управления технологическим процессом напыления покрытий и упрочнения режущей кромки инструмента на примере червячных фрез различными способами с использованием методов искусственного интеллекта. Приведены результаты экспериментальных исследований лазерной закалки, наплавки

твердосплавных порошков режущей кромки зуба червячной фрезы с целью управления параметрами технологических комплексов.

Для экспериментальных исследований результатов напыления  $Al_2O_3$  на подложки различных материалов. В качестве технологического комплекса использовались установка УВН-4М и Eifeler alpha 400 p

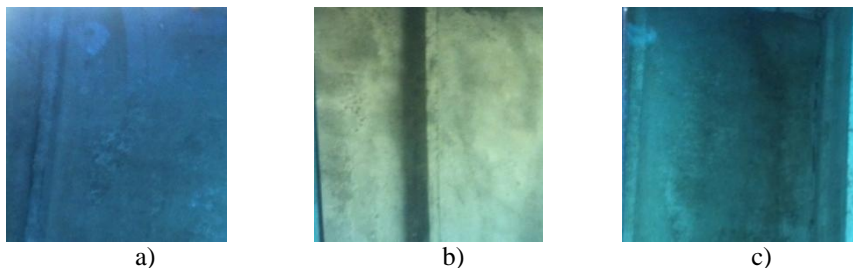


Рисунок. 6 – до применения системы: образец а – толщина слоя меньше заданного, образец б – толщина слоя больше заданного; после применения системы управления: образец с – толщина напыленного слоя находится в требуемых пределах.

Был замерен уровень адгезии на тестовых образцах методом прямого отрыва на приборе Elcometer 108 согласно ИСО 14923:2003 и ИСО 2063:2005. Образцы приклеивались к отшлифованной и обезжиренной поверхности покрытия с помощью адгезива М2000, после чего гидравлическая система прибора прикладывала усилие, значение которого фиксировалось в момент отрыва. Лучшая адгезия наблюдалась у образца, нанесенного при управлении системой.

Экспериментальные исследования в области модификации поверхностей проводились на лазерном технологическом комплексе импульсно-периодического действия LRS-150 А. Длительность импульса излучения:  $t = 3$  мс. Энергия импульса излучения:  $E_1 = 11$  Дж.

Микротвердость структуры детали замерялась по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 на микротвердомере MicroMet 5104 при нагрузке 1 Н.

В качестве материала детали используется инструментальную сталь Р18К5Ф2. Модифицирующий слой поверхности стали - порошок сплава ПГ – СР4 – ОМ. Он в основном применяется для покрытия деталей механизмов, которые подвергаются абразивному изнашиванию с относительно невысокой ударной нагрузкой.

На рисунке 7 представлены пластина, покрытая порошком сплава ПГ – СР4 – ОМ и микроструктура напыленного образца плазменным потоком стали 08 КП (конструкционная углеродистая качественная), обработанного в режиме с оплавлением.

Микроструктура основного металла пластины представляет собой феррит и структурно - свободный цементит 0В балла ГОСТ 5640-68 с микротвёрдостью до  $390 HV_{0,1}$ . Микроструктура поверхностного

упрочнённого слоя с нетравящейся структурой и карбидами. Высокая твердость слоя оказывает положительное влияние на износостойкость инструмента. Твердые сплавы при высокой твердости, обладают малой пластичностью и отличаются хрупкостью, поэтому имеют плохое сопротивление ударным нагрузкам. Хрупкость твердых сплавов сохраняется и при высоких температурах, вследствие чего они склонны к образованию трещин при наплавке.

Контур термического влияния ЛИ на зуб червячной фрезы представлен на рисунке 8. Глубина термического влияния достигает 0,4 мм, а толщина наплавленного слоя не превышает 0,1 мм, с микротвердостью  $HV_{0,05}$  585 у поверхности и  $HV_{0,05}$  569 на глубине 0,1 мм.

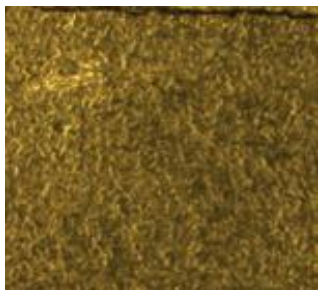


Рисунок 7. – Общий вид пластины с покрытием порошка для наплавки ПГ – СР4 – ОМ, x 5



Рисунок 8. – Фрагмент зуба червячной фрезы с лазерной наплавкой, увеличение x 10

На рисунке 9 виден слой наплавленного порошка, нанесенного порошка сплава ПГ – СР4 – ОМ напылением на флюс АН-43, обеспечивающего получение наплавленного металла с оптимальным содержанием марганца, кремния и других легирующих элементов, а также ограниченным содержанием серы и фосфора. При импульсной лазерной наплавке на зону взаимодействия на металл воздействует тепловая и механическая энергии, которая обусловлена давлением импульсного ЛИ.

Это наблюдается на рисунке 10, где на фотографии видны кольца уплотнения структуры металла.

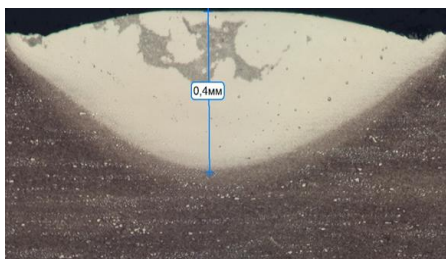


Рисунок 9. – Контур термического влияния зуба червячной фрезы (увеличение x 80).

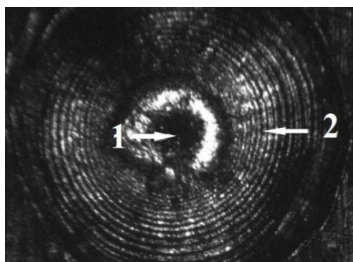


Рисунок 10. Фото поверхности стали после воздействия лазерного излучения.

1 – зона воздействия ( $\Phi$  0,5 мм, энергия

ЛИ - 12 Дж, длительность импульса 3 мс.).

2 - кольца уплотнения

Экспериментальные исследования показывают зависимость диаметра зоны взаимодействия от положения фокуса ЛИ и его энергии.

Процесс нагрева металла в зоне взаимодействия показан рисунки 11, который характеризуется режимами закалки и наплавки.

Данные режимы определяются плотностью энергии в зоне термообработки и длительностью импульса ЛИ.

Исследование микроструктуры фрезы проводилось на поперечном, относительно оси симметрии зубьев, микрошлифе участка режущей кромки, упрочнённой ЛИ (рисунок 12).



Рисунок 11. – Фотография процесса импульсной лазерной термообработки металла с оплавлением поверхности (наплавка)



Рисунок 12. – Микроструктура зуба червячной фрезы с результатами замеров микротвёрдости (увеличение  $\times$  200)

В левой области снимка (светлая зона) наблюдается микроструктура порошка ПГ – СР4 – ОМ, в правой — неизменная структура стали Р18К5Ф2. Между ними видна переходная зона диффузионных процессов порошка ПГ – СР4 – ОМ и стали Р18К5Ф2. Микротвёрдость наплавленного слоя порошка (светлая зона) ЛИ в среде аргона составила  $514 \text{ HV}_{0,05}$ , а средняя зона после наплавки приобрела структуру игольчатого мартенсита с микротвёрдостью –  $865 \text{ HV}_{0,05}$ , при микротвёрдости фрезы  $771 \text{ HV}_{0,05}$ . Микротвёрдость замерена в соответствии с ГОСТ 9450-76.

График распределения микротвёрдости в единицах  $\text{HV}_{0,05}$  по глубине микротвёрдости структуры показан на рисунке 13. Анализ распределения

микротвердости по глубине показывает возможность снижения хрупкости режущей кромки зуба фрезы, за счет снижения микротвердости наплавленного слоя, но при высокой микротвердости переходного слоя и, соответственно, износостойкости. Однако данный подход требует дополнительной механической обработки.

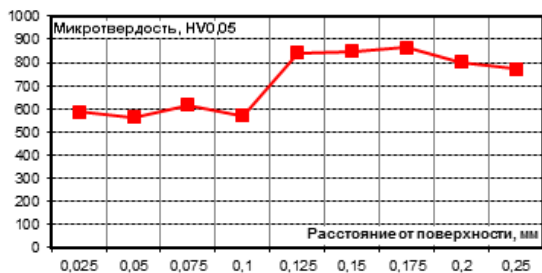


Рисунок 13. – График результатов замеров микротвердости в единицах HV<sub>0,05</sub> по глубине

По химическому составу наплавленный металл отличается от основного металла фрезы по наличию в нём никеля до 7,49 вес.% в пределах обнаружения рентгеновского энергодисперсионного метода микроанализа.

При микроструктурном исследовании на поверхности рабочей кромки зубьев фрезы выявлено наличие поверхностного упрочнённого слоя с нетравящейся структурой и карбидами. Высокая твердость упрочнённого слоя оказывает положительное влияние на износостойкость фрезы, которое проявляется при высокой температуре кромки инструмента. Большое влияние на износостойкость инструментальной стали оказывают содержание карбидов, количество остаточного аустенита. При высокой температуре износостойкими являются только стали, устойчивые против отпуска. Уменьшение твердости вследствие распада мартенсита сильно снижает износостойкость. При наплавке твердых сплавов нужно снижать до минимума последующей механической обработки.

В результате внедрения системы произошло повышение качества принимаемых решений по управлению процессом и сокращение времени на поиск и устранение неполадок. Это существенно повышает эффективность процесса нанесения покрытий за счет сокращения времени на диагностирование неисправностей, используя систему управления с элементами искусственного интеллекта.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным результатом диссертационной работы является решение научной задачи, имеющей важное практическое значение, которая заключается в разработке системы и способа управления технологическим комплексом напыления покрытий за счет применения элементов искусственного интеллекта, выборе оптимальных режимов технологического процесса напыления на основе математической модели, определении

зависимостей выходных сигналов от характеристик датчиков для диагностирования.

При проведении теоретических и практических исследований по тематике диссертации получены следующие научные и практические результаты для достижения поставленной цели, которой является повышение эффективности технологического процесса за счет применения системы управления с элементами искусственного интеллекта:

1. Предложена многоуровневая структурная модель системы управления технологическим процессом напыления покрытий на основе многоагентной системы, обеспечивающая требуемый контроль параметров процесса;

2. Рассчитаны зависимости управляющих выходных сигналов на технологический комплекс УВН - 4М от сигналов с датчиков, измеряемых в реальном времени хода технологического процесса, что повышает достоверность диагностирования блоков комплекса и позволяет сократить время простоев;

3. Разработана математическая модель экспериментальной технологической установки, позволяющая рассчитать параметры технологического процесса на этапе его моделирования;

4. Разработано программное обеспечение системы поддержки решения с использованием методов искусственного интеллекта, для повышения точности диагностирования узлов установки и принятия решений.

5. Модернизация системы управления лазерного технологического комплекса на базе волоконного лазера ЛС-2, в ОАО РЦИ «КАИ-Лазер», проведенная с использованием разработанного программного обеспечения, позволила повысить качество термообработки за счет снижения нестабильности параметров процесса термического воздействия на деталь из материала сталь Р18К5Ф2 до 10-12%. Разработанный способ управления технологическим комплексом с применением нечеткой логики, для поддержания заданных параметров процесса нанесения покрытий, позволил повысить износостойкость деталей до 20%.

Результаты проведенных исследований создают предпосылки для их использования при напылении инструментов на заводе ПАО КАМАЗ, что позволит повысить эффективность производства за счет доступности всей используемой информации в процессе в режиме реального времени, оптимального планирования ресурсов, оптимизации запасов сырья.

#### **Основные публикации по теме диссертации:**

*Научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК:*

1. Чернова М.А. Разработка системы автоматического управления вакуумно—напылительного технологического комплекса для легкой промышленности / Абдуллин И.Ш., Исафилов И.Х., Симонова Л.А., Исафилов Д.И., Чернова М.А. // Вестник Казанского технологического университета. – - 2013. - С. 154-156.

2. Чернова М.А. Анализ системы автоматического управления вакуумно — напылительного технологического комплекса для легкой промышленности / Абдуллин И.Ш., Исафилов И.Х., Симонова Л.А.,

Исрафилов Д.И., Чернова М.А. // Вестник Казанского технологического университета. –2013. - №24. - С. 160-162.

3. Чернова М.А. Исследование влияния параметров вакуумно — напылительного технологического комплекса на показатели качества технологического процесса металлизации тканей / Исрафилов И.Х., Тимеркаев Б.А., Шаехов М.Ф., Исрафилов Д.И., Чернова М.А. // Вестник Казанского технологического университета. –2014. - №1. - С. 78-80.

4. Чернова М.А. Применение нечеткой логики в системе управления процессами в вакуумно-напылительном технологическом комплексе / Симонова Л.А., Абрамова В.И., Чернова М.А. // Фундаментальные исследования – 2014. - №12.

5. Чернова М.А. Металлографические исследования лазерной наплавки износостойких порошков на инструмент / Хисамутдинов Р.М., Чернова М.А., Звездин В.В., Симонова Л.А., А.А. Спирин // Фундаментальные исследования – 2015.

*Научные статьи и материалы докладов:*

6. Чернова М.А. Математическое моделирование интеллектуальной системой управления технологическим процессом напыления металлов на основе применения многоагентной системы / Симонова Л.А., Исрафилов И.Х., Исрафилов Д.И., Чернова М.А. // World Applied Sciences Journal. - 2013. - № 23 (7). – Р. 930-934.

7. Чернова М.А. Интеллектуальная система управления технологическим процессом напыления металлов на основе применения многоагентной системы / Симонова Л.А., Чернова М.А., Исрафилов Д.И., Нугуманова А.И. // World Applied Sciences Journal. – 2013. - №23(7). – Р. 926-929.

8. Чернова М.А. Получение пленок заданных оптических характеристик путем контроля степени поляризации отраженного излучения от материала, полученного путем распыления мишени в плазме тлеющего разряда / Исрафилов Д.И., Чернова М.А., Нугуманова А.И. // V республиканская научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» 2013 г. - С. 152-154.

9. Чернова М.А. Study on partsion-plasma nitriding / Звездин В.В., Исрафилов И.Х., Исрафилов Д.И., Чернова М.А. // Journal of Physics – 2014. – 567(1).

10. Чернова М.А. Получение нанопленок заданных оптических характеристик за счет управления процессом напыления по степени поляризации отраженного от подложки излучения / Исрафилов Д.И., Чернова М.А., Самигуллин А.Д., Хайбуллин И.И., Нугуманова А.И. // Материалы VIII Международной научной конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» - 2011. - С. 234-236.

11. Чернова М.А. Формирование таблицы сигналов многоагентной системы / Ибрафиллов Д.И., Чернова М.А., Самигуллин А.Д. // «III Камские чтения» межрегиональная научно-практическая конференция: сб-к мат., часть 3 –2011. - С. 161-162.
12. Чернова М.А. Интеллектуальная надстройка системы управления на примере установки вакуумной напылительной УВН-4М / Ибрафиллов Д.И., Чернова М.А., Нугуманова А.И. // Перспективы развития информационных технологий – 2012. - №8. - С. 86-89.
13. Чернова М.А. Разработка базы знаний для управления технологическим комплексом вакуумной напылительной установки УВН-4М / Симонова Л.А., Ибрафиллов Д.И., Нугуманова А.И., Чернова М.А., // European applied sciences. ORT Publishing - 2012. - №1 - Р. 331-334.
14. Чернова М.А. Применение многоагентной системы для совершенствования управления процессами в вакуумно-напылительным технологическим комплексе // Социально-экономические и технические системы: Исследование, проектирование, оптимизация – 2015. -№4 – С.69.