на правах рукописи

Манцеров Сергей Александрович

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ И ЭКОБЕЗОПАСНОСТЬЮ СОСТОЯНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Специальность: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Нижний Новгород – 2024 г.

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Научный консультант:	д.т.н., профессор **Ломакина Любовь Сергеевна**
Официальные оппоненты:	**Виноградов Геннадий Павлович –** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информатика и прикладная математика» ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет» **Каширина Ирина Леонидовна –**доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Математические методы исследования операций» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» **Тушавин Владимир Александрович –** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Инноватика и интегрированные системы качества» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «10» октября 2024 года в 12 часов в ауд. 1315 на заседании диссертационного совета 24.2.345.06 при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева и на сайте https://www.nntu.ru/structure/view/podrazdeleniya/fpsvk/obyavleniya-o-zashhitah.

Автореферат разослан «____» _____ 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета А.С. Суркова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Научно-технический прогресс способствовал бурному росту сложности систем, что характерно для любой отрасли промышленности. Современные сложные технические системы отличаются разветвлённостью, большим числом и разнотипностью оборудования, и как следствие, сложностью алгоритмов управления. До сих пор нередкими результатами отказов таких систем являются огромные экономические потери, отрицательные воздействия на окружающую среду и человеческие жертвы.

В «Стратегии научно-технологического развития РФ» в соответствии с указом президента РФ № 145 от 28 февраля 2024 г., одним из приоритетов и перспектив научно-технологического развития является «Переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологической продукции, основанным на применении интеллектуальных производственных решений, роботизированных и высокопроизводительных вычислительных систем, новых материалов и химических соединений, результатов обработки большого объема данных, технологий машинного обучения и искусственного интеллекта», и в то же время в «Стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года» утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 июня 2020 г. № 1512-р сказано «к проблемам конкурентоспособности можно отнести недостаток компетенций, характерных для сервисной экономики и четвертой промышленной революции, … их несоответствие современным ***экологическим требованиям***», а также «экономические и в последнее время наиболее часто наблюдаемые ***экологические ограничения*** используются для политического давления». Это свидетельствует о том, что вопросы управления качеством состояний технических и технологических объектов ещё далеки от своего решения, и особо выделяется проблема соответствия отечественного промышленного производства современным экологическим требованиям, и как следствие, обеспечения экологической безопасности (***экобезопасности***) состояния технических и технологических объектов.

Новые возможности открывает так называемая сенсорная революция в рамках Индустрии 4.0, которая принесла с собой огромные объёмы потоковых данных о состоянии технических и технологических объектов и необходимость в их оперативной обработке и дальнейшем выявлении существенных событий. Сегодня любые сложные устройства на производстве могут быть снабжены многочисленными датчиками и микроконтроллерами, что генерирует большие объемы информации и

требует использования новых подходов к их анализу для управления состоянием технических и технологических объектов.

Степень разработанности темы.

Решающую роль в управлении качеством технических и технологических объектов играет контроль и диагностирование технического состояния. В настоящее время ведутся активные исследования в области технического диагностирования сложных систем, данной теме посвящено большое количество работ: П.П. Пархоменко, Е.С. Согомоняна, Г.Ф. Верзакова, В.И. Сагунова, Д.В. Сперанского, В.В. Сапожникова, Я.Я. Осис, М.Ф. Каравая, В.С. Подлазова, И.Л. Кашириной, C. Ramamoorthy, I. Mayed, J. Wegener, J. Ribero, A. Arcury, J. Shiozaky и других отечественных и зарубежных авторов. Вопрос достаточно широко изучен, однако остаётся ряд задач, связанных с оперативным обеспечением качества состояния технических и технологических объектов при применении существующих методов к контролю и диагностированию, поэтому разработка новых эффективных подходов не теряет свою актуальность.

С развитием современных технологий промышленное оборудование становится все более сложным, увеличиваются риски его отказов вместе с масштабами последствий таких отказов. В этой связи задачи повышения эффективности системы технического обслуживания и ремонтов оборудования (ТОиР) на промышленных предприятиях становятся все более значимыми. Большое значение для повышения эффективности ТОиР имеет фактор применения инноваций в производстве. С появлением цифровых технологий в концепции Индустрии 4.0 появляются новые возможности повышения эффективности технического обслуживания, которые рассмотрены в работах А.Н. Черепанова, Ф. Элингера, Д. Моубрэя, А. Гралль, В. Сянь и др. авторов. В этой связи требуется определить подход к обеспечению качества состояний технических и технологических объектов.

Проблема обеспечения экобезопасности технических и технологических объектов, включая процессы утилизации и вторичной переработки, подробно рассматривается в работах М.Г. Кургузкина, Н.А. Васьковой, Ю.А. Лебедева, С.А. Гагунова, В.В. Довгуша, М.Н. Тихонова, W. Willmann, M. Nikiforos и др. Предлагаемые подходы позволяют проводить анализ утилизируемого изделия и его составных частей, на основании которых формируются отдельные показатели экобезопасности. При этом отсутствует функциональный подход и систематизация результатов оценки экобезопасности состояний объектов.

В мире сейчас успешно развиваются научные школы, посвященные развитию наукоёмких моделей вычислений, к ним относятся американская, европейская и

российская школы. В американской школе отметим таких учёных как Д. Холланд, Д. Гольдберг, Д. Коза, Л. Чабес, Д. Уитли и др., в европейской- Д. Барштдорф, А. Кофман, Р. Клинг, П. Банерджи, Э. Фалькенауер и др., и в российской - И.Л. Букатова, Д. И. Батищев, Я.Е. Львович, И.Н. Норенков, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик, А.П. Карпенко, Н. В. Старостин и др.

В связи с этим, обеспечение качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов требует разработки интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний на основе наукоёмких моделей вычислений, что подтверждается достаточно большим количеством публикаций и практической значимостью данной области.

Таким образом, в диссертационном исследовании поставлена и решается научно-**техническая проблема** обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов *сложной* структуры на всех этапах жизненного цикла.

Целью диссертационного исследования является интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов на основе создания открытой системы адаптивных моделей вычислений. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Оценка ***технического состояния объекта*** и разработка ***принципов управления качеством и экобезопасностью*** состояний технических и технологических объектов.
2. Оценка экобезопасности состояний технических и технологических объектов и ***разработка методов обеспечения*** их состояний.
3. Обоснование выбора и разработка ***адаптивных моделей вычислений*** для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.
4. Разработка ***моделей оптимального синтеза*** контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасных технических и технологических объектов.
5. Разработка ***обобщённой схемы*** интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, на основе разработанных адаптивных моделей вычислений и технологий.
6. Реализация ***аппаратно-программного комплекса*** для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

Объект исследования – разнородная неструктурированная или слабоструктурированная информация (диагностическая, статистическая, экспертная)

о составе, функциональном назначении и состояниях технических и технологических объектов.

Предметом исследования являются адаптивные модели вычислений и модели оптимального синтеза контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасных технических и технологических объектов.

Область исследования соответствует:

пунктам 3, 4, 5, 8, 10, 14, 15 паспорта специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»: разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений. обработки информации и искусственного интеллекта; разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах; разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов систем управления с целью улучшения их технических характеристик; теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик.

Научная новизна. Основными элементами являются**:**

1. Концепция обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов, главное отличие которой от традиционных, заключается в развитии и использовании адаптивных моделей вычислений и технологий. (соответствует области исследований п. 3 паспорта специальности 2.3.1)

2. Открытая система адаптивных моделей вычислений, включающая *«мягкие»* (в том числе модифицированные нейро-нечёткие), *биоинспирированные* (в том числе модифицированные эволюционно-генетические) и *прогностические* (в том числе основанные на ансамблевых технологиях машинного обучения) модели вычислений. Предложенная система адаптивных моделей вычислений, сочетающая свойства *нечеткости, оптимизации и прогнозирования,* в отличие от известных, обеспечивает интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов. (соответствует областям исследований п.3, 5, 8, 14 паспорта специальности 2.3.1)

3. Новая методология интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов,

особенностью которой является открытая система адаптивных моделей вычислений, а также:

- впервые предложенный ***индекс технического состояния*** (ИТС), позволяющий провести оценку качества состояний технических и технологических объектов;
- методика оценки экобезопасности состояний технических и технологических объектов, позволяющая сформулировать ***индекс экобезопасности***;
- ***модифицированная функциональная систематика***, включающая совместное использование индекса технического показателя (ИТС) и комплексного показателя экобезопасности;
- модели оптимального синтеза контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасных объектов.

Авторские права защищены Патентами РФ на полезную модель RU 128757 U1, №2012154902/08: заявл. 18.12.2012: опубл. 27.05.2013; №137837: заявл. 17.09.2013: опубл. 05.02.2014 (соответствует областям исследований п.4, 11, 15 паспорта специальности 2.3.1).

4. Новая обобщенная структурно-функциональная схема интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, отличительная особенность которой заключается в использовании разработанного аппаратно-программного комплекса интеллектуального управления, в соответствии с условиями и свойствами решаемых задач, позволившая получить технические решения, защищенные Патентами РФ на полезную модель № 219388 : заявл. 06.03.2023 : опубл. 13.07.2023; № 217099 : заявл. 17.09.2013 : опубл. 05.02.2014 (соответствует областям исследований п. 10, 15 паспорта специальности 2.3.1).

Теоретическая значимость результатов работы состоит в создании открытой системы адаптивных моделей вычислений, сочетающей свойства *нечеткости, оптимизации и прогнозирования,* для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических объектов и технологических процессов.

Практическая значимость работы, внедрение результатов работы

Результаты работы использованы при выполнении основных НИР и ОКР:

- НИР «Исследование и анализ состояния оборудования и технологической оснастки предприятия», «Система автоматического позиционирования компонентов при микросварке изделий микроэлектроники» ООО «Эко-Тех Микроэлектроника», 2023 год;

- НИР «Разработка методов интеллектуальной диагностики объектов машиностроения». шифр «Диагностика», 2023 год;
- НИР «Интеллектуальное управление гибридными технологиями машиностроительных производств», 2023 год;
- ОКР «Создание расчетной модели, эскизная и техническая проработка модели макета», ФГУП "РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2023 год;
- НИР «АРМ поверителя однозначных мер электрического сопротивления ОМЭС» ФГУ «НЦСМ», 2017 г;
- ОКР «Разработка сервисного рабочего программного обеспечения информационно-управляющего канала (ИУК)», ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», 2013 год.

Кроме вышеуказанных, материалы диссертационной работы использованы при выполнении 7 грантов и прикладных НИР.

Методология и методы исследования.

Решение поставленных задач основано на применении теории системного анализа, теории множеств, теории нечёткой логики, теории групп, теории графов, теории нейронных сетей, теории вероятности и математической статистики, методов математического и структурного моделирования, методов функциональной систематики, методов структурно-параметрического анализа и синтеза.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечены корректным применением математического аппарата, экспериментальными исследованиями, практической апробацией на конференциях. Основные технические решения внедрены в производственную деятельность промышленных предприятий.

Основные **положения, выносимые на защиту:**

- **Концепция** обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов**.**
- **Открытая система адаптивных моделей вычислений,** включающая *«мягкие», биоинспирированные* и *прогностические* модели вычислений.
- **Методология интеллектуального управления** качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.
- **Обобщенная структурно-функциональная схема** интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.
- **Аппаратно-программный комплекс** интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояния технических и технологических объектов.

Апробация результатов исследования.

Основные положения и результаты исследования были представлены на следующих конференциях:

- XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024) **(Москва, 2024**);
- Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям (IS&IT'23, IS&IT'22, IS&IT'18) **(Краснодарский край, п. Дивноморское, 2023, 2022, 2018);**
- Международный военно-технический форум «Армия-2022» (**Москва, 2022**);
- XXII Международная научно-практическая конференция «Системный анализ в проектировании и управлении» (SAEC-2018) (**Санкт-Петербург, 2022, 2018**);
- Международная научно-техническая конференция "Автоматизация" (RusAutoCon) (**Челябинск, 2022, 2019)**;
- Международная научно-практическая конференция «Инновационный потенциал современной науки как драйвер устойчивого развития» (Санкт-Петербургский центр системного анализа, **Санкт-Петербург, 2021**);
- Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (ICIEAM 2020, 2018) (**Сочи, 2020, Москва, 2018**)
- Международная научно-практическая конференция «Нечеткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения» (Fuzzy Technologies in the Industry) (**Ульяновск, 2018, 2017**);
- XII Международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (**Омск, 2018**);
- Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» (**Нижний Новгород, 2023, 2022, 2005);**
- Международная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки» (**Нижний Новгород, 2024, 2023, 2017, 2012, 2011, 2006, 2005, 2002**);
- Всероссийская научно-методическая конференция «Инновационные технологии в образовательной деятельности» (**Нижний Новгород, 2023, 2019, 2018, 2017, 2014**);
- Научно-техническая конференция молодых специалистов Росатома «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе» **(Нижний Новгород, 2019, 2017, 2011).**

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 74 работы, в числе которых: 20 статей опубликовано в изданиях, рекомендованных

ВАК РФ, 7 статей в изданиях, индексируемых Scopus/Web of Science, 2 монографии (в соавторстве), 6 учебных пособий, а также 7 патентов на полезную модель и 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в разработке основных теоретических положений, в разработке и реализации открытой системы адаптивных моделей вычислений, выносимых на защиту. Автором разработаны архитектура и основные модули аппаратно-программного комплекса интеллектуального управления качеством состояний технических и технологических объектов, выносимого на защиту. Вклад автора в основные опубликованные работы был определяющим. Все представленные в диссертации положения, выносимые на защиту, получены лично автором, либо под его руководством.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежат:

• в [2, 8-11] - разработка принципов интеллектуального управления качеством состояний технических и технологических объектов на основе индексов технического состояния и экобезопасности;

• в [4, 7] - разработка математической модели, реализация алгоритмов идентификации состояний объектов;

• в [6, 12, 13, 15-19] - постановка задачи, разработка методов и алгоритмов решения задач обеспечения контролепригодности, экобезопасности и отказоустойчивости технических и технологических объектов.

Структура и объём работы. Диссертационная работа изложена на 296 страницах и состоит из введения, 5 глав, содержащих 121 рисунок и 26 таблиц, основных выводов и результатов, списка сокращений и 3 приложений. Библиографический список содержит 239 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована научно-техническая проблема, цель и задачи исследования. Определены объект и предмет исследования, раскрыта научная новизна, обозначены методы исследования, отражены практическая и теоретическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы.

В главе 1 ***«Проблема обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов»***, обозначены роль и место рассматриваемой проблемы, а также её значимость и важность. Обоснована необходимость в едином, системном подходе к управлению качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

В **п. 1.1** установлено, что для управления качеством состояний технического объекта или технологического процесса необходимо провести оценку его технического состояния.

Границы между состояниями технических и технологических объектов могут быть условными, а работоспособность может быть как полной, так и частичной. Схема изменений состояний технических и технологических объектов приведена на рис. 1.

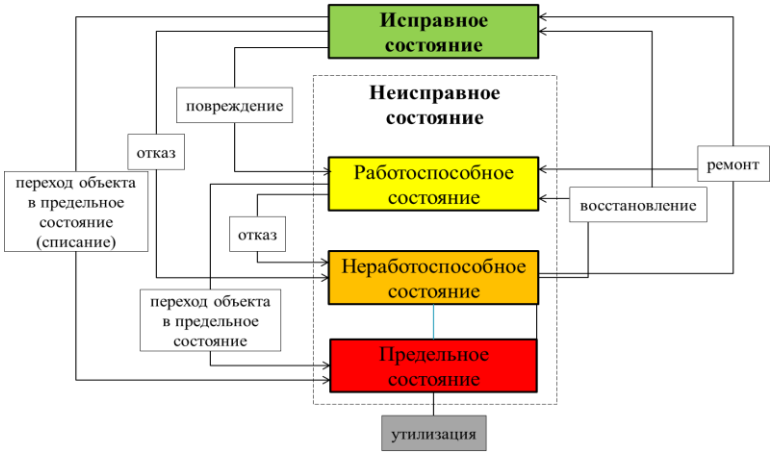


Рис. 1 – Схема изменений состояний технических объектов.

Таким образом, задача определения текущего состояния технического и/или технологического объекта носит нечеткий характер, что требует использования специальных подходов.

В **п. 1.2** проведён сравнительный анализ известных работ в области обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов, из чего следует необходимость предусмотреть на стадии проектирования и разработки жизненного цикла объектов возможность обеспечения их контролепригодности, отказоустойчивости и экобезопасности, т.е осуществить оптимальный синтез контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасных технических и технологических объектов.

В **п. 1.3** приводится обоснование нового общего интеллектуального подхода к решению проблемы обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов.

Глава 2 ***«Базовая модель управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов»***.

В **п. 2.1** предлагается *теоретико-множественный подход* к описанию состояний технических и технологических объектов.

Техническое состояние (ТС) объекта предлагается описать с помощью некоторого конечного множества значений параметров:

$$C = \{x_1; x_2; x_3; \dots; x_n\},$$

где x_n – значение технического параметра; n – количество параметров.

Для каждого технического и технологического объекта множество параметров индивидуально и каждый параметр имеет свою область значений и единицу измерения, то возникает задача систематизации разнородных данных.

Если ТС количественно выразить числом I от 0 до 1, тогда в соответствии с ГОСТ 18322-2016 (рис. 2) ТС объекта может быть выражено с помощью конечного множества значений.

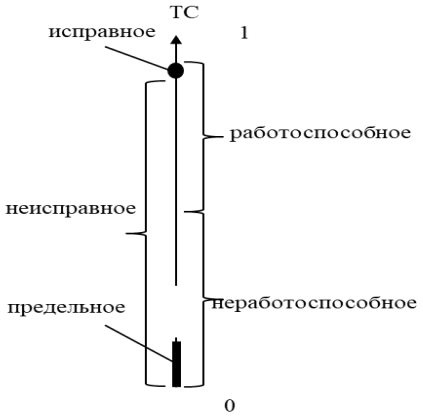


Рис. 2 – ТС в соответствии с ГОСТ 18322-2016

Таким образом получен *индекс технического состояния* (ИТС) I_i, который отражает степень соответствия i-го параметра требуемому значению, а тогда в терминах теории нечетких множеств он может быть описан в виде:

$$\{(x, \mu_{\tilde{A}}(x))\}, \forall x \in \boldsymbol{E},$$

где $\mu_{\tilde{A}}(x)$ – характеристическая функция принадлежности, принимающая свои значения во множестве $\boldsymbol{M}$, которая указывает степень или уровень принадлежности текущего значения параметра x требуемому значению (подмножеству $\widetilde{\boldsymbol{A}}$), $\boldsymbol{E}$ – множество возможных значений параметра объекта.

Таким образом представлена *нечёткая модель состояний технического и технологического объекта*:

	x_1	x_2	…	x_n
$\widetilde{\boldsymbol{A}}$ =	$\mu_{\tilde{A}_1}(x_1)$	$\mu_{\tilde{A}_2}(x_2)$	…	$\mu_{\tilde{A}_n}(x_n)$

где x_i – параметры оценки технического состояния объекта, n – число параметров.

Для определения обобщённого технического состояния объекта используются относительные линейное и квадратичное расстояния, что позволяет не только оценить общее состояние объекта, но и сравнить объекты между собой (рис. 3).

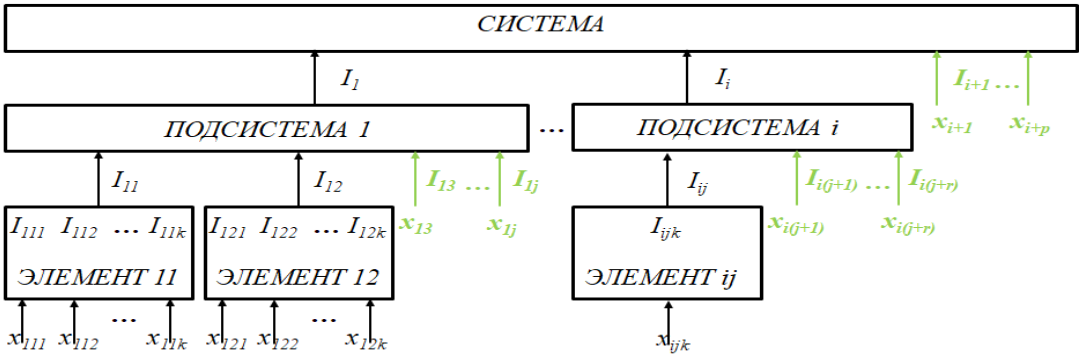


Рис. 3 – Структурная модель технического или технологического объекта

Таким образом, результатом оценки ТС оборудования является формирование планов по управлению качеством состояний технического и технологического оборудования, при формировании которых, учитываются существующие принципы управления качеством состояний промышленных объектов, а именно техническое обслуживание и ремонт (ТОиР). Проведён анализ современных принципов ТОиР, отмечена тенденция обслуживания технических и технологических объектов по ТС, обозначены основные задачи данного процесса, среди которых особое место занимает определение ТС объекта.

В **п. 2.2** предлагается подход к количественной оценке *экобезопасности*, на основе предлагаемого индекса экобезопасности, который включает множество единичных показателей декомпозиции и детального анализа объекта утилизации, процессов утилизации и депонирования, а также продуктов процесса утилизации и углеродного следа (рис. 4).

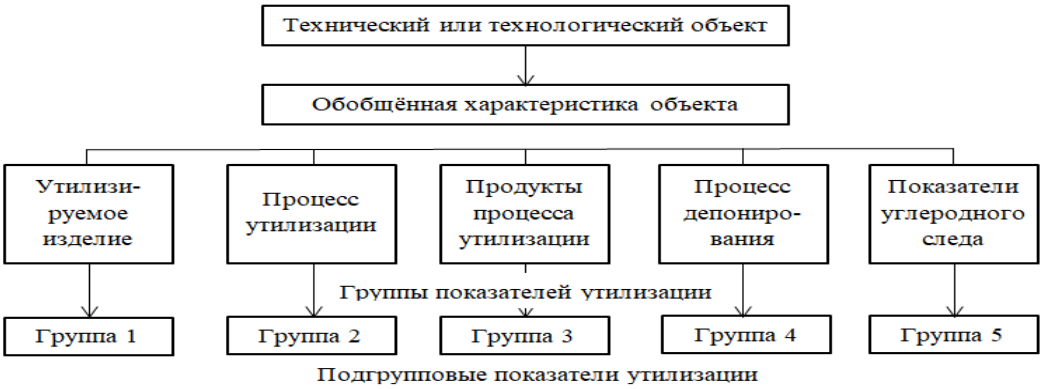


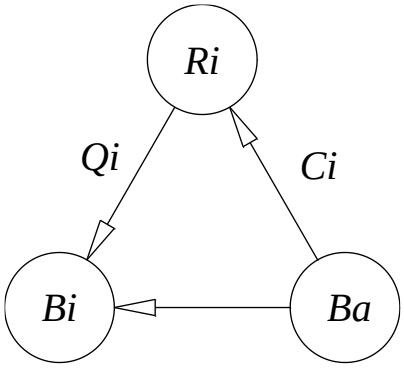
Рис. 4 – Структура показателей оценки экобезопасности состояний технических и технологических объектов

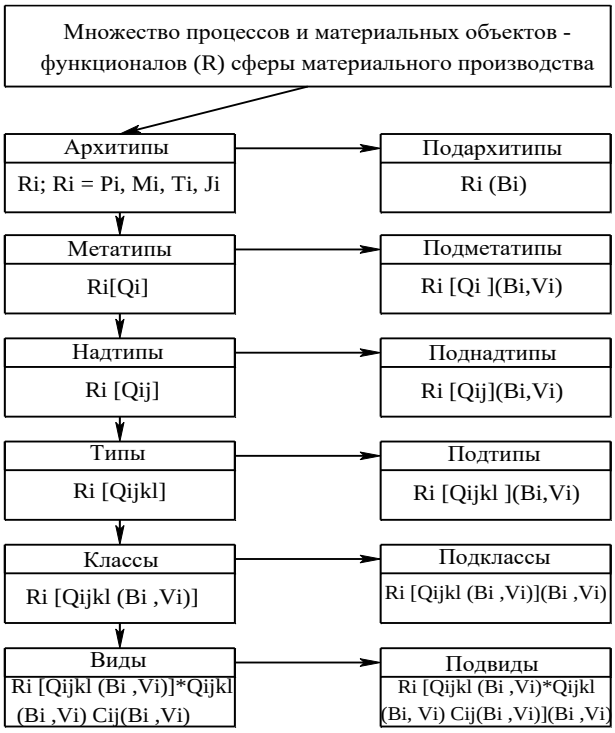
Предложена методика синтеза экобезопасных технических и технологических объектов, на основе индекса экобезопасности, позволяющая осуществить выбор материала, компонента или агрегата при проектировании технических и технологических объектов, для чего рассматриваются методы модифицированной функциональной систематики (ФС).

В **п. 2.3** представлена *модифицированная функциональная систематика* для обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов. Воздействия объекта-функционала Ri на объект, подвергающийся воздействию Bi (рис. 5а), совершаются для реализации заданной служебной функции Qi, что характеризуется следующей логической записью:

$$Ri \rightarrow Qi \rightarrow Bi$$

где: Ri - объект-функционал; Qi - служебная функция; Bi - объект, подвергающийся воздействию.





а) б)

Рис. 5 – Структура функциональной систематики

Для записи состояний технических и технологических объектов в формуле ФС доработана таксономическая модель (рис. 5б), позволяющая записывать несколько параметров состояния объектов:

$$R_i[Q_{ijkl}(B_i, V_i) * Q_{ijkl}(B_i, V_i) C_{ij}(B_i, V_i)](B_i, V_i)(S_i(B_i, V_i), Sv(B_i, V_i), \ldots)$$

где *S* – таксон характеристик объекта-функционала, *i* – номер параметра, (Bi, Vi) после S_i – мерон значения объекта-функционала.

Таким образом, имеет место *обобщенная идентификация состояний технического и технологического объекта* (рис. 6).

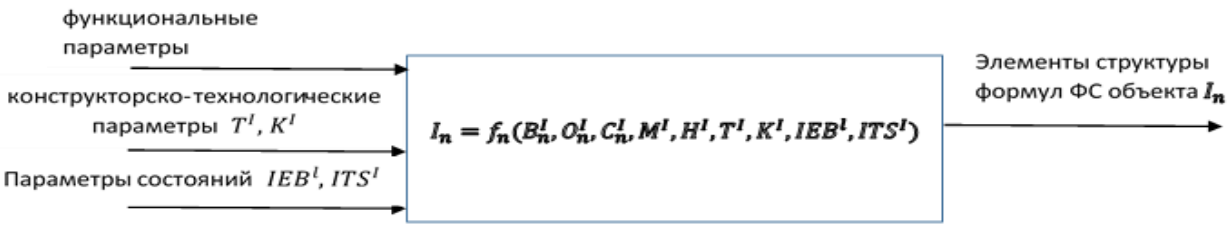


Рис. 6 - Структурная модель формирования формул модифицированной ФС состояний технических и технологических объектов

- *уровень функциональных параметров*: B_i^I – множество воздействий объекта-функционала на исходные объекты; O_i^I – множество объектов, на которые оказывается функциональное воздействие; C_i^I – множество критериев совместимости с факторами внешней среды; M^I – множество объектов; H^I – множество морфологических систем, в которых реализуется объект;
- *уровень конструкторско-технологических параметров*: T^I– тип объекта, K^I – класс объекта;
- *уровень состояний:* ITS^I– индекс технического состояния объекта, IEB^I- индекс экобезопасности объекта.

Таким образом, системная модель объекта *I* принимает вид:

$$I=\begin{cases} < B_i^I, O_i^I, C_i^I, M^I, H^I > \\ \quad < T^I, K^I > \\ \quad < ITS^I, IEB^I > \end{cases}, \text{ где } i = \overline{1,m}$$

а теоретико-множественная модель:

$Y = F(ITS, IEB, D_{ITS,} D_{IEB,} D_T, T, D_K, K, \Lambda, U, U')$, как связь между выходным параметром Y, входными параметрами U, U', состояниями сложного объекта в зависимости от параметров элементов ITS, IEB, T, K, при воздействии внешних факторов Λ, где $D_{ITS,}\, D_{IEB,} D_T, D_K$ множества допустимых значений для конструкторско-технологических параметров ITS, IEB, T, K (рис. 7), что и описывает поведение динамической системы управления качеством состояний технических и технологических объектов.

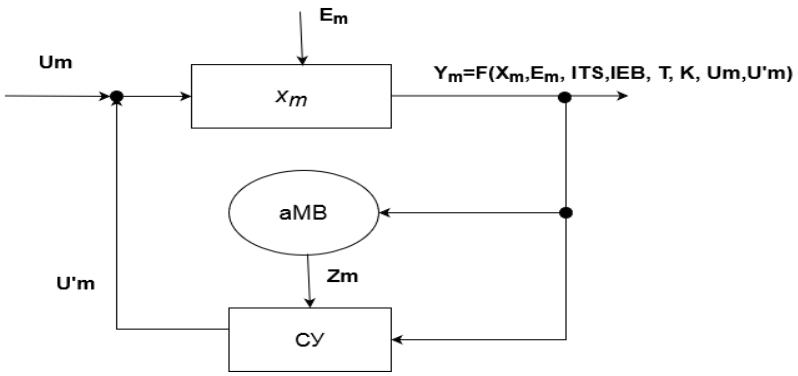


Рис. 7 - Модель управления качеством состояний технических и технологических объектов, где аМВ - адаптивные модели вычислений

В соответствии с методологией функционального моделирования IDEF0 построена функциональная схема управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, на примере оборудования промышленного предприятия (рис. 8).

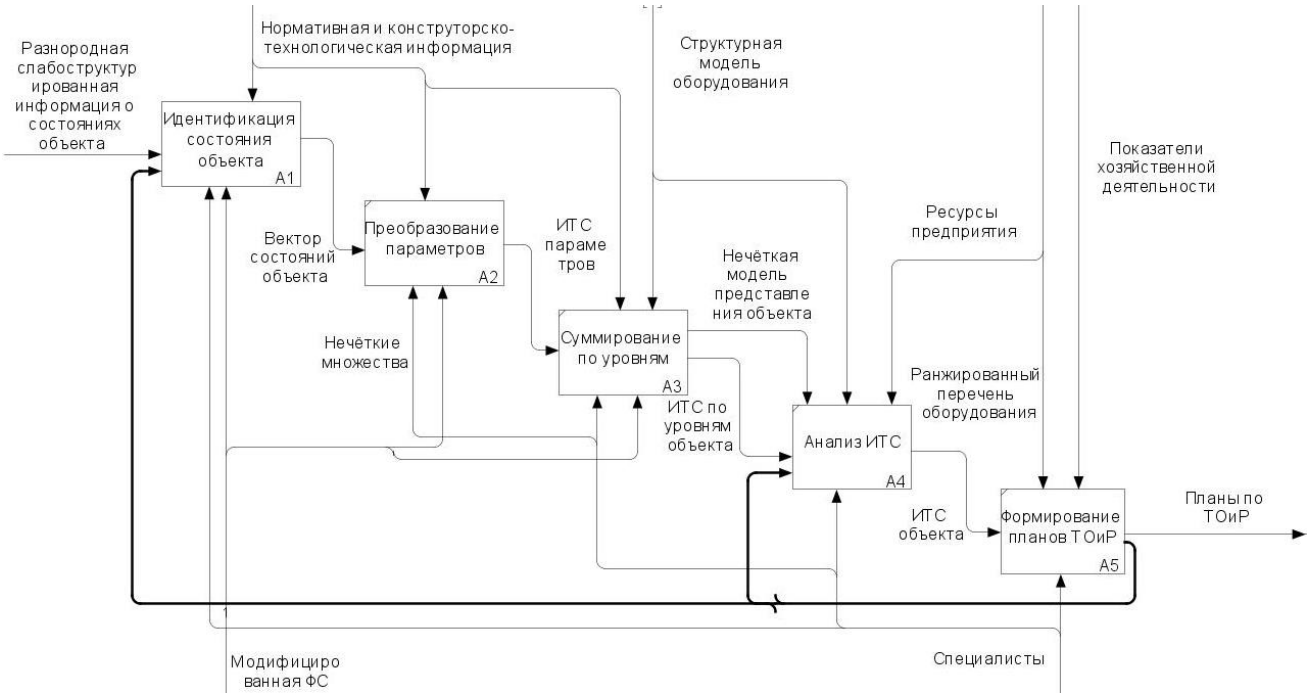


Рис. 8 – Диаграмма декомпозиции функциональной модели управления ТС оборудования.

Результат анализа представленной модели, показал необходимость в его интеллектуализации для эффективного управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

В главе 3 ***«Открытая система адаптивных моделей вычислений для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов»***, сформирован единый подход к интеллектуальному управлению, с учётом особенностей этапов жизненного цикла технических и технологических объектов.

В **п. 3.1** рассматриваются адаптивные модели «мягких» вычислений, включающие нейросетевые модели вычислений, нечеткие отношения, и нейро-нечёткие модели вычислений.

В п. 3.1.1 рассматриваются искусственные нейронные сети (ИНС) обеспечивающие возможность аппроксимации любой непрерывной функции.

В п. 3.1.2 рассмотрены модели, основанные на нечеткой логике, успешно используемые в задачах оценки ТС оборудования, что позволяет учесть нечёткий характер многих параметров состояний технических и технологических объектов.

В п. 3.1.3 представлена *комплексная система управления состоянием техническими и технологическими объектами*, основанная на использовании нейро–нечетких моделей вычислений (ННМВ).

В 1994 г. немецкий исследователь Д. Баршдорф провозгласил новую концепцию технической диагностики, основанную на нейросетевых технологиях и нечетких отношениях. Данная концепция положила начало широкому использованию ННМВ, которые комбинируют технологии искусственных нейронных сетей и систем на нечеткой логике.

Нечеткие множества применяются в составе нечеткой логической системы (НЛС), которая используется для работы с неопределенностью, и кроме нечетких множеств содержит фазификатор, базу правил и дефазификатор. НЛС 2-го типа (рис. 9) можно рассматривать как совокупность множества встроенных НЛС 1-го типа, четкий вывод получается путем агрегирования выходных данных всех встроенных НЛС 1-го типа, что позволяет достаточно эффективно обрабатывать неопределенности, связанные с «зашумленными» и недостающими входными данными.

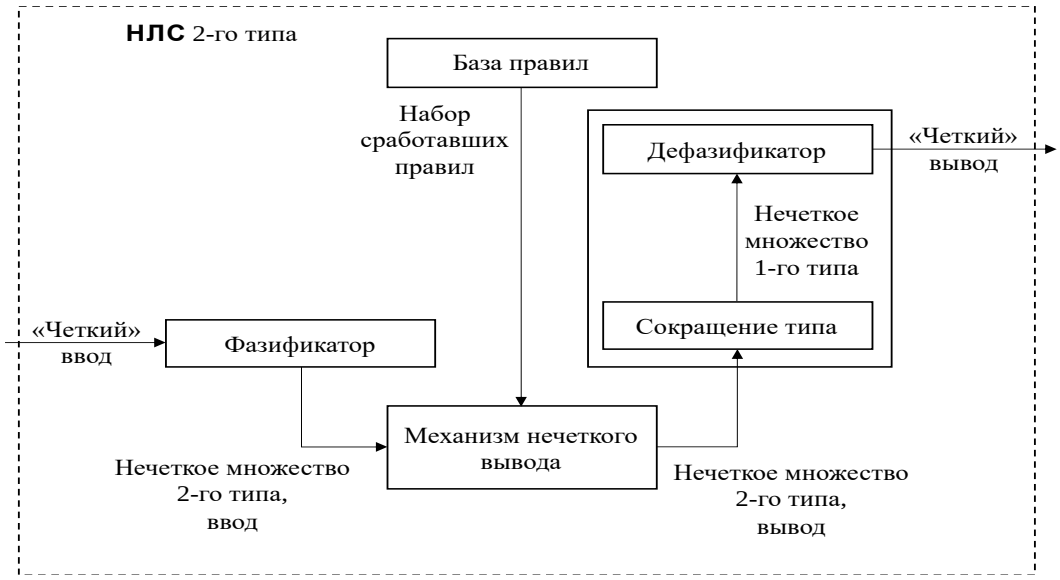


Рис. 9 – Структура НЛС 2-го типа

В работе база правил НЛС состоит из трех правил:

$$R_i\text{: ЕСЛИ } \sigma \text{ ЯВЛЯЕТСЯ } A_i \text{ ТОГДА } \varphi \text{ ЯВЛЯЕТСЯ } \varphi_i = B_i$$

где $i = 1, 2, 3$ – индекс правила , σ - ввод НЛС, A_i – интервальные нечеткие множества 2-го типа, а $\varphi_i = B_i$ – вывод системы.

В **п. 3.2** рассматриваются *оптимизационные модели вычислений*, а именно биоинспирированные, включающие *эволюционно-генетические и популяционные* модели вычислений.

В п. 3.2.1 предлагается *модифицированный эволюционно-генетический алгоритм*, блок-схема которого, представлена на рисунке 10, где *K*-кодирование решений, *C(S)* – целевая функция, *i* – количество итераций. Благодаря выбранному способу кодирования, применению случайных операторов поиска и адаптивной поисковой стратегии возможен резкий переход в другую область подмножества решений, что и позволяет выходить из локальных оптимумов. Применение комбинированных операторов поиска уменьшает среднее время сходимости алгоритма и позволяет осуществлять поиск в условиях изолированности глобального оптимума.

Данная модификация отличается от классического генетического алгоритма:

1. **Использованием специального метода кодирования решений** и построения функции приспособленности.
2. **Возможностью работы с решениями различной длины**.
3. Использованием комбинации **специальных операторов кроссинговера** вместо оператора мутации.
4. Применением для выхода из локальных оптимумов **адаптивной поисковой стратегии**, позволяющей ускорить сходимость алгоритма.

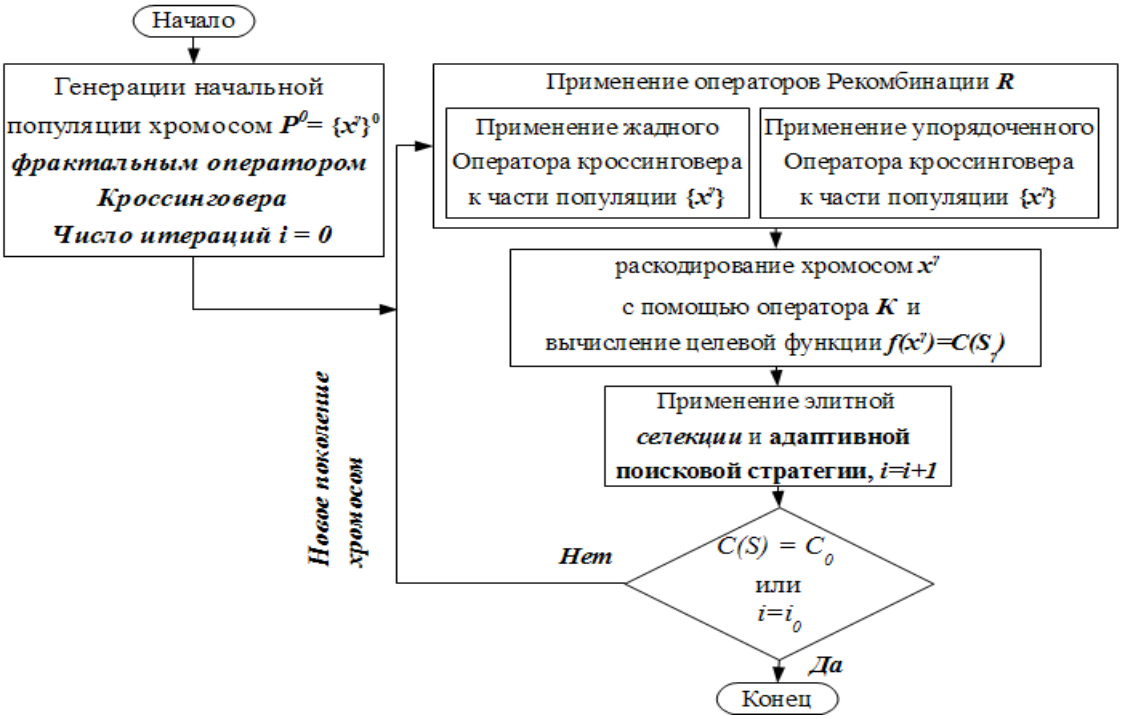


Рис. 10 – Схема модификации эволюционно-генетического алгоритма

Применение параллельных вычислений способствует не только повышению эффективности (рис. 11), но и позволяет избежать или сгладить влияние ряда

недостатков, присущих "обычным" генетическим алгоритмам (например вырождение популяции и преждевременная сходимость).

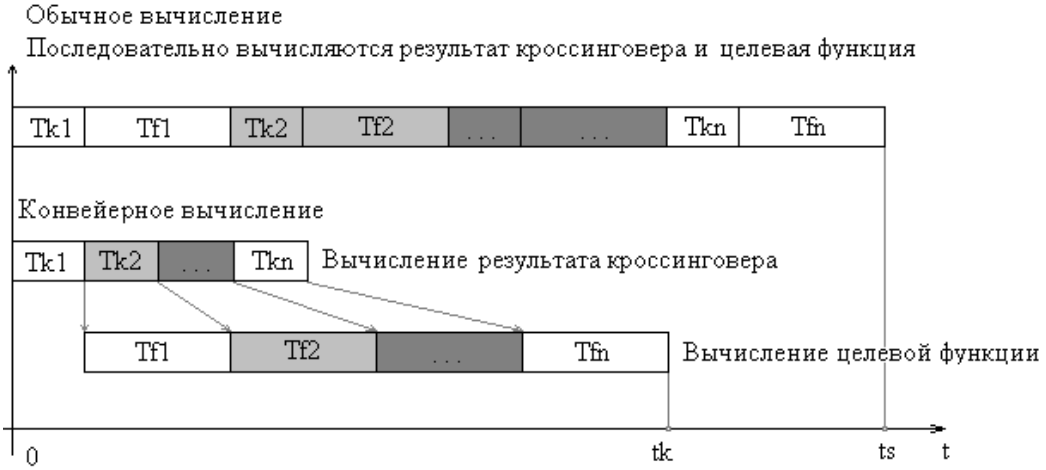


Рис. 11 – Последовательное и параллельное вычисления оператора кроссинговера и целевой функции для модификации эволюционно-генетического алгоритма

В п. 3.2.2 рассмотрены многочисленные *популяционные модели вычислений* (муравьиные, роевые, кукушкин поиск и др.). Перспективность применения подобных алгоритмов в робототехнике и проектировании технических и технологических объектов очевидна, они предоставляют возможность создавать самовоспроизводящиеся и самонастраивающиеся системы.

Популяционные модели вычислений обладают модульной структурой, что позволяет получить большое число вариантов путем варьирования и комбинирования правил инициализации популяции, миграционных операторов и условий завершения поиска.

Однако, многочисленные популяционные модели вычислений при использовании больших начальных выборок данных, что особенно характерно для робототехнических устройств, оснащенных многочисленным количеством датчиков и микропроцессоров или при решении задач оптимального перемещения исполнительных устройств многокоординатных промышленных роботов, требуют значительных временных и вычислительных ресурсов. В таких случаях, предлагается использовать механизм параллельных вычислений (параллельно-популяционные модели вычислений).

В **п. 3.3** рассматриваются *прогностические модели вычислений*, включающие модифицированные авторегрессионные модели вычислений и ансамблевые технологии машинного обучения.

В п. 3.3.1 отмечены *модифицированные авторегрессионные (АР) модели вычислений*, позволяющие по n –значениям одного из параметров установить как текущее состояние объекта, так и его прогноз.

Наибольшее распространение, в настоящее время, в различных областях науки и техники получили математические модели технических и технологических объектов из 3-х дифференциальных уравнений (ДУ) первого порядка, общего вида (1). К их числу относятся такие известные модели как «странный аттрактор» Лоренца, Рёсслера ($a_3 = b$, $b_{12} = b_{13} = -1$, $b_{21} = 1$, $b_{22} = a$, $b_{31} = b$, $b_{33} = -c$, $c_{32} = 1$, при всех остальных тождественно равных нулю) многие др.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \cdot y \\ x \cdot z \\ y \cdot z \end{pmatrix} \qquad (1)$$

Идентификация АР-модели состоит в определении ее порядка *p*. Представлена полученная АР-модель 2-го порядка для компоненты *x(t)* "аттрактор О. Росслера"(2).

$$x(t) = x(t-p)\cdot\left[2 + \frac{x(t-2p)}{x(t-3p)} - p(a+1+c)\right] + x(t-2p)\cdot\left[(ap-2-p)\frac{x(t-2p)}{x(t-3p)} + \right.$$
$$\left. + p(1+a+2c-acp-cp) - p^2(a+1+c) - 1\right] + x(t-3p)\cdot\left[x(t-2p)\frac{1-ap+ap^2}{x(t-3p)}\right.$$
$$\left. - p(a+c-acp-cp) + p^2x^2(t-3p) + ap^3\cdot(bc-c-x^2(t-3p))\right]. \qquad (2)$$

На рисунке 12 результаты сравнения для графика прогноза полученных АР—моделей (2) "аттрактор О. Росслера" по трём известным выборкам (пунктир) и "точного" поведения соответствующих компонент.

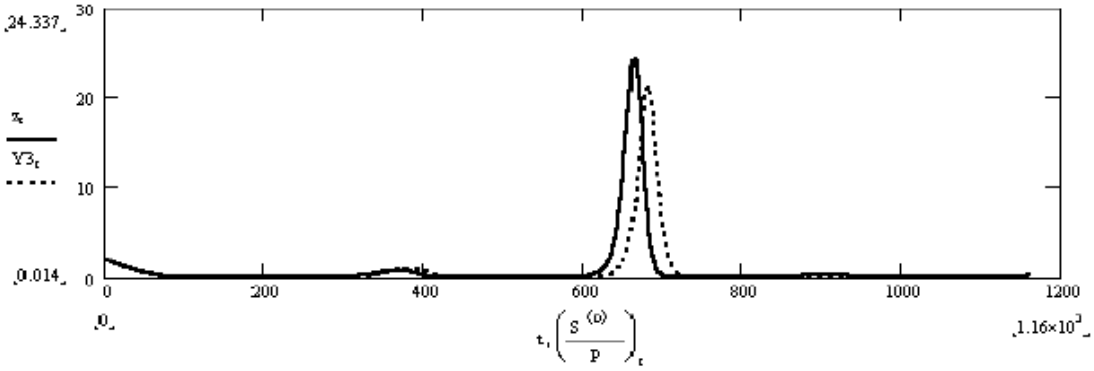


Рис. 12 – График прогноза для ДУ "аттрактора О.Росслера"

Как показывает анализ, нелинейные АР-модели типа (2) аппроксимируют довольно широкий класс технологических процессов в машиностроении и, следовательно, быть использованы как для целей их прогнозирования, так и для определения состояния объекта.

В п. 3.3.2 представлена эффективная альтернатива использованию единственного метода прогнозирования, которой является объединение прогнозов из

нескольких разных моделей, что определяет *ансамблевые технологии машинного обучения*, позволяющие объединить несколько алгоритмов в одну прогностическую модель для повышения точности прогноза, уменьшения дисперсии или смещения, позволяя строить более стабильные модели.

Прогнозирование в задачах классификации состояний технических и технологических объектов заключается в проектировании модели ансамбля. В результате исследований была выбрана модель ансамблевого обучения Bagging Ensemble, которая реализует ансамбль моделей, обучение происходит параллельно и на различных выборках из одного обучающего набора данных (рис. 13):

$B_T(x) = \sum_{t=1}^{T} bt(x)$,

где T– это число моделей в ансамбле,

$b_t(x)$– это базовая модель в ансамбле.

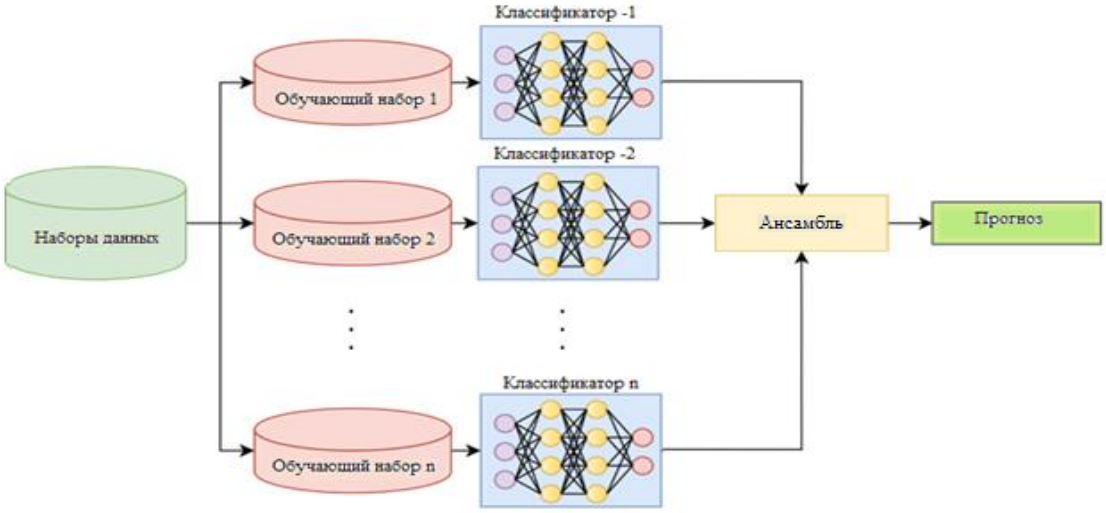


Рис. 13 – Модель параллельного ансамблевого обучения метода Bagging

В **п. 3.4** представлена обобщенная *открытая система адаптивных моделей вычислений* для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью технических и технологических объектов, включающая *«мягкие»* (в том числе модифицированные нейро-нечёткие), *биоинспирированные* (в том числе модифицированные эволюционно-генетические) и *прогностические* (в том числе основанные на ансамблевых технологиях машинного обучения) модели вычислений (рис. 14).

Представленная на рис 14 схема обобщенной открытой система адаптивных моделей вычислений предполагает дальнейшее развитие и расширение используемых адаптивных моделей вычислений, что и обуславливает открытость как её свойство.

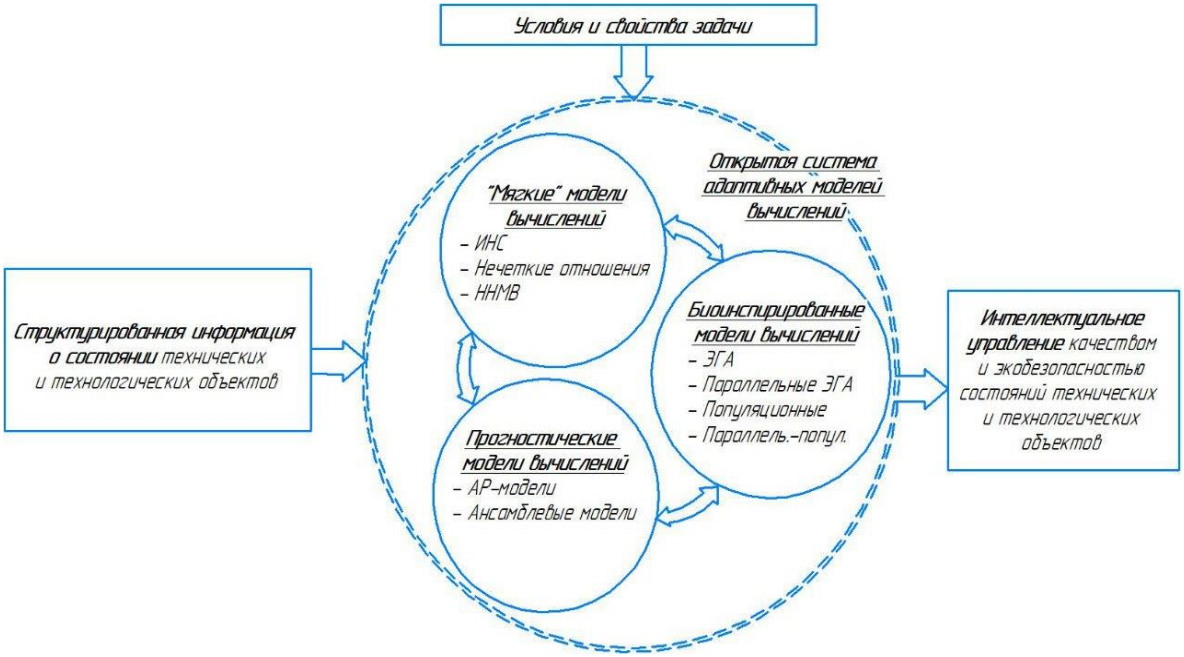


Рис. 14 – Открытая система адаптивных моделей вычислений

Глава 4 ***«Модели оптимального синтеза контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасносных технических и технологических объектов»***

В **п. 4.1** выполнен *оптимальный синтез контролепригодных объектов* с использованием информационного критерия. Рассмотрены обобщенная вероятностно-структурная модель и метод идентификации технического состояния системы по результатам измерения параметров в организованных точках получения диагностической информации (точках контроля). При решении этих задач возникают трудности, связанные с отсутствием такого критерия, который был бы применим к достаточно широкому классу систем, допускал простую физическую интерпретацию и имел сравнительно простое алгоритмическое решение. В качестве **такого критерия** предложен коэффициент глубины диагностирования, под которым понимают среднее количество состояний, с точностью до которых можно локализовать дефект на основании отношения количества информации $I(S, Y)$, определяемое в результате диагностического эксперимента (ДЭ) к общей неопределенности системы:

$$K = \frac{I(S, Y)}{H(S)}$$

где $H(S) = -\sum_{k=1}^{2^n} p(S_k) \log p(S_k)$ неопределенность исхода ДЭ; S - множество всех возможных состояний технических и технологических объектов; Y - вектор, определяется в результате ДЭ, характеризующий состояние всей системы с точностью до некоторого подмножества.

При условии генерации всех состояний системы, а потом удаления работоспособных, будет затрачено много вычислительных ресурсов при небольших вероятностях отказов блоков $p_1,..., p_n$. Поэтому процесс моделирования проводится непосредственно только для неисправных ТС, для этого должен быть выполнен переход от всех состояний системы S к множеству только неисправных состояний Q (рис. 15).

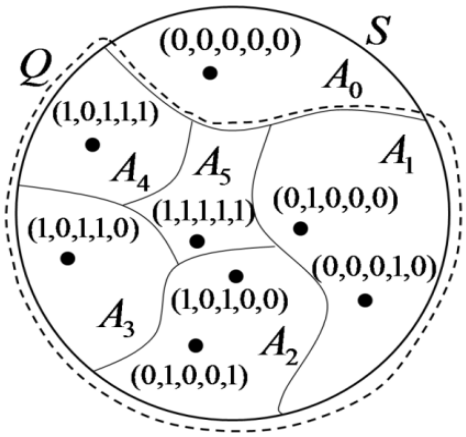


Рис. 15 – Общее пространство всех состояний системы (S) и пространство неисправных состояний (Q)

Для точного определения состояния системы необходимо, чтобы $I(S,Y)$ было равно $H(S)$, при этом $K = 1$, а если нельзя получить какие-либо сведения о состоянии системы, $I(S,Y) = 0$ и коэффициент $K = 0$. Таким образом, становится очевидным, что с увеличением «количества информации» $I(S,Y)$ или с увеличением коэффициента K, глубина диагностирования возрастает.

На основании информационного критерия разработаны оптимизационные алгоритмы синтеза контролепригодных технических и технологических объектов: алгоритм безусловного поиска дефектов, при котором тестирование производится на выбранном множестве точек контроля: алгоритм условного поиска дефектов, в рамках которого выбор точки контроля зависит от результата тестирования на предыдущей точки контроля и алгоритм статистического моделирования неисправного состояния объекта.

Рассмотрена задача построения оптимальной тестовой последовательности – порядка исполнения тестов, обеспечивающего минимум затрат на идентификацию неисправностей системы методом динамического программирования.

В **п. 4.2** рассмотрен *оптимальный синтез отказоустойчивых систем* (ОУС). Обеспечение отказоустойчивости объекта может быть достигнуто с помощью реконфигурации, избыточности и самодиагностики.

Предложена структура технического или технологического объекта в виде графа, вершины которого соответствуют функциональным подсистемам объекта, а

дуги – логическим (информационным) связям между ними. При этом резервные подсистемы соответствуют вершинам графа. Отказы в компонентах системы рассматриваются как изменение логической структуры. Модель предполагает, что отказам подвержены как вершины графа, так и его дуги. Считается, что вершины отказывают таким образом, что передача информации по информационным каналам возможна и через отказавшую вершину. Основной задачей при проектировании ОУС является минимизация избыточности, при условии, что любая k-ОУС должна иметь по меньшей мере k единиц избыточного ресурса.

Рассматривается реконфигурация системы на основе **алгебраических структур,** как некоторое инвариантное преобразование после обнаружения отказавшей компоненты, тем самым сохранив логическую структуру исходной системы и при этом присвоив отказавшей компоненте логическое имя рабочей компоненты. Такое преобразование графа является инвариантным и называется автоморфизмом. Абстрактной группой G называется множество, конечное или бесконечное, для которого выполняются следующие условия:

1. $g_i * g_j = g_s \in G$, где $*$ ассоциативная операция
2. $\exists g_k = e \in G$, такой что $e * g_k = g_k \in G$
3. $\exists g_i \in G \ \exists {g_i}^{-1} \in G$ и тогда ${g_i}^{-1} * g_i = e$

|G | - порядок группы (количество в ней элементов).

Совокупность автоморфизмов образует группу симметрии. Рассмотрены циклическая, диэдральная и тетраэдральная группы симметрий. Наличие функции реконфигурации системы в случае отказа дает ей свойство самовосстановления.

При возникновении отказа можно осуществить реконфигурацию системы на примере рисунке 16 путём реконфигурации и замены отказавшей функциональной компоненты на резервную.

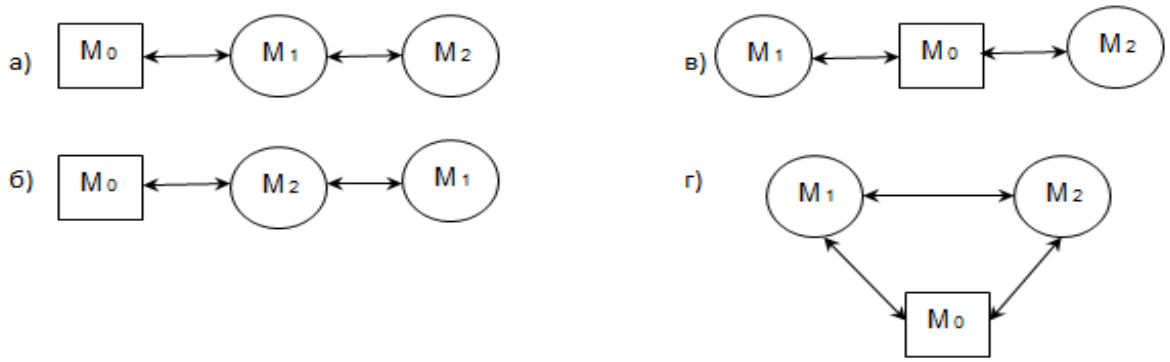


Рис. 16 – Варианты избыточных структур тремя блоками

Для системы, показанной на рис. 16, приводится **методика формирования таблиц реконфигурации**:

1. подготовка входных данных;
2. формирование структуры в форме автоморфизмов;
3. формирование множества возможных автоморфизмов исходного графа;
4. преобразование автоморфизмов в таблицы реконфигурации;
5. составление таблиц реконфигурации для отказавших вершин;
6. формирование набора таблиц реконфигурации системы, исходя из предположения, что данная вершина подверглась отказу. Каждое групповое преобразование представляет подстановку вида

$$\begin{pmatrix} V_0 & V_1 & \dots & V_i & \dots & V_n \\ V_i & V_j & \dots & V_n & \dots & V_k \end{pmatrix}$$

7. вершина V_0 графа принимается в качестве резервного модуля обработки;
8. формирование наборов таблиц реконфигурации.

В качестве примера приведены результаты применения методики для рис. 19 в виде таблиц реконфигурации (табл. 1).

Таблица 1 Реконфигурация при отказе вершины $\mathbf{V_1}$

Вариант реконфигурации	A			B		
Логическое имя до	V_0	$\mathbf{V_1}$	V_2	V_0	$\mathbf{V_1}$	V_2
Логическое имя после	V_1	$\mathbf{V_0}$	V_2	V_1	$\mathbf{V_0}$	V_2

В **п. 4.3** выполнен оптимальный синтез экобезопасных систем на основе методики оценки экобезопасности состояний технических и технологических объектов рассмотренных в п. 3.3. Объектом для анализа экобезопасности технических или технологических объектов является воздействие на окружающую среду и последующей переработки.

Для выполнения синтеза экобезопасных систем формируется *комплексный показатель экобезопасности,* который включается в формулу объекта-функционала на основе методов модифицированной ФС:

M6[Q1.12.4.1(B5.11.1)C1.5(A)](Si(L6.1), где **(Si(L6.1)** - таксон состояния объекта, значение которого, характеризует комплексный показатель экобезопасности объекта L6.1. Показатель мерона S, указывается без запятой и всегда принимает трёхзначное значение. Аналогично проводится оценка для всех предлагаемых вариантов проектируемого изделия, на основе адаптированных формул ФС и предпочтение отдаётся тому, где величина комплексного показателя экобезопасности выше.

Далее производится выбор варианта-аналога с максимальным значением индекса экобезопасности:

$$IEB_i(x) = \max_i(s_i)$$

На рис. 17 представлен алгоритм оптимального синтеза экобезопасных объектов.

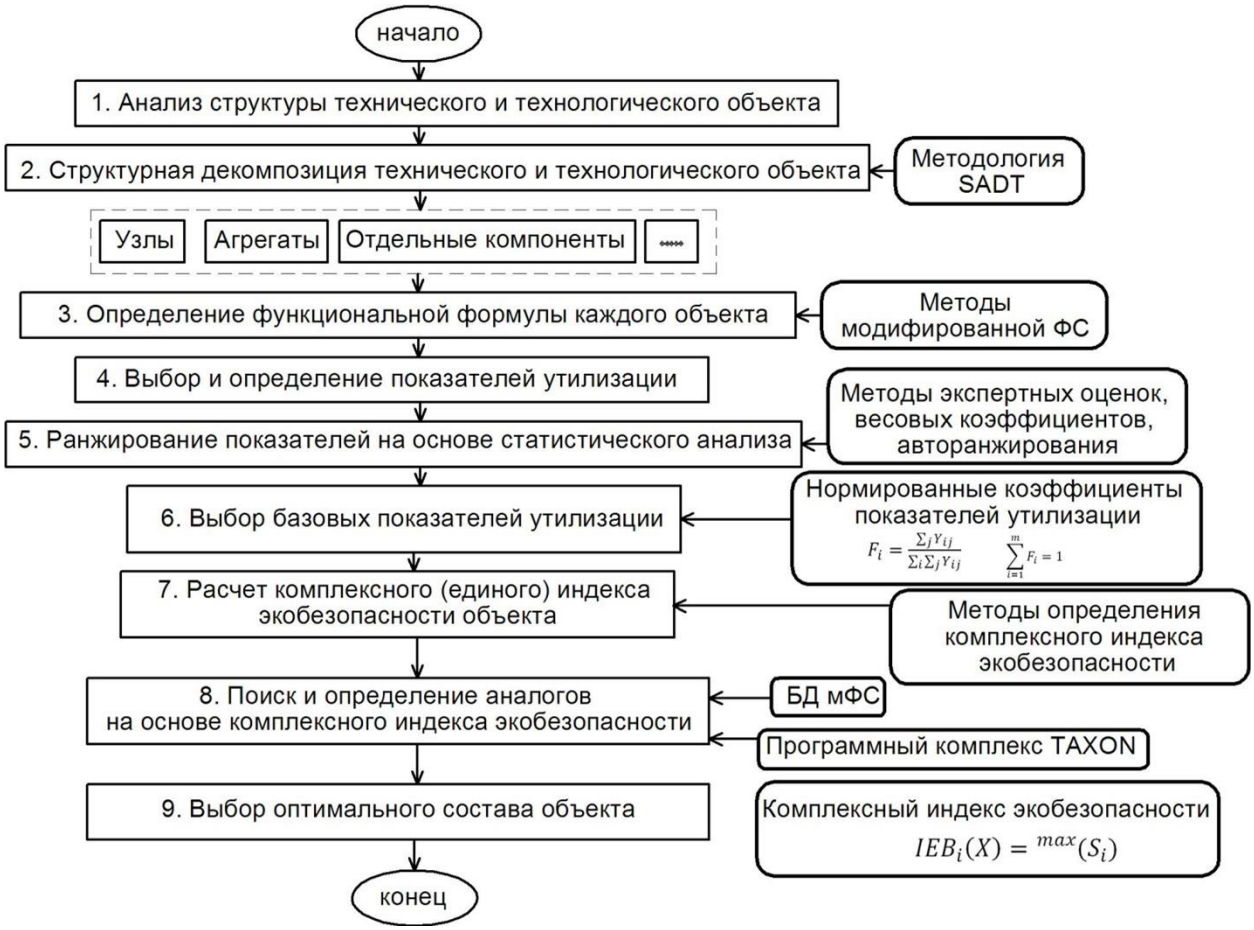


Рис. 17 – Блок-схема алгоритма оптимального синтеза экобезопасных объектов

Основными достоинствами методики являются: оценка способности к утилизации на стадии предпроектных и проектных работ, выражение экобезопасности в виде комплексного количественного показателя; возможность сравнения вариантов как проектируемого объекта, так и его компонентов, что, позволяет разработчику выбирать оптимальный вариант проектируемого объекта по всем показателям качества, в том числе и по показателям утилизации, на основе модифицированных методов ФС.

В главе 5 «***Практические аспекты проблемы интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов***» описаны объекты, в основе которых модели и методы, описанные в предыдущих главах.

В **п. 5.1** предлагается обобщенная структурно-функциональная схема интеллектуального управления качеством и экобезопасностью технических и технологических объектов, построенная в соответствии с методологией

функционального моделирования IDEF0 (рис. 18). Новизна предложенной обобщенной структурно-функциональной схемы интеллектуального управления состоит в использовании открытой системы адаптивных моделей вычислений и аппаратно-программного комплекса интеллектуального управления в соответствии с условиями и свойствами решаемых задач.

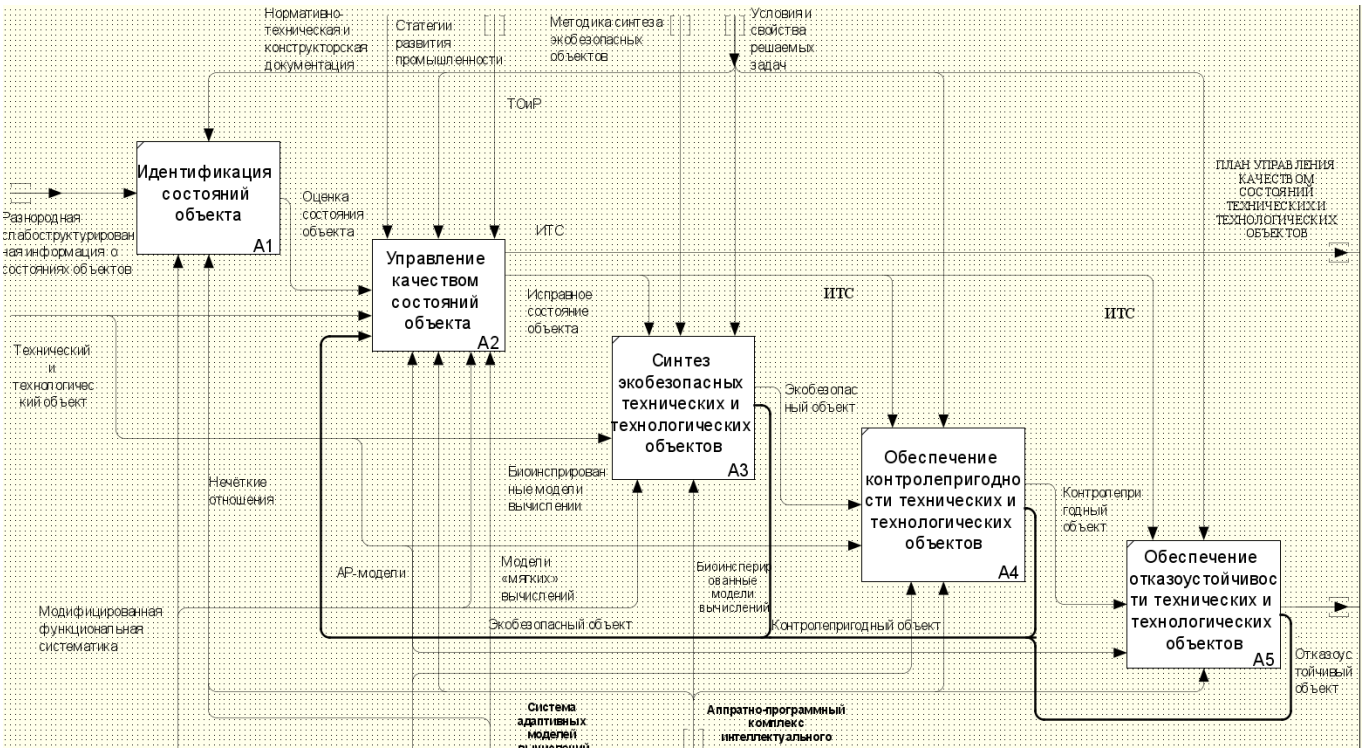


Рис. 18 – Фрагмент обобщенной структурно-функциональной схемы интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов

В п. 5.2.1 представлена система интеллектуального управления ТС объектов в ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», позволяющая рассмотреть контрольно-измерительные приборы и автоматику (КИПиА) в разрезе групп (типов) оборудования на основе ИТС (рис. 19).

На рисунке 20 представлен пример выходной информации более низкого уровня – диагностическая карта системы автоматического управления газоперекачивающим агрегатом (САУ ГПА) «А705-15-09М», где отражены составляющие ИТС (ИТС подсистем) и общий ИТС системы. Цветовая индикация сигнализирует о наиболее «уязвимых» подсистемах САУ ГПА.

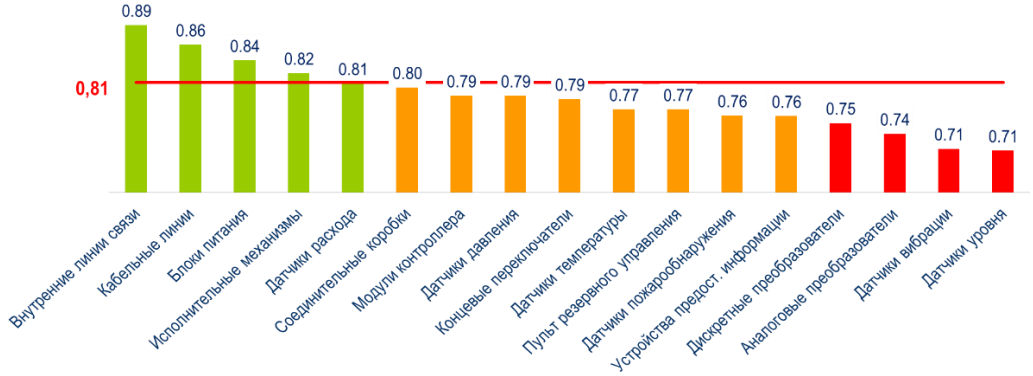


Рис. 19 – ИТС КИПиА в разрезе групп

На рисунке 21 представлен фрагмент диагностической карты на уровне подсистемы «Блоки питания», где отражены блоки питания, входящие в состав данной подсистемы.

Эффективность внедрения системы управления техническим состоянием выражается в сокращении числа отказов оборудования на предприятии примерно на 12% (за год эксплуатации), а также в сокращении трудозатрат на анализ, обработку информации и принятие решений примерно на 38%.

	Диагностическая карта объекта	
	Данные об объекте	
	Филиал	Владимирское ЛПУМГ
	Производственный блок	КС
	Наименование КС	КС Вязники
	Номер КЦ	1
	Вид системы автоматизации	САУ ГПА
	Номер ГПА	1
	Наименование САУ	А705-15-09М
	ИТС системы	0.65
ИТС	программного обеспечения	1.00
	блоков питания	0.39
	модулей контроллера	0.86
	устройств предоставления информации и управления	0.56
	преобразователей	0.85
	внутренних линий связи	0.50
	датчиков температуры	0.72
	датчиков давления	0.53
	датчиков уровня	0.43
	соединительных коробок	0.52
	кабельных линий	0.57
	средств сигнализации	0.63
	исполнительных	0.77
	концевых выключателей	0.79

Рис. 20 – Диагностическая карта (уровень системы)

№ п/п	Оборудование		ИТС
	Заводской номер	Блоки питания (наименование)	
1	x	GP 045	0.60
2	x	GP 045	0.60
3	x	БА.07-045М	0.40
4	x	БА.07-045М	0.50
5	x	БА.07-045М	0.50
6	x	БА.07-046М	0.20
7	x	БА.07-046М	0.20
8	x	БА.07-046М	0.30
9	x	БА.07-046М	0.30
10	x	БА.07-046М	0.40
11	x	БА.07-046М	0.40
12	x	БА.07-046М	0.40
13	x	БА.07-047М	0.30
14	x	БА.07-048М	0.30
15	x	БА.07-048М	0.30

Рис. 21 – Диагностическая карта (уровень подсистемы)

В п. 5.2.2 выполнен оптимальный синтез экобезопасного фрезерного станка Корвет-82.

Проведён анализ фрезерного станка Корвет-82, как технического объекта для утилизации (рис. 22). В результате декомпозиции были выделены элементы изделия более высокой детализации и занесены в структурную таблицу, где зафиксировано их количество и вес (табл. 2).

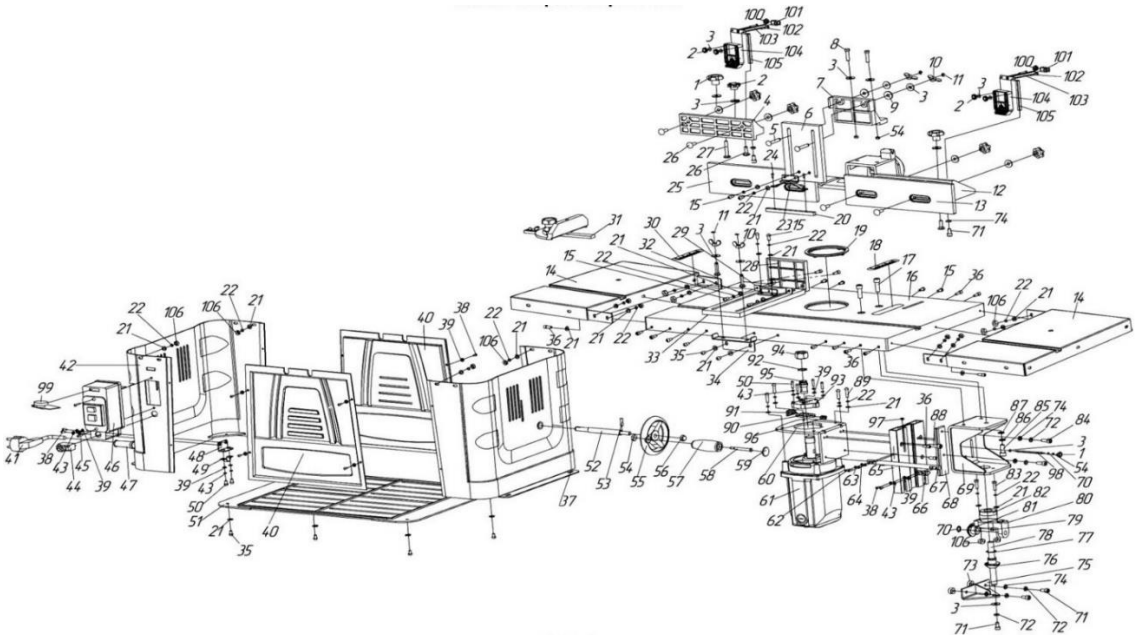


Рис. 22 - Детальная схема состава фрезерного станка Корвет-82

Таблица 2 – Элементный состав фрезерного станка Корвет-82

№	Наименование сборочной единицы или детали	Технологический классификатор деталей машиностроения	Масса, г.	Утилизируемые изделия (ед.)
1	Ручка натяжения	152490	63	3
2	Ручка	152491	47	2
3	Шайба	152492	5	1
4	Ограничитель	152493	27	1
...	….	…	…	…
106	Гайка	152595	7	1
107	Щетка угольная	152575	30	2

В результате проведенного анализа структуры (табл. 2) и элементного состава станка (107 составных частей), были определены показатели утилизации. Проведено ранжирование показателей по экспертным оценкам. По результатам парных сравнений, была построена матрица рангов и определены весовые коэффициенты. Проведена количественная оценка определенных показателей утилизации. Таким образом, комплексный показатель экобезопасности определяемый по формуле (3) для фрезерного станка Корвет-82 составил: IEB(N)= $\sum Ci$ = 0,8785+0,8308+0,53+1+0,32 = 3,56.

Аналогично проводится оценка для всех предлагаемых вариантов проектируемого изделия, на основе методов модифицированной ФС и предпочтение отдаётся тому, где величина комплексного показателя экобезопасности выше.

Далее, добавляем полученное значение комплексного показателя экобезопасности в формулу объекта-функционала фрезерного станка Корвет-82:**M6[Q1.12.4.1(B5.11.1)C1.5(A)](S324(L6.1),**
где **(S324(L6.1)** - таксон состояния объекта, значение которого, характеризует комплексный показатель экобезопасности объекта L6.1. Показатель мерона S, указывается без запятой и всегда принимает трёхзначное значение.

В п. 5.2.4 рассмотрено интеллектуальное управление реакторами гидрирования этан-этиленовой фракции (ЭЭФ). Для решения проблемы нарушений реакции гидрирования ЭЭФ, были использованы «мягкие» модели вычислений. А именно, модуль ННК, показавший лучшую точность и скорость обучения, был интегрирован в систему управления реакторами, которая анализирует данные по входящему сырью и позволяет предупредить появление брака на выходе из узла гидрирования, а также снизить риск перегидрирования этилена в этан (рис. 23).

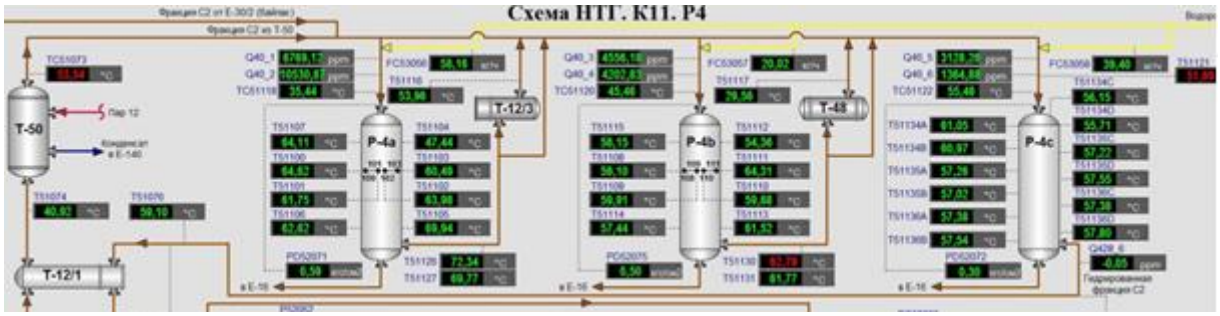


Рис. 23 – Принципиальная мнемосхема узла гидрирования этан-этиленовой фракции в реакторе Р-4/А,В,С

На рис. 24 приведены графики обучения для обыкновенной ИНС и для ННК соответственно:

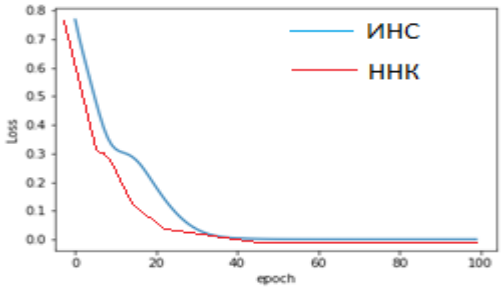


Рис. 24 – Графики обучения для обыкновенной ИНС и для ННК

Итоговая ошибка обучения для ИНС: 0.00055866, для ННК: 0.00018431. Таким образом, ННК достигает оптимальной точности быстрее, при более низких показателях ошибок.

В п. 5.2.5 рассмотрена классификация дефектов внутренней поверхности труб малого диаметра на основе ННК. Представлена система управления установкой (рис. 25).

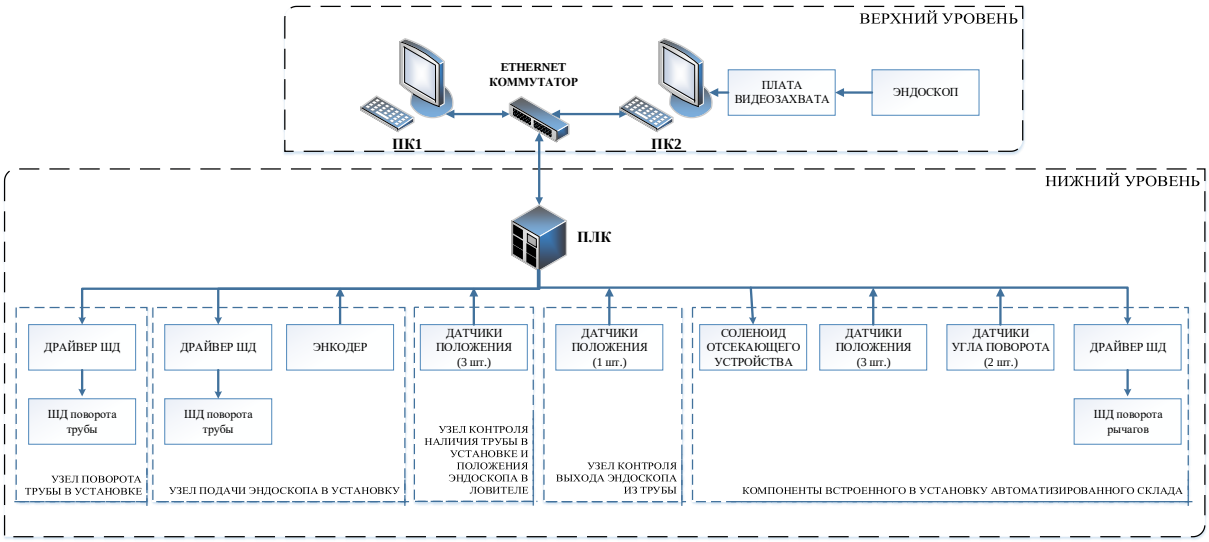
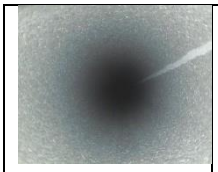
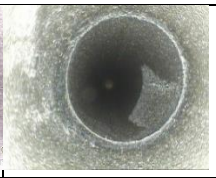
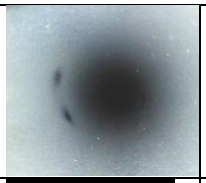
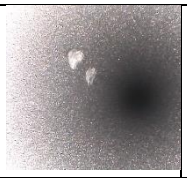
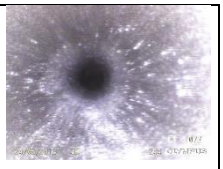
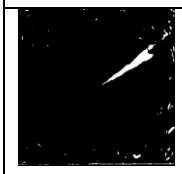
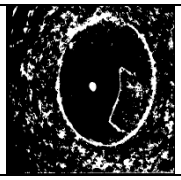
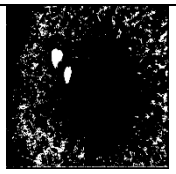
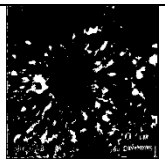


Рис. 25 – Структурная схема системы управления установкой

В процессе детектирования дефектов нейронными сетями были распознаны все дефекты (табл. 3).

Таблица 3 – Примеры детектирования дефектов на реальных изображениях

					
					
дефект «продольная риска»	дефект «нитка»	дефект «кольцевая риска»	дефект «вмятина»	дефект «вмятина»	дефект «пыль»

В результате применения нейронных сетей, в задаче обнаружения дефектов на синтетических изображениях, были получены низкие показатели ложного обнаружения дефектов менее 1%, а также высокие показатели обнаружения дефектов «Вмятины», «Капли», «Риски»: более 91% (рис. 26).

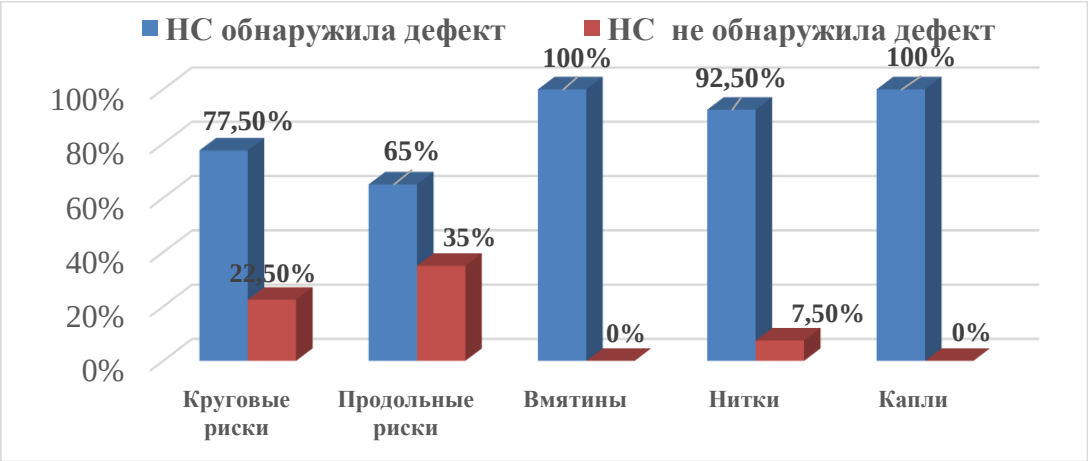


Рис. 26 – Результаты тестирования нейронной на изображениях с дефектами

В п. 5.2.6 решена задача оптимизации траектории движения исполнительных устройств робототехнических комплексов (РТК) (рис. 27)

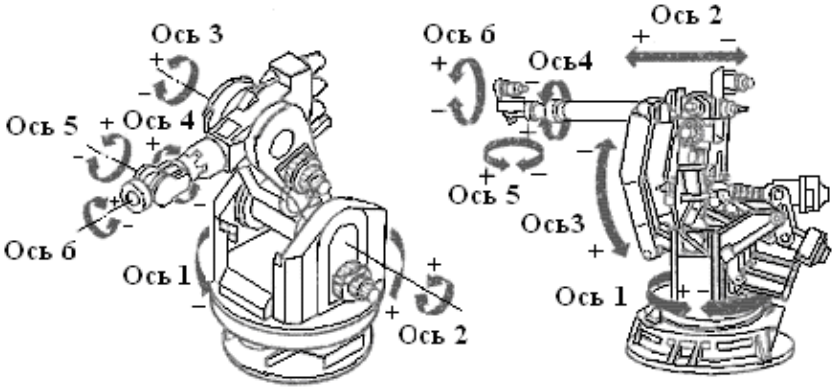


Рис. 27– Траектории движения исполнительных устройств РТК (показаны стрелками)

Выполнена оптимизация по быстродействию движений промышленных роботов с позиционной системой управления, проектированию траекторий перемещения робота при помощи однородных преобразований, а также оптимизация времени при разгоне и торможении промышленного робота. Применение популяционных моделей вычислений (метод отжига) позволило провести оптимизацию времени при разгоне и торможении операции перемещения на 17%.

В **п. 5.3** представлена аппаратно-программная реализация системы интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, результатом которой является специальный аппаратно-программный комплекс интеллектуального управления техническими и технологическими объектами (рис. 28).

Дополнительно в материалах диссертации рассмотрены технические и технологические объекты разного типа: газотранспортное оборудование, блок питания, фрезерный станок, электропривод, робототехника (РТК), трубы,

металлорежущее оборудование, технологические процессы наплавки металла и гидрирование ЭЭФ.

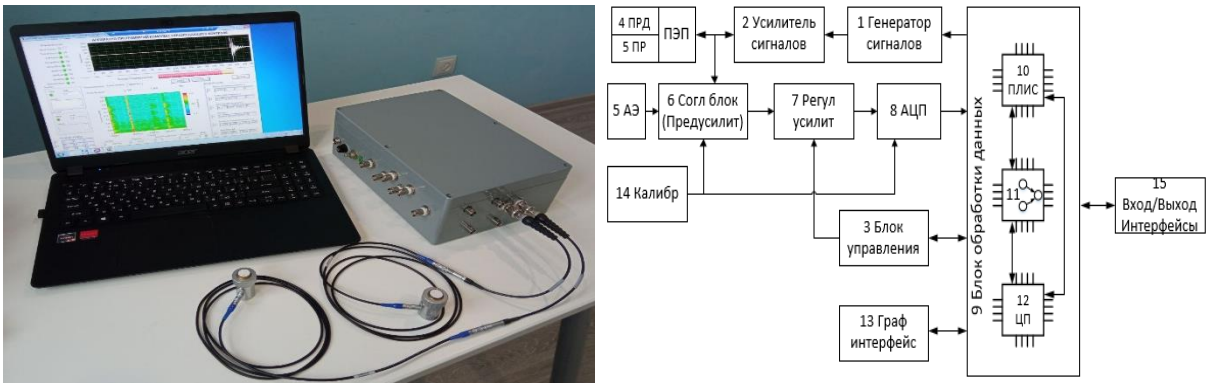


Рис. 28 – Аппаратно-программный комплекс интеллектуального управления техническими и технологическими объектами (внешний вид и структурная схема)

Особенности описанных представлений для различных типов объектов представлены в таблице 4, где цветовой легендой отмечена степень соответствия моделей вычислений для *представления* различных типов технических и технологических объектов, что подтверждено актами внедрения в табл. 4.

Таблица 4 – Использование моделей вычислений для представления различных технических и технологических объектов

Модели вычислений		Технические объекты							Технологические объекты	
		Газотранспорт	Импульсный блок питания	Фрезерный станок	Структура металла	Робототехника	Трубы	Металлорежущее оборудование	Наплавка металла	Гидрирование
«Мягкие»	Нейронные сети	●	○	◍		●	●	○	●	●
	Нечёткие отношения	●	●	◍				◍		◍
	Нейро-нечеткие	◍			○		●		●	●
Биоинспирированные	Эволюционно-генетические			◍		●		●		
	Популяционные			◍		●				◍
Прогностические	Авторегрессионные		●	●	◍	○		●	○	
	Ансамблевые		●	●	◍	○		●	○	
Оптимальный синтез	Контролепригодность	◍	●		●	◍	●	◍	●	◍
	Отказоустойчивость	●	●	◍	◍	●	○	●	◍	●
	Экобезопасность	●	○	●		○	◍	○		●

● - модель вычислений применима; ◍ - модель вычислений в разработке; ○ - в перспективе.

Таблица 5 – Результаты внедрения

№	Отрасль	Организация (НИИ, НПО, НПП и т.д.)	Решаемые задачи
1	Металлообработка и машиностроение	1. Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ "НИИИС им. Ю.Е. Седакова" (г. Н.Новгород) 2. АО ПКО Теплообменник (г. Н.Новгород) 3. АО «Нижегородский завод 70-летия Победы» (г. Н.Новгород) 4. АО «ЦНИИ «Буревестник» (г. Н.Новгород)	Разработка аппаратно-программного информационно-управляющего канала для диагностирования и управления технических объектов. Разработка системы диагностирования и входного контроля для труб малых диаметров на основе искусственных нейронных сетей и нейронечётких моделей вычислений. Автоматизированная система сбора данных и контроля параметров производственного и учебного станочного оборудования Система контроля и управления имитационно-моделирующих стендов для отработки артиллерийских комплектов
2	Радиоэлектронная	1. ООО "ЭКО-ТЕХ Микроэлектроника" (г. Н.Новгород) 2. ООО "Корпорация спецтехнологического оборудования "ВИТРИ"	Исследование и анализ состояния оборудования и технологической оснастки предприятия для управления качеством его состояния. Создание интеллектуальной системы автоматического позиционирования компонентов при микросварке изделий микроэлектроники на основе адаптивных моделей вычислений
3	Транспортная	ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» (г. Н.Новгород) ООО Автомобильный завод «ГАЗ» (г. Н.Новгород)	Организация технического обслуживания и ремонта оборудования на основе индекса технического состояния Методы расчёта оптимальной траектории движения лакокрасочных промышленных роботов
4	Авиастроение	ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» НАЗ «Сокол» (г. Н.Новгород)	Обеспечение контролепригодности технических объектов; формирование планов ТОИР производственных объектов.
5	Наука и образование	ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева» (г. Н.Новгород)	В учебном процессе ФГБОУ ВО «НГТУ т им. Р.Е. Алексеева» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Мехатроника и робототехника»

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сформулирована **научно-техническая проблема** обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов *сложной* структуры.
2. Предложена **концепция** обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов.
3. Разработана **открытая система адаптивных моделей вычислений,** включающая *«мягкие»* (в том числе модифицированные нейро-нечёткие), *биоинспирированные* (в том числе модифицированные эволюционно-генетические) и *прогностические* (в том числе основанные на ансамблевых технологиях машинного обучения) модели вычислений.
4. Разработана **методология** интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, основанная на предложенной открытой системе адаптивных моделей вычислений, а также включающая:
   - 4.1 **Индекс технического состояния** (ИТС), позволяющий провести оценку качества состояний технических и технологических объектов.
   - 4.2 Методика оценки экобезопасности состояний технических и технологических объектов, позволяющая сформулировать **комплексный показатель экобезопасности.**
   - 4.3 **Модифицированная функциональная систематика**, включающая совместное использование **индекса технического показателя** (ИТС) и **комплексного показателя экобезопасности.**
   - 4.4 **Модели оптимального синтеза** контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасносных объектов.
5. Разработана **обобщённая структурно-функциональная схема** интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, в соответствии с условиями и свойствами решаемых задач и подтвержденная патентами РФ на полезную модель и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.
6. Реализован **аппаратно-программный комплекс** для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.
7. Выполнена **практическая реализация** интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний промышленно-ориентированных

технических и технологических объектов, что подтверждено соответствующими *актами о внедрении*.

8. Выполнено внедрение в **учебно-методический процесс** ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева», а также в работу НИЛ «Диагностика и прогнозирование технического состояния оборудования» ФГБОУ ВО «НГТУ Р.Е. Алексеева».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Манцеров, С.А.** Нейронечеткая классификация технических состояний объектов сложной структуры // Информационные технологии. 2023. №2(29). С. 91-97

2. **Манцеров, С.А.** Интеллектуальная диагностика динамических процессов технологического оборудования / С.А. Манцеров, Н. Алхатиб, Л.О. Федосова и др. [Текст] / Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – No11. – С. 327-330.

3. **Манцеров, С.А.** Функциональная систематика в управлении качеством и безопасностью состояний сложных технических объектов [Текст] / Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. – № 1. – С. 25-33. – DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_25

4. **Манцеров, С.А.** Идентификация состояний объектов сложной структуры на основе нейронечётких технологий / Ломакина Л.С., Манцеров С.А. //Системы управления и информационные технологии. – 2022. – №1(87). – С. 88-99.

5. **Манцеров, С.А.** Оптимизация алгоритма синтеза экобезопасных систем [Текст] / Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – No2. – С. 48-51.

6. **Манцеров, С.А.** Оптимизация алгоритмов синтеза контролепригодных систем /Ломакина Л.С., Манцеров С.А. //Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – 9(4). Доступно по: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1113 DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.040

7. **Манцеров, С.А.** Управление техническим состоянием сложных систем на основе нечеткой модели [Текст] / С.А. Манцеров, Е.А. Гаврилюк // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 1 (51). – С. 91–98.

8. **Манцеров, С.А.** Система сбора и подготовки диагностической информации для удаленного использования [Текст] / А.М. Бремзен, К.В.Ильичев, С.А. Манцеров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – №4 (119).

9. **Манцеров, С.А.** Разработка стратегии обслуживания и ремонта оборудования газотранспортного предприятия на основе индекса технического состояния [Текст] / Е.А. Гаврилюк, С.А. Манцеров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 3 (118). – С. 121–126.

10. **Манцеров, С.А.** Разработка масштабируемой мобильной робототехнической системы роевого взаимодействия [Текст] /К.В. Ильичев, С.А.

Манцеров // Вестник ПНИПУ Электротехника, Информационные технологии, системы управления. – 2017. – №21. – С. 91-108.

11. **Манцеров, С.А.** Прогнозирование отказов систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами на основе индекса технического состояния и степени риска [Текст] / Е.А. Гаврилюк, С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7-2. – С. 309–313.

12. **Манцеров, С.А.** Комплексная оценка технического состояния систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами [Текст] / Е.А. Гаврилюк, С. А. Манцеров, С.Г. Синичкин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11. – С. 2141–2145.

13. **Манцеров, С.А.** Интеллектуальное управление процессом аддитивного электродугового выращивания / Манцеров С.А., Аносов М.С., Аносова Е.С. и др. [Текст] / Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – No12. – С. 175-179.

14. **Манцеров, С.А.** Аппаратно-программный комплекс для цифрового двойника процессов аддитивной электродуговой наплавки/ Манцеров С.А., Аносов М.С., Кротиков Д.А., Аносова Е.С.// Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – No1. – С. 93-95.

15. **Манцеров, С.А.** Создание системы комплексной оценки состояния станочного оборудования предприятия [Текст] / С.А. Манцеров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-4. – С.754-758.

16. **Манцеров, С.А.** Развитие системы единой функциональной систематики для хранения данных о техническом состоянии объекта [Текст] /С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – №6 ч.1 - С. 235-238.

17. **Манцеров, С.А.** Создание единого информационного кросс-платформенного пространства промышленного предприятия [Текст] / И.В. Гусев, С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник ВГТУ. – 2013. – Т.9. – №6-2. – С. 45-49.

18. **Манцеров, С.А.** Создание единого информационного пространства машиностроительного предприятия на основе облачных технологий [Текст] /А.В. Волгин, И.В. Гусев, С.В. Куликов, С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник ВГТУ. - 2012. – Т.8. – №6. – С. 44-47.

19. **Манцеров, С.А.** Структурная систематика единого информационного пространства машиностроительного кластера [Текст] /С. А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник ВГТУ. – 2008. – Т.4. – №1. – С. 37-42.

20. **Манцеров, С.А**. Создание баз данных объектов машиностроения на основе формул функциональной систематики [Текст] /С. А. Манцеров // Вестник ВГТУ. – 2007. – Т.3. – №11. – С.171-176.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS

1. **Mantserov, S. A.** Classification of States of Multidimensional Objects Using a Soft Calculations Model/ S. A. Mantserov, L.O. Fedosova, L. S. Lomakina // International Russian Automation Conference (RusAutoCon-2022) – Mode of access:https://www.researchgate.net/publication/336562777_Development_of_Model_of_Active_Noise_Reduction_in_Internal_Combustion_Engines. – Title from screen.

2. **Mantserov, S. A.** Software development for automated system of recording the range of motion of the shoulder joint during rehabilitation / [Electronic resource] /S. A. Mantserov, L.O. Fedosova, M.A. Grishin // Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. Mode of access: https://ieeexplore.ieee.org/document/9111900 – Title from screen.

3. **Mantserov, S. A.** Development of a model of active noise reduction in internal combustion engines[Electronic resource] /S. A. Mantserov, A.N. Kocherov, A.V. Okunev // International Russian Automation Conference (RusAutoCon-2019) –Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/336562777_Development_of_Model_of_Active_Noise_Reduction_in_Internal_Combustion_Engines. – Title from screen.

4. **Mantserov, S. A.** Parametric model of the pipe defect description for the generation of the training set for machine learning in data-poor conditions [Electronic resource] /S. A. Mantserov, L.O. Fedosova, A.P. Tsapaev // Russian Automation Conference (RusAutoCon-2019) Mode of access: https://ieeexplore.ieee.org/document/8867740/references#references – Title from screen

5. **Mantserov, S. A.** Group Robotic Platform Based on Mechanisms of Swarm Intelligence [Electronic resource] / S. A. Mantserov, K. V. Ilichev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 15-18 May 2018/ Mode of access: https://ieeexplore.ieee.org/document/8728820.

6. **Mantserov, S. A.** Information Decision-Support System on the Basis of the Method of Diagnostics and Control of the Technical State of Industrial Equipment [Electronic resource] / E. A. Gavrilyuk, S. A. Mantserov, K. V. Ilichev, M. I. Turikov // Dinamics of Systems, Mechanisms and Machines, 13-15 November 2018. / IEEE Xplore Digital Library. –Omsk, 2018. – P. 1–7. – Mode of access: https://ieeexplore.ieee.org/document/8601472. – Title from screen.

7. **Mantserov, S. A.** Fuzzy Reliability Model of Systems for Decision Support in Technical Diagnostics [Electronic resource] / E. A. Gavriliuk, S. A. Mantserov // CEUR Workshop Proceedings. – Electronic text data. – 2018. – Vol. 2258. – P. 222–234. Mode of access: http://ceur-ws.org/Vol-2258/paper28.pdf. – Title from screen.

Монографии

1. Ломакина Л.С., Манцеров С.А, Чернобаев И.Д. Нейро-нечеткие классификаторы. Теория и практика //Научная книга, Воронеж 2022, 137 с.
2. Ломакина Л.С., Манцеров С.А., Панов А.Ю. Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов // Научная книга, Воронеж 2022, 192 с.

Патенты на полезную модель

1. Патент RU 128757 U1. Система контроля состояния дискретных источников сигналов : № 2012154902/08 : заявл. 18.12.2012 : опубл. 27.05.2013/ С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев; заявитель, патентообладатель Нижегород. гос. техн. ун-т. – 14 с.
2. Патент RU 129689 U1. Система контроля состояния дискретных источников сигналов : № 2012154903/08 : заявл. 18.12.2012 : опубл. 27.06.2013 / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев; заявитель, патентообладатель Нижегород. гос. техн. ун-т. – 19 с.
3. Патент RU 128758 U1. Система контроля состояния дискретных источников сигналов : № 2012154904/08: заявл. 18.12.2012 : опубл. 27.05.2013 / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев; заявитель, патентообладатель Нижегород. гос. техн. ун-т. – 15 с.
4. Патент РФ RU 128759 U1. Система контроля состояния дискретных источников сигналов : № 2012155838/08: заявл. 21.12.2012 : опубл. 27.05.2013 / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев; заявитель, патентообладатель Нижегород. гос. техн. ун-т. – 16 с.
5. Патент №137837 Система контроля состояния дискретных источников сигналов и линии связи : № 2013142384 : заявл. 17.09.2013 : опубл. 05.02.2014 / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев ; заявитель, патентообладатель Нижегород. гос. техн. ун-т. – 11 с.
6. Патент № 217099. Режущая пластина с многослойным покрытием : № 2022131913: заявл. 07.12.2022 : опубл. 16.03.2023 / Ю.Г. Кабалдин, С.А. Манцеров, М.С. Аносов и др. ; заявитель, патентообладатель Нижегород. гос. техн. ун-т. – 4 с.
7. Патент №219388. Низкочастотный продольно-изгибный пьезокерамический преобразователь с корректируемой частотой резонанса : № 2023105114 : заявл. 06.03.2023 : опубл. 13.07.2023 / А.И. Хилько, А.А. Куркин, С.А. Манцеров и др. ; заявитель, патентообладатель Нижегород. гос. техн. ун-т. – 7 с.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662285. iIndex 1.0 / Гаврилюк Е. А., Манцеров С. А., Ильичев К. В., Тюриков

М. И.; правообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р. Е. Алексеева». – № 2017619139; заявл. 12.09.2017; опубл. 02.11.2017. – М. :Роспатент, 2015.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021614913 Анализ структурно-механических характеристик металлических материалов при многоэтапном пластическом деформировании / В.В. Галкин, Г.Н. Гаврилов, С.А. Манцеров, Д.О. Дудников, Н.А. Огурцов // правообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р. Е. Алексеева». – № 20211613777; заявл. 31.03.2021.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684547 Диагностика остаточного ресурса и поврежденности сплавов на основе неразрушающих методов контроля, анализа изображений микроструктур и машинного обучения /М. С. Аносов, С.А. Манцеров, Л.С. Ломакина, А.Н. Двитовская. Заявка № 2023682263; 16.11.2023.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022614430 Программный комплекс для генерации синтетических многомерных объектов /Л.О. Федосова, С.А. Манцеров, А.П. Цапаев, О.В. Кретинин. Заявка №2022612717; 21.03.2022.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023665577 Программный комплекс распознавания голоса для управления технологическим оборудованием /Л.О. Федосова, С.А. Манцеров и др. Заявка №2023662849; 18.07.2023.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017661419 Рабочее программное обеспечение РПО «Корпоративный портал» версия 1 [Текст] / В.Н. Дмитриев, Е.А. Грошева, С.А. Манцеров, А.Ю. Панов, И.В. Гусев., С.В. Крайнов, С.В. Куликов, А.С. Зеленкин // правообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р. Е. Алексеева». – № 2017618248; заявл. 15.08.2017.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613502 Определение величины зерна для количественной оценки холоднодеформированного состояния сталей и сплавов / Н.Н. Вилков, В.В. Галкин, С.А. Манцеров, Е.Г. Терещенко, А.А. Дербенев А.В. Кошелев // правообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р. Е. Алексеева». – № 2014610743; заявл. 27.03.2014.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023687587 18.12.2023. Программа для диагностики состояния изделий, полученных аддитивной наплавкой /Манцеров С.А., Аносов М.С., Иванов С.В., Желонкин М.В. Заявка от 05.12.2023.

Кроме указанных в реферате материалы по теме диссертационной работы изложены в трудах 28 международных и всероссийских научных конференций.