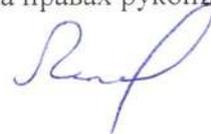


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

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)

*Диссертация на соискание учёной степени
доктора технических наук*

Научный консультант
д.т.н., профессор Ломакина Любовь Сергеевна

Нижний Новгород – 2024 г.

Оглавление

Введение	6
1 Методологические аспекты управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.....	17
1.1 Роль и место рассматриваемой проблемы, её значимость.....	17
1.2 Сравнительный анализ известных работ в области обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов.....	28
1.3 Обоснование нового подхода к решению проблемы обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов.....	31
2 Базовая модель управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.....	33
2.1 Формализация состояний технических и технологических объектов.....	33
2.1.1 Основные принципы управления качеством состояний технических и технологических объектов.....	33
2.1.2 Индекс технического состояния технических и технологических объектов.....	40
2.1.3 Нечёткая модель представления состояний технических и технологических объектов	46
2.2 Оценка экобезопасности состояний технических и технологических объектов.....	51
2.3 Модифицированная функциональная систематика для обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов	57
2.4 Идентификация состояний технических и технологических объектов	68

2.5	Функциональная схема управления качеством состояний технических и технологических объектов	72
2.6	Выводы по главе 2.....	75
3	Концептуальный анализ. Открытая система адаптивных моделей вычислений для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов ...	76
3.1	Модели «мягких» вычислений	76
3.1.1	Нейросетевые модели вычислений.....	77
3.1.2	Нечёткие модели вычислений (нечёткие отношения).....	92
3.1.3	Нейро-нечёткие модели вычислений.....	95
A.	Адаптивная нейро-нечеткая интерференционная модель вычислений (ANFIS).....	95
B.	Нейро- нечёткий классификатор (ННК).....	99
3.2	Биоинспирированные модели вычислений	106
3.2.1	Эволюционно-генетические модели вычислений	107
A.	Модифицированные эволюционно-генетические модели вычислений.....	109
B.	Параллельные модифицированные эволюционно-генетические модели вычислений.....	117
3.2.2	Параллельно – популяционные модели вычислений.....	120
3.3	Прогностические модели вычислений.....	124
3.3.1	Модифицированные авторегрессионные модели вычислений.....	124
3.3.2	Ансамблевые технологии машинного обучения.....	138
3.4	Схема открытой системы адаптивных моделей вычислений для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.....	146
3.5	Выводы по главе 3.....	146

4 Модели оптимального синтеза контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасных технических и технологических объектов	148
4.1 Модель информационного синтеза контролепригодных объектов.....	148
4.2 Модель структурного синтеза отказоустойчивых объектов	157
4.3 Модель функционального синтеза экобезопасных объектов.....	163
4.4 Выводы по главе 4.....	168
5 Практическая реализация интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов ...	169
5.1 Обобщенная структурно-функциональная схема интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.....	169
5.2 Примеры технических и технологических объектов. Промышленные применения.....	172
5.2.1 Оборудование газотранспортного предприятия.....	172
5.2.2 Импульсный блок питания.....	175
5.2.3 Технологический процесс гидрирования этан-этиленовой фракции	185
5.2.4 Технологический процесс наплавки металла	192
5.2.5 Фрезерный станок Корвет-82	195
5.2.6 Трубы малого диаметра	201
5.2.7 Металлорежущее оборудование.....	207
5.2.8 Структурная поврежденность материалов	211
5.2.9 Робототехнический комплекс	215
5.3 Аппаратно-программный комплекс интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.....	223
5.4 Результаты внедрения	230
5.5 Выводы по главе 5.....	233

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	234
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	236
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	238

Приложение 1. Копии патентов на полезную модель

Приложение 2. Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ

Приложение 3. Копии документов о внедрении результатов диссертационной работы

ВВЕДЕНИЕ

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 нормативных документах, определяющих развитие промышленного производства в Российской Федерации, таких как «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, что «применение автоматизированных систем управления и контроля технологических процессов носит фрагментарный характер. Применение информационных технологий без связи с технологическим оборудованием недостаточно эффективно», и в то же время «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 обеспечения **качества** 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*) состояний 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. На сегодняшний день любые сложные объекты на производстве могут быть снабжены многочисленными датчиками и микроконтроллерами, что генерирует большие объёмы информации и требует использования новых подходов к их анализу для управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

Степень разработанности темы.

Решающую роль в управлении качеством состояний технических и технологических объектов играет контроль технического состояния. В настоящее время ведутся активные исследования в области технического диагностирования, контролепригодности и отказоустойчивости 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, С. Ramamoorthy, I. Mayeda, J. Wegener, J. Ribero, A. Arcury, J. Shiozaky и других отечественных и зарубежных авторов. Вопрос достаточно широко изучен, однако остаётся ряд задач, связанных с оперативными вычислениями при применении существующих методов к обеспечению качества состояний технических и технологических объектов, поэтому разработка новых эффективных подходов в данной области 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 (ТОиР) оборудования 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 отражены в работах А.Н. Черепанова, Ф. Элингера, Д. Моубрэя, А. Гралль, В. Сянь и др. авторов. В этой связи требуется определить подход к повышению эффективности системы ТОиР, с учетом наличия возможностей и специфики производства.

Проблема обеспечения экобезопасности состояний 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, И.Л. Кашириной, В.В. Довгуша, М.Н. Тихонова, W. Willmann, M. Nikiforos и др. Предлагаемые подходы позволяют проводить анализ утилизируемого объекта 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 новых моделей вычислений для интеллектуализации управления состояниями объектов, 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. Баршдорф, Коффман, Р. Клинг, П. Банерджи, Э. Фалькенауер и др., и в российской - И.Л. Букатова, Д. И. Батищев, Я.Е. Львович, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик, А.П. Карпенко, Н. В. Старостин и др.

В связи с этим, большое количество публикаций и практическая значимость данной области подтверждают актуальность разработки интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

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 выбора и создания адаптивных моделей вычислений, а также моделей оптимального синтеза контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасных объектов. 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. Оптимизация алгоритмов 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 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; теоретико-множественный и теоретико-информационный анализ информационных систем; 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 новизны 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. (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 открытая 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 предложенная 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. Авторские права защищены 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 НИР и СЧ ОКР по договорам:

- 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 СЧ 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 9 грантов и прикладных НИР.

При реализации программы развития системы подготовки кадров для оборонно-промышленного комплекса в образовательных организациях высшего образования, подведомственных Министерству образования и высшего образования Российской Федерации «Новые кадры ОПК» (2014 - 2019 г.)

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 состояний технических и технологических объектов.

Апробация результатов исследования.

Основные положения и результаты исследования были представлены на следующих конференциях:

- **Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям (IS&IT'23, IS&IT'22, IS&IT'18) (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, 2023, 2017, 2012, 2011, 2006, 2005, 2002);**
- **Всероссийская научно-методическая конференция «Инновационные технологии в образовательной деятельности» (Нижний Новгород, 2024, 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, 8 статей в изданиях, индексируемых Scopus/Web of Science, 2 монографии (в соавторстве), 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, выносимых на защиту, а именно в:

- разработке и реализации открытой системы адаптивных моделей вычислений;
- создании *индекса технического состояния* (ИТС);
- оценке экобезопасности состояний технических и технологических объектов, позволяющей сформулировать *индекс экобезопасности*;
- *модификации функциональной систематики*;
- разработке компонентов *аппаратно-программного комплекса* интеллектуального управления качеством состояний технических и технологических объектов.

Все представленные в диссертации положения, выносимые на защиту, получены лично автором, либо под его руководством.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежат:

- в [67, 74, 80-82, 105, 119-123, 167, 169, 201-204] - разработка принципов интеллектуального управления качеством состояний технических и технологических объектов на основе индексов технического состояния и экобезопасности;
- в [68, 88-89, 91, 117-118, 128, 143] - разработка открытой системы адаптивных моделей вычислений;

- в [93-94, 100-103, 106] - постановка задачи, методика реализации алгоритмов синтеза экобезопасных технических и технологических объектов;
- в [86-87, 98, 104, 116, 151, 170, 174-176, 180] - постановка задачи, разработка алгоритмов решения задач обеспечения контролепригодности, экобезопасности и отказоустойчивости технических и технологических объектов.

В большинстве работ, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит определяющая роль при постановке задачи, её исследовании и получении результатов,

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.

1 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И ЭКОБЕЗОПАСНОСТЬЮ СОСТОЯНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

1.1 Роль и место рассматриваемой проблемы, её значимость

В «Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» [1] утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 января 2020 г. №20-р, отмечается, что в настоящее время «применение автоматизированных систем управления и контроля технологических процессов носит фрагментарный характер. Применение информационных технологий без связи с технологическим оборудованием недостаточно эффективно».

В то же время, в «Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года» [2] утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 июня 2020 г. № 1512-р сказано «В промышленном производстве расширяется применение автоматизированных систем управления и контроля технологических процессов на всех производственных стадиях и видах производств», и «к проблемам конкурентоспособности можно отнести недостаток компетенций, характерных для сервисной экономики и четвертой промышленной революции, - слабое развитие систем гарантийного ремонта и сервисного обслуживания (в том числе за рубежом), несоответствие современным экологическим требованиям», а также «экономические и в последнее время наиболее часто наблюдаемые экологические ограничения используются для политического давления».

В сфере современного высокотехнологичного производства ставятся особенно строгие критерии к качеству и экологической безопасности (экобезопасности) состояний технических и технологических объектов, что значительно выделяет их на фоне традиционных производственных практик. Такие повышенные требования обусловлены интенсивным внедрением научно-

исследовательских и опытно-конструкторских разработок, сокращением периодов разработки и запуска новинок на рынок, а также строгими нормами в отношении экологической безопасности изделий и процессов их создания. Эти условия требуют формирования интегрированного и систематизированного подхода к контролю за качеством и экобезопасностью технических и технологических объектов.

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».

Чтобы обеспечить контроль за качеством состояний технических объектов или технологических процессов, критически важно выполнить анализ их технического состояния. Под *качеством* [3] таких объектов или процессов понимается набор характеристик, определяющих их способность соответствовать установленным критериям и требованиям, исходя из их предназначения.

В процессе определения качества состояния технического объекта применяют *показатели качества*, которые представляют собой количественные оценки свойств объекта, анализируемые в контексте определенных условий его разработки, изготовления или использования, т.е. на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ). Основой для анализа показателей качества состояния технических и технологических объектов служит, в первую очередь, оценка их технического состояния.

Оценка технического состояния (ТС) объекта представляет собой процедуру выявления, насколько характеристики, отражающие его ТС, соответствуют необходимым стандартам. Этот процесс может быть как качественным, так и количественным. Важнейшим преимуществом

количественного анализа является способность к математическому моделированию ТС объекта, что значительно улучшает возможности организации данных и обеспечивает более эффективное суммирование сведений о состоянии объекта. Диагностирование – это процесс установления технического состояния объекта [4]. Первые работы [5, 6], в которых фигурировал термин «техническое диагностирование» появились в середине 60-х годов прошлого века. Диагностирование возможно на всех стадиях ЖЦ объекта. На самом начальном этапе проектирования системы диагностирования необходимо определить требования к элементам системы диагностирования, при этом данные элементы должны быть согласованы между собой. В процессе эксплуатации диагностирование ведётся непрерывно или периодически с целью контроля состояний технического или технологического объекта.

Согласно ГОСТ 18322-2016 [7], различают такие виды ТС объекта, как исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное и предельное состояния. Эти категории описываются через комплекс параметров, отражающих как количественные, так и качественные аспекты объекта. Определение соответствующих значений этих параметров производится на основании стандартов и требований, установленных в нормативно-технической документации для технического и технологического объекта. Таким образом, для обеспечения исправного или работоспособного состояний технических и технологических объектов, позволяющих эффективно реализовывать функциональное назначение данных объектов, при проведении работ по ТОиР целевым назначением, является решение о включении объекта в план ремонта (целевого управляющего воздействия) или предусматривается его полная замена. При этом срок эксплуатации технических и технологических объектов характеризуется не только их отказом, но и переходом в предельное состояние. Все это создает потребность в создании системы управления качеством состояний технического или технологического объекта.

Однако не всегда можно предусмотреть возникновение отказов на основе набора значений параметров технического или технологического объекта.

Объекты, имеющие важное функциональное значение, с позиций обеспечения работоспособного состояния, наделяются свойством отказоустойчивости. Отказоустойчивостью [8] является свойство технических и технологических объектов обеспечивать их постоянную работоспособность, после отказа одной или нескольких составных частей, в результате отказоустойчивость достигается с помощью средств диагностирования и восстановления, посредством реконфигурирования топологии информационных связей [9], а также внедрением механизмов дублирования, избыточности или резервирования критически важных функциональных узлов и связей в составе технического и технологического объекта.

Следовательно, возможность диагностирования технических и технологических объектов сложной структуры необходимо предусмотреть на стадии их проектирования и разработки, т.е. сразу включить в проект такие положения, которые давали бы возможность диагностировать их, точно определять дефекты, производить настройку и наладку режимов функционирования. В результате, это позволяет сократить время проведения ТОиР [7], уменьшить сложность средств диагностирования, что ведёт к обеспечению общей экономии времени и затрат.

На стадии проектирования изделия реализуются требования к конструктивному исполнению его в смысле приспособленности к техническому диагностированию, оцениваются показатели контролепригодности. Согласно ГОСТ 26656-85 [10] под **контролепригодностью** будем понимать свойство объекта сложной структуры, характеризующее его приспособленность к контролю и техническому диагностированию. При этом, восстановление технических и технологических объектов после отказа в первую очередь определяется их приспособленностью к обнаружению (локализации) места дефекта. Время восстановления объекта зависит от временных затрат на обнаружение дефекта, с учётом использования специальных приспособлений (инструментов, приборов) для проведения технического диагностирования, а в том случае, если технический или технологический объект не приспособлен для проведения контроля и

технического диагностирования, то временные затраты на проведение вспомогательных операций или процедур, могут составить значительную долю от общего времени восстановления объекта. Поэтому, для сокращения затрат на восстановление технических и технологических объектов после отказа необходимо обеспечить приспособленность объектов к диагностированию и контролю, т.е. их *контролепригодность* [11].

По данным нормированных значений показателей приспособленности изделия к диагностированию в соответствии с ГОСТ Р 56397-2015 «Техническая экспертиза работоспособности радиоэлектронной аппаратуры, оборудования информационных технологий, электрических машин. Общие требования» [12] ситуация складывается весьма сложная (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Требования к контролепригодности технических и технологических объектов при восстановлении работоспособности

Среднее время поиска дефекта, мин	Варианты решений обеспечения контролепригодности	Требования к обеспечению контролепригодности объекта
До 26	1-2	Автоматизированное диагностирование без разборки технического объекта
Свыше 26 до 78	2-6	Диагностирование по алгоритмам преимущественно без разборки технического объекта
Свыше 78	7	Диагностирование с применением сборки-разборки объекта и универсальных измерительных приборов

Таким образом, если технический и/или технологический объект не приспособлен к проведению диагностированию, то вспомогательные операции составляют 60...80 % от общего времени диагностирования. Стоимость одного отказа технического или технологического объекта может достигать до огромных

размеров, а самое главное – отказ может привести к аварии с тяжелыми последствиями для самого производства, а также окружающей среды и обслуживающего персонала.

При этом, существующие описания технических состояний объектов, весьма условны. Исправное состояние объекта – это состояние, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации [7] (рис. 1.1).

Неисправное состояние объекта – состояние, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований документации [13]. Явление, приводящее к утрате идеального состояния технического или технологического объекта, при этом не лишая его способности функционировать, определяется как *дефект* [10]. При работоспособном состоянии объекта значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. Если значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность объекта выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям документации, то такое состояние называется неработоспособным. Изменение работоспособного состояния объекта в результате любого события, носит название *отказ* [7].

Следует подчеркнуть, что границы между упомянутыми состояниями технического или технологического объекта отличаются неопределенностью. Достижение оптимального уровня функционирования объекта возможно только при его полной работоспособности. В случае, когда объект находится в состоянии ограниченной работоспособности, его способность к эффективному выполнению задач будет заметно снижена. Процесс перехода из состояния исправности и работоспособности в неработоспособное состояние связан с потерей объектом возможности исполнять предназначенные ему функции, что и определяется как отказ.

Схема постоянных состояний и событий объектов представлена на рис. 1.1.

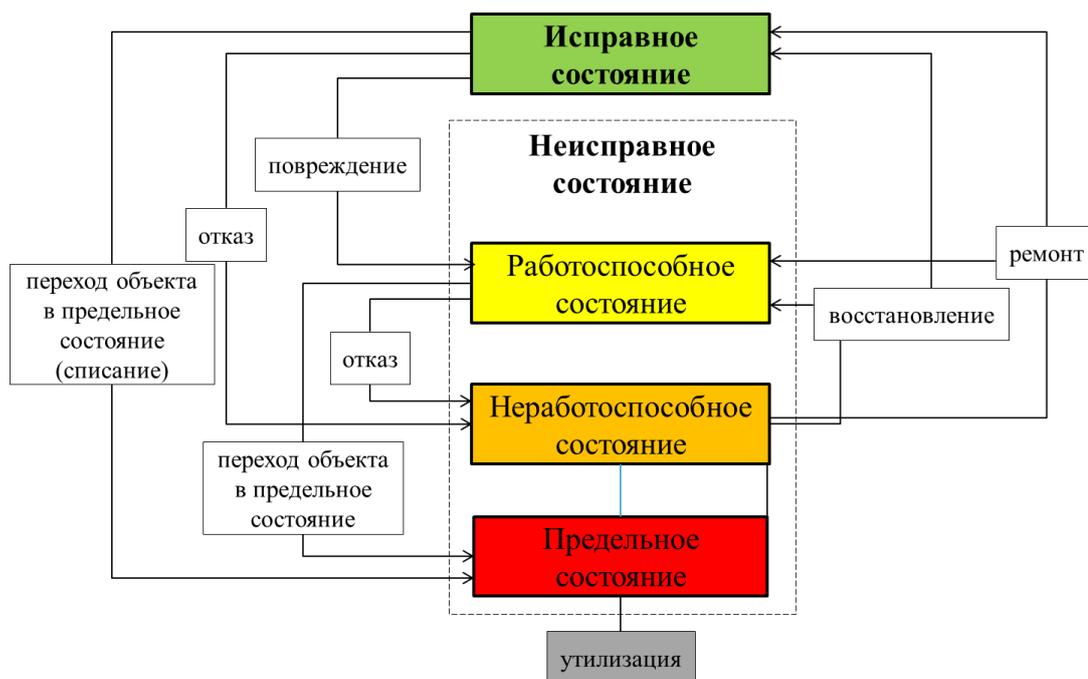


Рис. 1.1. Схема постоянных изменений состояний технических и технологических объектов

Если исправное состояние объекта гарантирует его полную работоспособность, то есть его способность функционировать на оптимальном уровне для решения поставленных задач, то объект в рабочем состоянии может иметь определенные дефекты. Эти недостатки могут выражаться в несоответствии с некоторыми требованиями технической документации, регламентирующей эксплуатацию объекта. Однако такие несоответствия не мешают объекту выполнять основные функциональные задачи (например, эстетические требования, звуковые характеристики и др.).

Таким образом, можно констатировать, что задача определения состояний технического и/или технологического объекта имеет выраженный нечеткий характер, что требует использования *новых подходов* для его формализации.

В «Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года» [14] утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 г. №84-р, в частности, говорится, что «Одной из нерешенных задач на федеральном и региональном уровнях является создание инновационной, технико-экономической системы, позволяющей минимизировать количество

захораниваемых отходов, максимально обеспечив при этом ресурсосбережение, повторное вовлечение в хозяйственный оборот утилизируемых компонентов отходов в качестве сырья, материалов, изделий, превращение отходов во вторичное сырье для изготовления новой продукции» и в «Стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года» [2] 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, - слабое развитие систем гарантийного ремонта и сервисного обслуживания (в том числе за рубежом), несоответствие современным экологическим требованиям» и «Экономические и в последнее время наиболее часто наблюдаемые экологические ограничения используются для политического давления». Таким образом, обеспечение соответствия состояний технических и технологических объектов актуальным экологическим стандартам становится ключевой задачей в области *экобезопасности* технических и технологических объектов. Преимущественно, она связана с реализацией действий, направленных на уменьшение, с определенной вероятностью, отрицательного воздействия на окружающую среду и здоровье людей, которое могут вызвать потенциально опасные аспекты функционирования данных объектов. Достижение целей экобезопасности невозможно без разработки и внедрения эффективных методов утилизации технических и технологических объектов после завершения их службы, поломки или вывода из эксплуатации.

В настоящее время, в отличие от ведущих мировых государств, степень утилизации подавляющего большинства видов промышленных технических и технологических объектов в нашей стране, недостаточна для выполнения обязательств, взятых на себя в рамках Парижского соглашения и выполнения нормативов [15] по Распоряжению Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3722-р «Об утверждении нормативов утилизации отходов от использования товаров на 2021 и 2022 годы».

Распоряжение Правительства РФ [15], гласит о том, что «подлежит утилизации после утраты ею потребительских свойств», данные нормативы утилизации для наиболее распространенных групп технических и технологических объектов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Таблица нормативов утилизации

№ группы технических и технологических объектов	Наименование групп технических и технологических объектов	Норматив утилизации (%)
27	Компьютеры и периферийное оборудование, офисное оборудование"	15
28	Мониторы, приемники телевизионные	15
29	Оборудование коммуникационное	15
30	Техника бытовая электронная	15
31	Приборы оптические и фотографическое оборудование	15
33	Аккумуляторы свинцовые	20
34	Батареи аккумуляторные	20
35	Оборудование электрическое осветительное	15
36	Приборы бытовые электрические	15
37	Приборы бытовые неэлектрические	15
38	Инструменты ручные с механизированным приводом	15

К сожалению, данные показатели утилизации (от 15 до 20%) приведенные в табл. 1.2, для подавляющего количества технических и технологических объектов в Российской Федерации не выполняются [15]. Данный факт влечёт множество последствий: *экономические потери* для промышленности, ввиду недоиспользования значительной массы рециклируемых материалов, содержащихся в технических и технологических объектах, вышедших из эксплуатации; *экологические проблемы*, связанные с негативным влиянием на

окружающую природную среду, поскольку ведёт к захламлению территорий, к изменению химического состава почв, к загрязнению поверхностных и подземных вод и т. д.; невыполнение международных обязательств и установленных нормативов по декарбонизации промышленности. 21 сентября 2019 г. Россией было ратифицировано Парижское соглашение, согласно принципу национально определяемых вкладов была установлена цель по снижению выбросов парниковых газов (ПГ) [16] до уровня 70–75% относительно показателей 1990 года.

Таким образом, данная ситуация является причиной возникновения трудностей при управлении состояниями технических и технологических объектов на этапе утилизации, которые обусловлены, в первую очередь, конструкцией данных объектов и видами используемых материалов и компонентов, которые не допускают оперативного и качественного процесса демонтажа и дальнейшей переработки.

Под *утилизируемостью* объекта [14] подразумевают комплекс параметров конструкции, изделия или характеристик физико-химических свойств материала, который устанавливают при разработке изделия, уточняют на стадии изготовления продукции, реализуют при ликвидации изделия, определяя его приспособленность к полной, частичной или нулевой утилизации (с полным удалением путем уничтожения или захоронения) с применением технологических процессов заданной продолжительности (скорости), интенсивности. Данный критерий позволяет оценивать пригодность объекта к утилизации, включая отходы, которые он производит, и основывается на фундаментальной возможности его переработки и способности к утилизации. Утилизационная пригодность технических и технологических средств выражается через параметр, отражающий способность этих объектов (структур, продукции), признанных отходами, к переработке. Этот параметр указывает на потенциал для полного, частичного или невозможного возвращения в цикл использования посредством соответствующих технологических операций с учетом скорости процессов, экономии ресурсов и обеспечения экобезопасности.

Степень утилизируемости объекта оценивают через утилизационную способность [15]. Разработка технических и технологических объектов, пригодных для вторичной переработки, обусловлена как экологическими, так и экономическими целями. Некоторые принципы и правила проектирования для сборки могут быть использованы для оценки пригодности для вторичной переработки конструкций изделий. Эти показатели могут быть использованы для сравнительного анализа перерабатываемости различных продуктов. Это помогает разработчику в выборе структуры и состава технического или технологического объекта, связанного, в том числе с окончанием срока службы. Однако многие из существующих показателей пригодности для вторичной переработки доступны только после принятия проектных и производственных решений на ранних этапах ЖЦ. Если бы такие проектные решения могли быть приняты ранее в процессе проектирования, когда проектное пространство весьма широко, возможность вторичной переработки можно было бы рассмотреть раньше.

Адаптируемость (приспособленность) объектов к дальнейшей переработке позволяет существенно увеличить экономическую эффективность (рентабельность) [17] производства технических и технологических объектов. Для эффективного решения задачи *экобезопасности* состояний технических и технологических объектов, необходимо уже на стадии проектирования учесть возможность дальнейшей максимально полной переработки материалов и компонентов на стадии утилизации ЖЦ объекта.

Таким образом, для эффективного обеспечения качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, необходимо уже на стадии разработки и проектирования предусмотреть реализацию задач обеспечения контролепригодности, отказоустойчивости и экобезопасности, на основе использования новых подходов, и таким образом осуществить переход к управлению качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

1.2 Сравнительный анализ известных работ в области обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов

В настоящее время решение задач обеспечения качеством, в части контролепригодности, отказоустойчивости и экобезопасности технических и технологических объектов, сопряжено с существенными трудностями, связанными как с неприспособленностью современных промышленных устройств и систем к диагностированию, т.е. их сравнительно невысокой контролепригодностью [10] на этапе эксплуатации, так и неготовностью технических и технологических объектов к снятию диагностической информации с многочисленных датчиков и микроконтроллеров.

Вопросы обеспечения контролепригодности подробно рассмотрены в работах П.П. Пархоменко [19], Е.С. Согомоняна [20], А.В. Мозгалевского [21], Я.Я. Осис [22], В.И. Сагунова, Л.С. Ломакиной [15], В.В. Сапожникова [23], Р. Hayes, С.V. Ramamoorthy, I.W. Mayeda [24] и др. Однако подавляющая часть из них, рассматривает дискретные технические объекты. В то же время, класс непрерывных технических объектов и технологических процессов заслуживает внимания с точки зрения обеспечения контролепригодности.

Контроль качества состояний производимых объектов и оценка существующих с целью анализа их работоспособности, связаны со значительными временными и экономическими затратами, направленными на поиск и исправление дефектов. Данные затраты могут быть снижены за счёт разработки новых алгоритмов оценки и их внедрения в рамках интегрированной информационной поддержки на всех этапах ЖЦ технических и технологических объектов.

В настоящее время ведутся активные исследования в области диагностирования сложных объектов, данной теме посвящено большое количество работ: Карибского В. В., Пархоменко П. П., Е.С. Согомоняна, А.Ю. Аржененко, Д.В. Сперанского, В.В. Сапожникова, Л.С. Ломакиной [25], Д.В. Ефанова [26], J. Wegener [27], J. Shiozaky [28] и других отечественных и зарубежных авторов.

Вопрос достаточно широко изучен, однако существующие методы и алгоритмы, носят, как правило, частный характер, то есть разрабатываются заново для каждого класса систем. Также существует ряд нерешенных проблем, связанных с оперативными вычислениями при применении существующих методов к диагностированию современных сложных объектов, поиском неисправностей и необходимостью учета данных о вероятностях появления неисправностей, поэтому задача разработки новых методов диагностирования не теряет свою актуальность.

Стремление к повышению функциональности технических и технологических объектов значительно опережает темпы развития и усовершенствования существующих методов повышения надежности. В такой ситуации эффективным средством защиты от сбоев в работе является построение отказоустойчивых систем. Для технических и технологических объектов, к которым предъявляются повышенные требования в сфере безопасности, используется свойство отказобезопасности [8], т.е. способности объекта, переходить в такой режим, не представляющий опасности для людей и окружающей среды, когда часть составляющих компонент технического или технологического объекта находятся в неисправном состоянии в результате отказа.

Отказоустойчивость определяется количеством единичных отказов составных частей (элементов) системы, после наступления которых сохраняется работоспособность системы в целом. Базовый уровень отказоустойчивости подразумевает защиту от отказа одного любого элемента, поэтому основной способ повышения отказоустойчивости - это избыточность. Наиболее эффективно избыточность реализуется аппаратно, путём резервирования или дублирования. В ряде областей техники отказоустойчивость путём резервирования [29] или дублирования, является обязательным требованием, предъявляемым государственными надзорными органами к техническим и технологическим объектам. Данной теме посвящено большое количество работ: М.Ф. Каравая [29], В.В. Алексеева, П.Г. Королева [30], Сильянова Н.В., Graf S., Gössel M. и других [8, 31-37].

Большое число отечественных и зарубежных ученых и научных организаций занимались решением проблем, связанных с оценкой экологичности и разработкой методик проектирования и разработки технических и технологических объектов с учетом их последующей утилизации.

В работе [46] рассматривается технология проектирования коммерческих автомобилей с учетом дальнейшей утилизации в конце их ЖЦ, анализ практики и методов переработки в зарубежных странах, а также проводится оценка отечественной нормативно- правовой базы.

Работы [47-50] посвящены изучению методики экологической оценки технических объектов, которая учитывает этапы производства, эксплуатации и утилизации в конце ЖЦ объектов.

Проблема обеспечения экобезопасности технических и технологических объектов (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. [46-51] Предложенные подходы обеспечивают возможность оценки изделия, предназначенного для утилизации, включая его компоненты, что служит основой для разработки критериев утилизации. При этом обеспечивается возможность проведения оценки способности изделий к утилизации, на стадии предпроектных и проектных работ. Однако отсутствие обобщенной оценки, а также трудоёмкие и затратные вычисления при применении существующих методов к оценке способности изделий к утилизации, требует разработки новых комплексных методов оценки.

В настоящее время успешно развиваются научные школы, связанные с разработкой наукоемких моделей вычислений, в том числе «мягких», биоинспирированных и прогностических моделей [52]. К ним относятся американская, европейская и российская школы. Рассматривая американскую школу, следует выделить таких ученых, как Д.Холланд, Д.Гольдберг, Д.Коза, Л.Чабес, Д.Уитли и др., в европейской - Д. Баршдорф, Коффман, Р.Клинг, П.Банерджи, Э.Фалькенауер и др., и в российской - В.М. Курейчик, В.В. Курейчик, Л.А. Гладков, С.Л. Подвальный, В.Е. Алексеев, В.А. Таланов, Д.И. Батищев, Н.В.

Старостин и др. [52-65], что позволило обозначить проблему оперативного принятия решений для задач интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний сложных технических и технологических объектов.

В связи с этим можно утверждать, что большое количество публикаций и практическая значимость данной области подтверждают актуальность и необходимость разработки интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

1.3 Обоснование нового подхода к решению проблемы обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов

В настоящее время в промышленности наблюдается переход к производству, основанному на массовом внедрении информационных технологий, автоматизации бизнес-процессов и активном использовании систем искусственного интеллекта. Появляются совершенно новые, обладающие сложной структурой, технические и технологические объекты. Новые возможности открывает так называемая сенсорная революция в рамках Индустрии 4.0 (Industry 4.0, четвертая промышленная революция) [66], которая принесла с собой потоковые данные и необходимость в их обработке и выделении существенных событий. Сегодня любые сложные устройства на производстве могут быть снабжены многочисленными датчиками и микроконтроллерами, что генерирует огромные объемы информации и требует использования новых подходов к их анализу для обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов.

В рамках четвертой промышленной революции физические производственные процессы тесно интегрируются с системным программным обеспечением и вычислительными процессами в «киберфизические системы» [66]. Такие системы используют технологии с применением интеллектуальных датчиков [67], которые позволяют промышленным техническим и технологическим

объектам обмениваться информацией и принимать решения, что нашло широкое применение в робототехнических устройствах [68].

Применение традиционных подходов в решении задач обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов требует необходимости обработки больших массивов информации, что увеличивает время проектирования и затраты на разработку новых технических и технологических объектов, и ведёт к снижению оперативности и эффективности при принятии решений для управления качеством и экобезопасностью их состояний.

В тоже время сейчас успешно развиваются подходы, связанные с наукоёмкими моделями вычислений, в том числе, «мягкие», биоинспирированные и прогностические модели [52, 56, 69-73], что позволяет нивелировать проблему оперативного принятия решений для задач интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

В настоящее время активно используются так называемые гибридные алгоритмы адаптации и обучения [70], которые, оперируя с дискретными данными, позволяют непрерывно корректировать показатели качества состояний. В отличие от дискретных алгоритмов, которые могут быть в общем случае только приближенно оптимальными, гибридные, так же как и непрерывные алгоритмы, могут быть строго оптимальными.

Таким образом, предлагаются к рассмотрению адаптивные модели вычислений, которые в рамках открытой системы, т.е. которая непрерывно взаимодействует со своей средой, обеспечивают интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, что и составляет **новую методологию**.

2 БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И ЭКОБЕЗОПАСНОСТЬЮ СОСТОЯНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

2.1 Формализация состояний технических и технологических объектов

Формализация состояний технических и технологических объектов - представляет отображение состояний объекта в определенной форме, и определяет переход от нечетких задач управления состояниями технических и технологических объектов, возникающих в реальной действительности, к формальным моделям и выделению существенной информации об объекте, что является актуальной задачей.

2.1.1 Основные принципы управления качеством состояний технических и технологических объектов

Задачу обеспечения высокого уровня работоспособности и исправности объектов с помощью ремонта, технического обслуживания, восстановления, модернизации, а также создание условий, позволяющих уменьшить частоту отказов и возникающих дефектов, решает управление ТС, под которым понимают целенаправленное изменение состояния технических и технологических объектов путём управляющих воздействий, ведущих к достижению поставленной цели. Основным инструментом для изменения состояния технических и технологических объектов, в рамках процесса управления ТС является организация их ТОиР. В настоящее время инструментарий ТОиР позволяет обеспечить автоматизацию процессов управления качеством состояний технических и технологических объектов.

За последние десятилетия ТОиР производственных технических и технологических объектов, как сфера деятельности промышленного предприятия существенно изменилась [74]. Ключевой задачей внедрения принципов ТОиР

становится достижением эффективных показателей производственной и экономической деятельности промышленных предприятий, путём обеспечения качества состояний технических и технологических объектов.

Если рассматривать развитие принципов управления техническими и технологическими объектами промышленных предприятий [75], можно отметить следующую тенденцию: каждый новый этап развития имеет общие составляющие с предыдущим, но при этом реализуется на более развитом уровне (рис. 2.1) [77].

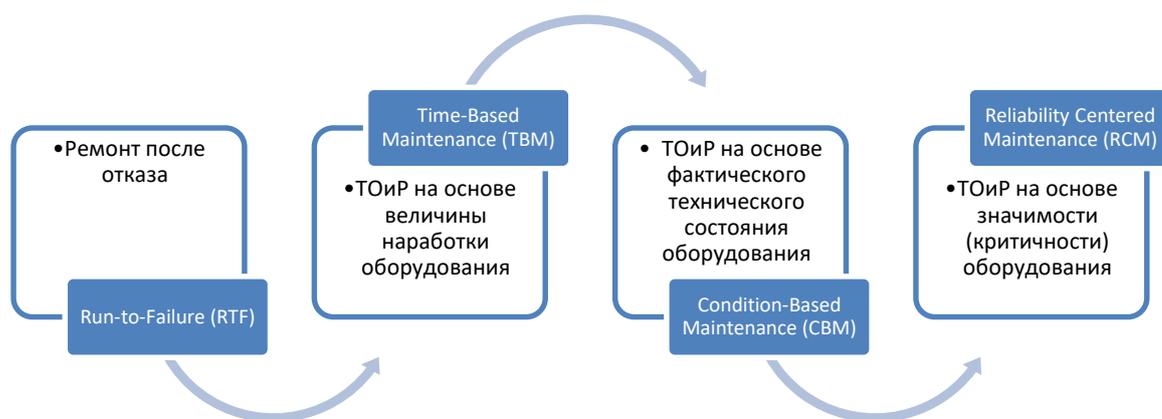


Рис. 2.1. Развитие принципов ТОиР

Стартовой точкой в эволюции ТОиР являлся подход Run-to-Failure (RTF) [76]. Важно подчеркнуть, что этот метод нельзя полностью отнести к ТОиР, так как здесь оборудование не подвергалось систематическому обслуживанию до момента его отказа, и ремонтные работы начинались только после выхода из строя. Ограничения в доступности запасных частей создавали сложности для практики RTF, что стимулировало появление концепции предупредительного обслуживания и планового предупредительного ремонта (ППР). Сущность такого подхода заключалась в осуществлении ТОиР до возникновения поломки или дефекта, целью чего было минимизация рисков дефектов. Эта концепция предупредительного обслуживания заложила фундамент для дальнейшего развития ТОиР [77].

Определение регламента ТОиР требует выявления момента появления дефекта или отказа, который раньше воспринимался как событие с возрастающей вероятностью по мере износа и старения оборудования. Таким образом, время

проведения ТОиР коррелировало с достижением определенного уровня наработки, который определялся исходя из календарного периода и/или режима использования оборудования, установленных в конструкторско-технологической и нормативной документации. Исследования, посвященные предупредительному ТОиР на основе критерия наработки, обсуждаются в работах [77, 78]. В этом контексте, после каждого ТОиР, наработка обнуляется и вновь достигает порога, требующего следующего обслуживания, придавая ТОиР циклический характер в отличие от эпизодических ремонтов в рамках RTF. Это привело к появлению концепций «ремонтного цикла» и «межремонтного периода», реализованных через систематическое обслуживание и ремонт, известное как Time-Based Maintenance (TBM) [75].

Концепция RTF направлена на устранение уже произошедших неисправностей, тогда как ППР нацелена на предотвращение будущих отказов. Однако, ППР требуют значительных ресурсов (материальных, трудовых, запасных частей и др.) для осуществления ТОиР, что стимулировало разработку планов ТОиР и систем планирования [75]. Повышение частоты и объема ППР привело к увеличению затрат на ТОиР. В конце 60-х – начале 70-х годов XX века, вопрос увеличения надежности через TBM стал предметом дискуссий, после чего последовали масштабные исследования механизмов отказов, результаты которых [76] представлены на рис. 2.2.

Из данных на рисунке 2.2 следует, что только 8% – 23% отказов соответствуют модели, используемой в TBM, согласно которой вероятность отказа увеличивается с наработкой оборудования. Эти отказы характерны для сравнительно простых технических и технологических объектов. В случае более сложных объектов, на которые приходится 77% – 92% всех отказов, было обнаружено, что между вероятностью отказа и продолжительностью эксплуатации существует слабая или совсем отсутствует взаимосвязь. Для этих объектов вероятность отказа за пределами периода приработки рассматривается как постоянная.

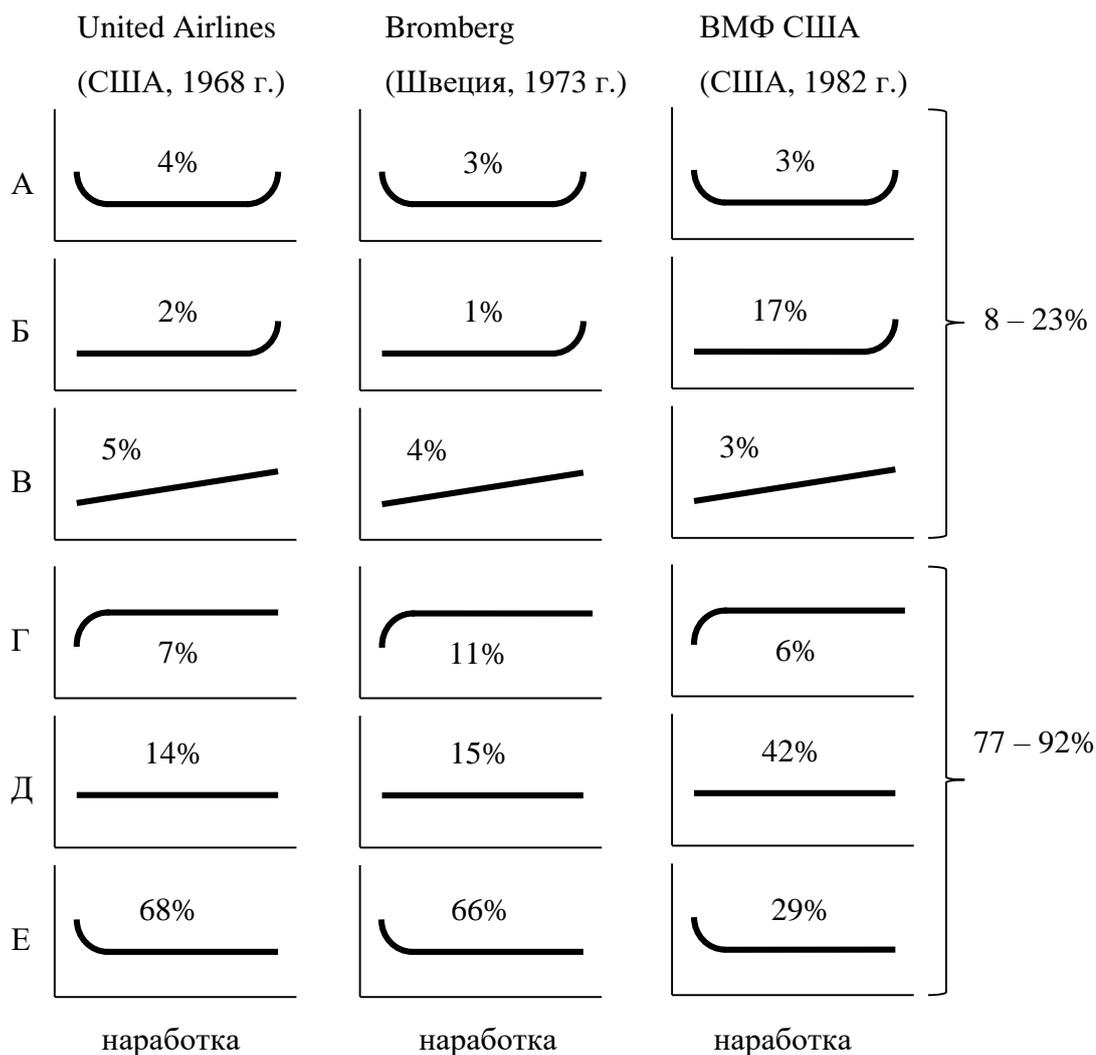


Рис. 2.2. Результаты исследования зависимости интенсивности отказов от наработки технических и технологических объектов

Оказалось, нецелесообразным назначать время предупредительного ТОиР на основе наработки для 77% – 92% случаев отказов, так как наработка не предоставляет информацию, способствующую предсказанию возникновения отказа. В этих условиях, определение момента для ТОиР должно базироваться не на наработке, а на текущем техническом состоянии оборудования, что привело к развитию подхода предупредительного обслуживания, основанного на состоянии – Condition-Based Maintenance (CBM) [75].

Реализация принципов CBM требует наличия диагностических систем, способных отслеживать показатели качества состояний технических и технологических объектов, что ведет к увеличению стоимости объектов или

необходимости дополнительных затрат на обеспечение возможности контроля, ограничивая таким образом способность промышленных предприятий к внедрению СВМ, что и определило возникновение нового подхода к ТОиР – обслуживание, ориентированное на надёжность – Reliability Centered Maintenance (RCM) [75].

RCM подчеркивает, что разные узлы и агрегаты в составе технических и технологических объектов имеют различную значимость для производственного процесса и потенциальный ущерб от их отказов. Следовательно, распределение ресурсов для предотвращения всех возможных отказов является неэффективным; следует сосредоточиться на предупреждении лишь тех отказов, последствия которых могут быть наиболее серьезными. RCM акцентирует внимание не на самих отказах, а на их потенциальных последствиях.

Процесс выбора подхода к ТОиР для технических и технологических объектов на промышленных предприятиях может быть представлен алгоритмом (рис. 2.3), демонстрирующим стратегию RCM [74].

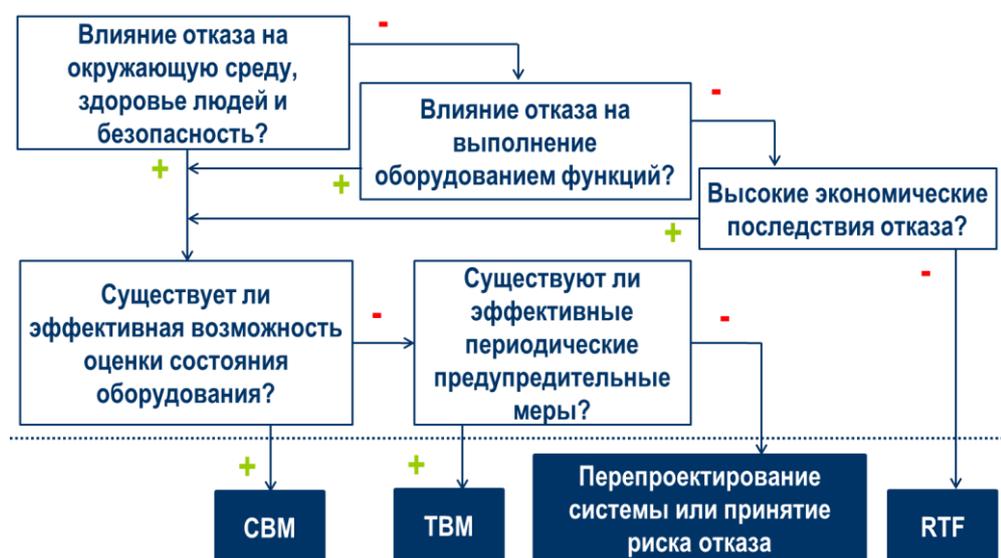


Рис. 2.3. Обобщенный алгоритм RCM

Из анализа процесса развития принципов ТОиР технических и технологических объектов промышленных предприятий становится очевидным

необходимость создания системы управления качеством состояний объектов, с учётом их свойств и условий эксплуатации.

Исходя из опыта передовых промышленных компаний [77], можно сделать несколько ключевых выводов:

- стратегия планового ТОиР фактически отходит на второй план;
- широкое применение находит подход к ТОиР, основанный на текущем ТС объектов;
- отмечена тенденция к переходу на ТОиР, основанное на прогнозируемом ТС, что представляет собой перспективное направление для промышленности.

Эффективность обслуживания и ремонта, ориентированного на реальное ТС, напрямую зависит от точности диагностики этого состояния, а именно от точного обнаружения процессов износа и старения, происходящие в ходе эксплуатации оборудования.

Основы ТОиР представляют собой комплекс организационных, программных, технических, информационных и управляющих ресурсов, а также действий, направленных на эффективное планирование и управление процессами обслуживания и ремонта. ТОиР интегрируется в общую систему управления производством, включая такие системы, как MRP (Планирование материальных потребностей) и MRP II (Планирование ресурсов производства), и направлено на решение задач, связанных с организацией и учетом ТОиР [78].

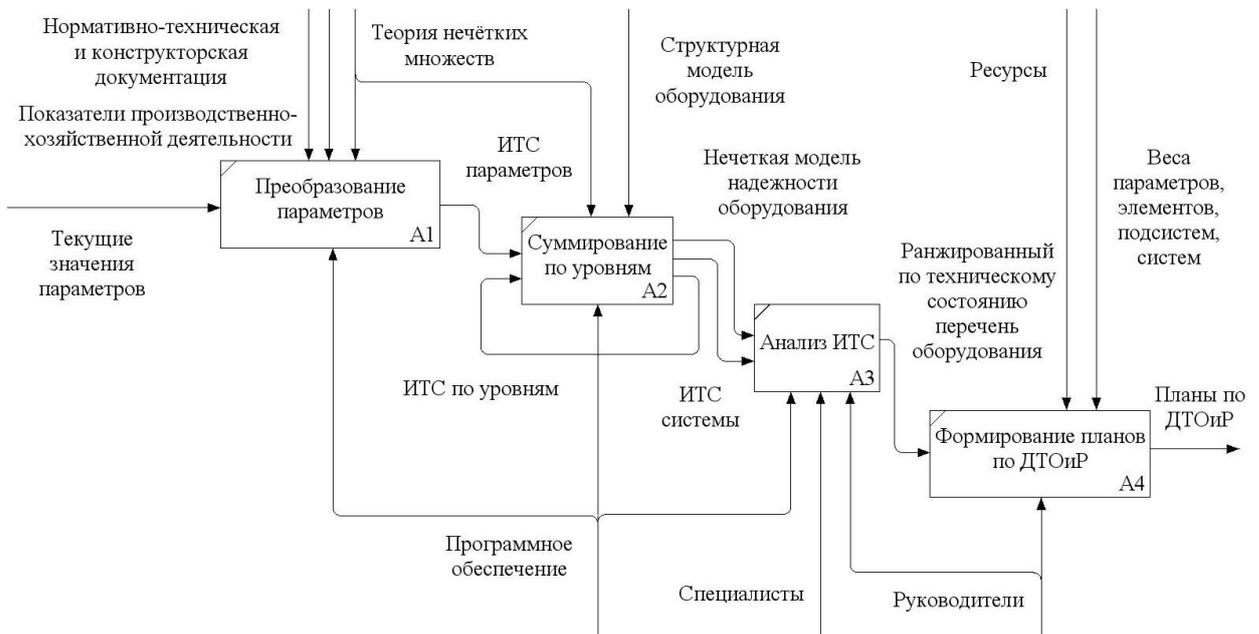
В настоящее время многие российские промышленные предприятия находятся в процессе выбора стратегии имплементации системы ТОиР. Для детального анализа управления техническим состоянием оборудования на промышленных предприятиях предлагается разработать функциональную модель управления, опираясь на методологию функционального моделирования IDEF0 [79].

Главная задача управления ТС оборудования на производственных площадках заключается в его сохранении в работоспособном состоянии через качественное управление состояниями технических и технологических объектов.

В качестве основных инструментов управления используются нормативно-техническая и конструкторская документация, сведения о ресурсах предприятия и целевые показатели его деятельности, и тогда контекстная диаграмма процесса представлена на рис. 2.4а.



а – Контекстная диаграмма



б – Диаграмма декомпозиции

Рис. 2.4. Функциональная модель управления ТС технических и технологических объектов

Первым этапом процесса управления состояниями технического объекта является предварительный анализ, в результате которого формируются

разнородные и разнотипные данные о его текущем ТС, имеющие нечёткий (размытый) характер. Далее проводится систематизация всей разнородной информации. Результатом являются сформированные планы по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР), регламентирующих осуществление управляющих воздействий в виде реализации принципов ТОиР. Ограничивающим фактором данного процесса являются все виды необходимых ресурсов (рис. 2.4б) [78].

В контексте развития Индустрии 4.0 и возрастающей сложности промышленного оборудования и технологических процессов, актуализируется тренд на глубокую интеграцию методик управления ТОиР на основе детализированных количественных данных. Такой подход, учитывающий комплексные показатели, становится не только важным, но и обещающим направлением в управлении состоянием технических и технологических объектов, при этом возникает проблема оперативной обработки значительного объёма данных о состоянии объектов, при организации эффективного управления ТОиР оборудованием промышленного предприятия.

2.1.2 Индекс технического состояния технических и технологических объектов

Процедура, при которой анализируется соответствие характеристик, описывающих ТС технических и технологических объектов, заданным критериям, известна как *оценка технического состояния объекта*. Этот анализ может включать в себя как качественную, так и количественную оценку. При этом, практическая ценность количественного подхода обладает множеством преимуществ, что продемонстрировано на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Сравнительный анализ качественной и количественной оценки информации

Ключевым преимуществом здесь является способность к математическому моделированию ТС объекта, что значительно усиливает процесс упорядочивания и сбора информации. В этом контексте особенно привлекательны методики, позволяющие применять математическую формализацию к качественным атрибутам, описывающим техническое или технологическое состояние объекта.

Каждый технический или технологический объект обладает определенным набором параметров как множество X , значения которого характеризуют состояние объекта:

$$X = \{x_i, \quad i = \overline{1, n}\}, \quad (2.1)$$

где n – число параметров.

Множество параметров X содержит некоторое подмножество параметров, описывающих возможность выполнения объектом заданных функций. Параметр x_i может принимать свои значения во множестве всех возможных значений E_i ,

которое содержит подмножество значений A_i , определяемых на основе нормативно-технической документации:

$$A_i \subset E_i, \quad (2.2)$$

Обозначим ТС объекта как множество I , тогда можно записать:

$$I = \begin{cases} \text{исправное,} & \text{если } \forall x_i: x_i \in A_i, \\ \text{неисправное,} & \text{если } \exists x_i: x_i \notin A_i. \end{cases} \quad (2.3)$$

Согласно [7], различают следующие категории ТС: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное. Данные категории продемонстрированы на одной оси (рис. 2.6). На рисунке 2.6 показано, что границы между ТС являются нечеткими, особенно между работоспособным, неработоспособным и предельным ТС. Эта обстоятельство усложняет задачу точной диагностики ТС объекта из-за применения описательных характеристик [80].

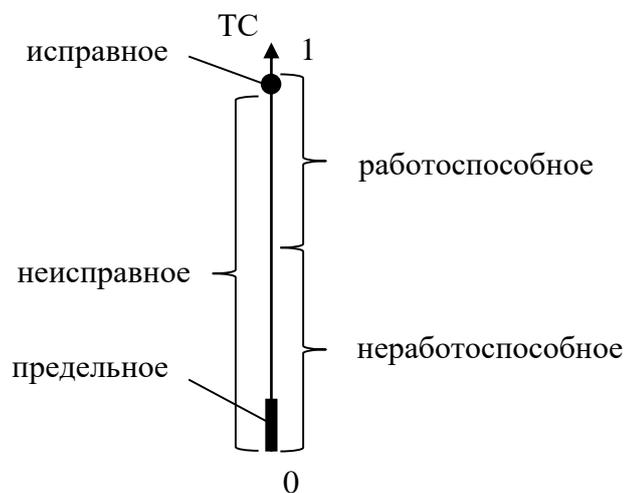


Рис. 2.6. Иллюстрация представления ТС

Предположим, что ТС описывается переменной I в диапазоне от 0 до 1, где полностью исправное состояние соответствует значению 1, а значение, равное или меньше 0, указывает на неисправное состояние. Такое представление ТС позволяет не только фиксировать исправность или неисправность объекта, но и

оценивать "степень исправности", предоставляя возможность для сравнения объектов на основе их ТС.

Так как ТС представляет собой комплексную характеристику, объединяющую информацию по всем i ($i = \overline{1, n}$) параметрам объекта, возникает задача детализации данных по каждому из параметров i .

Индекс технического состояния (ИТС) [81], являющийся безразмерной числовой величиной, формируется через реализацию алгоритма и отражает уровень соответствия параметров объекта установленным критериям, при этом каждый параметр, определяется характеристикой в соответствии с нормативно-технической документацией для данного технического или технологического объекта. Перевод качественных и количественных характеристик параметров в числовые значения позволяет определить меру соответствия каждого параметра его нормативному значению.

Согласно алгоритму оценки, требуется измерение текущих значений параметров и их сопоставление с нормативными. В контексте оценки ТС, этот процесс адаптируется к параметрам объекта, где для рассматриваемых технических объектов стандартом являются значения, указанные разработчиком. В реальной эксплуатации могут применяться альтернативные нормативы, адаптированные под конкретные условия использования объекта в производственной системе. Однако без определения этих нормативных значений любой анализ ТС становится невыполнимым. Таким образом, комплексная оценка ТС объекта достигается через анализ множества ИТС:

$$C = \{I_1; I_2; I_3; \dots; I_n\}, \quad (2.4)$$

где C – ТС объекта,

I_n – ИТС объекта по параметру n ,

n – количество параметров.

Тогда ИТС I_i отражает степень соответствия i -го параметра требуемому значению. Уровень соответствия параметров объекта заданным требованиям определяется в процентных значениях, следовательно, спектр ИТС охватывает

отрезок от 0 (минимальное состояние) до 1 (максимальное состояние), при этом результаты округляются до двух десятичных знаков. В результате, ТС любого объекта может быть представлено ограниченным набором значений ИТС.

Комплексный, единый показатель ИТС позволяет синтезировать данные о техническом состоянии объекта и представить их в общей форме.

Таким образом, ИТС I_i отражает степень соответствия i -го параметра требуемому (номинальному) значению. В связи с тем, что граница между требуемыми и неисправными значениями параметра зачастую могут быть нечетко определены, предложенная концепция на основе использования ИТС была формализована с использованием принципов теории нечетких множеств [83-85]. Тогда, в соответствии с определением [84], нечёткое подмножество требуемых (допустимых) значений \tilde{A} множества E всех возможных значений параметра объекта определяется как множество упорядоченных пар:

$$\{(x, \mu_{\tilde{A}}(x))\}, \forall x \in E, \quad (2.5)$$

где $\mu_{\tilde{A}}(x)$ – характеристическая функция принадлежности, которая указывает степень или уровень принадлежности текущего значения параметра x требуемому (допустимому) значению (подмножеству \tilde{A}) и принимающая свои значения во множестве $M = [0; 1]$ возможных значений характеристической функции принадлежности, т.е. ИТС – это текущее значение характеристической функции принадлежности.

Для оценки ТС технических и технологических объектов сложной структуры, составленной из множества элементов, требуется индивидуально оценить техническое состояние каждого элемента на основе установленных параметров, таким образом следует выполнить расчет интегральных индексов технического состояния для структур системы более высокого уровня в иерархии (рис. 2.7).

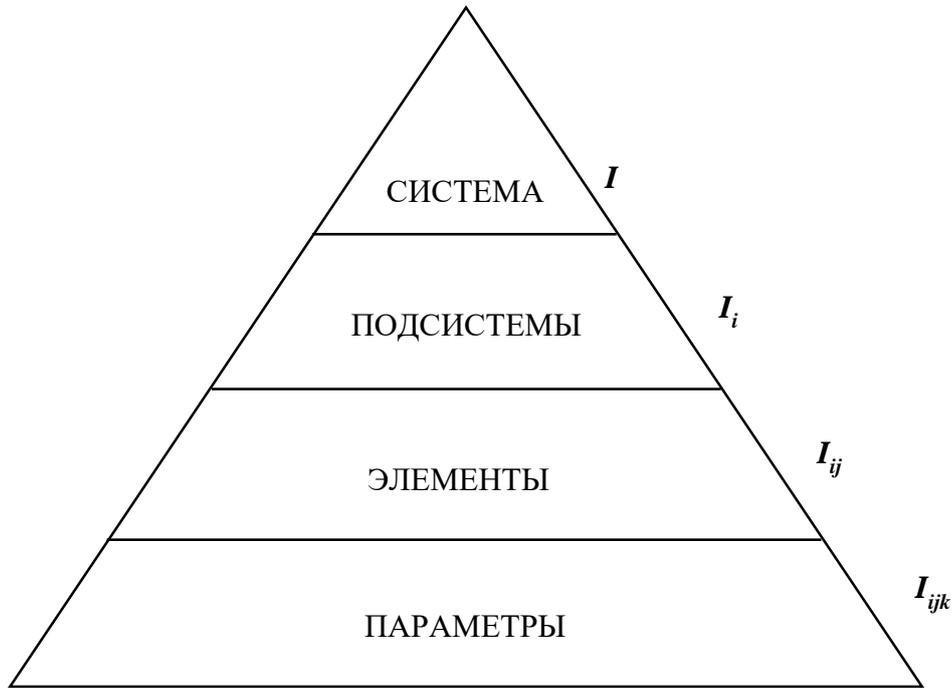


Рис. 2.7. Структурно-параметрическое представление технических и технологических объектов сложной структуры

Для вычисления ИТС технических и технологических объектов сложной структуры, применим линейное расстояние Хемминга:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N I_i}{N}, I_i = \frac{\sum_{j=1}^{M_i} I_{ij}}{M_i}, I_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{L_{ij}} I_{ijk}}{L_{ij}}, \quad (2.6)$$

где I – ИТС системы;

N – число подсистем в системе;

I_i – ИТС i -ой подсистемы;

M_i – число элементов i -ой подсистемы;

I_{ij} – ИТС j -го элемента i -ой подсистемы;

L_{ij} – число параметров j -го элемента i -ой подсистемы;

I_{ijk} – ИТС по k -му параметру j -го элемента i -ой подсистемы.

Эффективность предложенного метода [88] опирается на предположение об одинаковой значимости каждого параметра и определяется выбором и количеством этих параметров для оценки технического состояния, который зависит от оценивающей стороны (изготовителя, инженера эксплуатационной службы и т.д.),

при этом параметры, не влияющие на оценку ТС, может быть исключен из рассмотрения.

Важно отметить, что показатель среднего арифметического чувствителен к "выбросам" – экстремально высоким или низким значениям, что может исказить результаты анализа. Однако, учитывая, что диапазон возможных значений не превышает 100 единиц и каждое значение множества ограничено интервалом от 0 до 1, влияние "выбросов" снижается.

Чтобы определить оценку ТС объекта сложной структуры, состоящего из множества элементов, требуется проанализировать ТС каждого отдельного элемента системы согласно назначенным параметрам для каждого элемента, после чего вычислить интегральные ИТС структур, расположенных выше по иерархии в системе.

Следовательно, применение нечеткой модели для описания состояний технических и технологических объектов адаптировано к сложным многоуровневым техническим и технологическим объектам. Важно подчеркнуть, что нечеткое представление состояний объектов оптимизировано с целью минимизации аддитивных свойств, система анализируется как множество элементов, не имеющих связей друг с другом, и в результате анализа и формируется модель множества элементов, а не целостной системы.

2.1.3 Нечёткая модель представления состояний технических и технологических объектов

Понятие ТС объекта формализуем в терминах теории нечетких множеств.

Допустим, что ТС объекта характеризуется одним параметром x , тогда:

$$x \in E, \quad (2.7)$$

где E – множество значений данного параметра.

Если, например, параметр x может принимать любые неотрицательные значения, тогда:

$$E = R^+, \quad (2.8)$$

где \mathbf{R}^+ – множество неотрицательных действительных чисел и, соответственно:

$$x \in \mathbf{R}^+, \quad (2.9)$$

Если \mathbf{E} – множество всех возможных значений параметра, то оно непременно содержит некоторое подмножество требуемых (допустимых) значений параметра, обозначим это подмножество как \mathbf{A} , тогда:

$$\mathbf{A} \subset \mathbf{E}, \quad (2.10)$$

Если элемент x множества \mathbf{E} есть элемент подмножества \mathbf{A} (принадлежит \mathbf{A}), другими словами, значение параметра x находится в требуемом (допустимом) диапазоне значений, то:

$$x \in \mathbf{A}, \quad (2.11)$$

Для выражения этой принадлежности в теории множеств используют понятие – характеристическая функция $\mu_A(x)$, значение которой указывают, является (да или нет) x элементом \mathbf{A} (рис. 2.8):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in \mathbf{A}, \\ 0, & \text{если } x \notin \mathbf{A}. \end{cases} \quad (2.12)$$

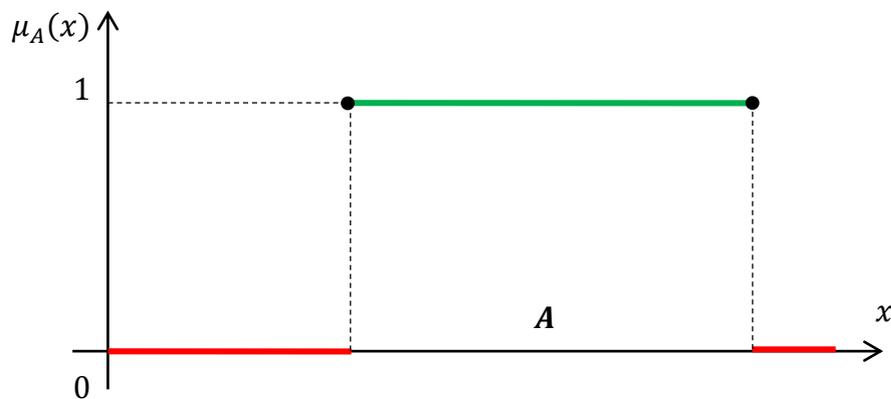


Рис. 2.8. Характеристическая функция для множества \mathbf{A}

В большинстве практических случаев установление точных границ между допустимыми и недопустимыми значениями параметров недостижимо, что определяет применение "теории нечетких множеств" для анализа оценки ТС объекта. В соответствии с этим элемент x_i множества \mathbf{E} может принадлежать \mathbf{A} в определённой степени μ_A . Тогда, в соответствии с определением нечёткого множества [84], нечёткое подмножество требуемых (допустимых) значений

\tilde{A} множества всех возможных значений параметра объекта E определяется как множество упорядоченных пар

$$\{(x, \mu_{\tilde{A}}(x))\}, \forall x \in E, \quad (2.13)$$

где $\mu_{\tilde{A}}(x)$ – характеристическая функция принадлежности, принимающая свои значения во множестве M , которая указывает степень или уровень принадлежности текущего значения параметра x (элемента x) требуемому (допустимому) значению (подмножеству \tilde{A}). Множество M называется множеством принадлежностей. Если $M = \{0; 1\}$, то нечёткое подмножество \tilde{A} будет рассматриваться как обычное.

С учётом того, что объект анализируется по множеству различных параметров, следует подчеркнуть уникальность каждого из них, это означает, что для каждого параметра существует свой спектр возможных значений, определённое подмножество предпочтительных значений, а также его собственная размерность.

Модель описания технического состояния [86] объекта A будет выглядеть следующим образом:

$$\tilde{A} = \begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ \hline \mu_{\tilde{A}_1}(x_1) & \mu_{\tilde{A}_2}(x_2) & \dots & \mu_{\tilde{A}_n}(x_n) \end{array}$$

где x_i – параметры оценки технического состояния объекта A ,

n – число параметров,

$\mu_{\tilde{A}_i}(x_i)$ – функции принадлежности (для каждого параметра своё подмножество требуемых значений \tilde{A}_i , и соответственно, своя функция принадлежности).

Данная структура формирует **нечеткую модель представления состояний технического и технологического объекта.**

Если в предложенной модели будут поставлены в соответствие все текущие значения параметров, то множество \tilde{A} будет характеризовать текущее ТС объекта:

$$\begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ \hline \end{array}$$

$$\tilde{A}^{\text{тек.}} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \mu_{\tilde{A}_1}(x_{1 \text{ тек.}}) & \mu_{\tilde{A}_2}(x_{2 \text{ тек.}}) & \dots & \mu_{\tilde{A}_n}(x_{n \text{ тек.}}) \\ \hline \end{array}$$

где $x_{i \text{ тек.}}$ – текущие значения параметров объекта A .

Формирование функции принадлежности параметра основывается на данных, полученных из нормативно-технической и конструкторско-технологической документации, относящейся к объекту.

В случае исправного (идеального) ТС объекта по всем параметрам его состояние можно описать как:

$$\tilde{A} = \begin{array}{cccc} & x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ \hline & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \hline \end{array} = \bar{A}^{\text{ном.}}, \quad (2.14)$$

Таким образом исправное состояние объекта можно описать в виде чёткого множества $\bar{A}^{\text{ном.}}$, элементами которого являются n единиц.

Для определения обобщённого ТС объекта применяем две оценки – относительное линейное расстояние (расстояние Хемминга) и относительное квадратичное расстояние (Евклидово расстояние) между двумя множествами $\tilde{A}^{\text{тек.}}$ и $\bar{A}^{\text{ном.}}$, и как известно, данные понятия дают две оценки расстояния между нечёткими множествами.

Относительное линейное расстояние между вышеуказанными множествами определяется по формуле:

$$\delta(\tilde{A}^{\text{тек.}}, \bar{A}^{\text{ном.}}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mu_{\bar{A}^{\text{ном.}}}(x_i) - \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}(x_i)| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}(x_i)),$$

Формулу можно преобразовать:

$$\delta(\tilde{A}^{\text{тек.}}, \bar{A}^{\text{ном.}}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}(x_i)) = \frac{1}{n} (n - \sum_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}(x_i)) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}(x_i)}{n}, \quad (2.15)$$

Очевидно, что $\frac{\sum_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}(x_i)}{n}$ – среднее арифметическое всех значений $\mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}(x_i)$,

тогда:

$$\delta(\tilde{A}^{\text{тек.}}, \bar{A}^{\text{ном.}}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}(x_i)}{n} = 1 - \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}^{\text{ср.арифм.}}(x_i), \quad (2.15)$$

Относительное квадратичное расстояние между вышеуказанными множествами определяется по формуле:

$$\varepsilon(\tilde{A}^{\text{тек.}}, \bar{A}^{\text{ном.}}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_{\bar{A}^{\text{ном.}}}(\mathbf{x}_i) - \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}(\mathbf{x}_i))^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}(\mathbf{x}_i))^2},$$

Оба относительных расстояния удовлетворяют условиям:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \delta(\tilde{A}^{\text{тек.}}, \bar{A}^{\text{ном.}}) \leq 1, \\ 0 &\leq \varepsilon(\tilde{A}^{\text{тек.}}, \bar{A}^{\text{ном.}}) \leq 1. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Таким образом, с помощью относительных расстояний $\delta(\tilde{A}^{\text{тек.}}, \bar{A}^{\text{ном.}})$ и $\varepsilon(\tilde{A}^{\text{тек.}}, \bar{A}^{\text{ном.}})$ помимо возможности оценки общего состояния объекта, представляется возможность и сравнения объектов друг с другом. Несомненно, что меньшие значения расстояний (линейного и квадратичного до номинального идеального состояния) указывают на лучшее ТС объекта, что позволяет сделать справедливый вывод:

$$I_A = 1 - \delta(\tilde{A}^{\text{тек.}}, \bar{A}^{\text{ном.}}) = \mu_{\tilde{A}^{\text{тек.}}}^{\text{ср.арифм.}}(\mathbf{x}_i), \quad (2.17)$$

Рассмотрим пример. Пусть

$$\tilde{A}_1^{\text{тек.}} = \begin{array}{c} x_1 \quad x_2 \quad x_3 \\ \boxed{\begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ \hline \end{array}} \end{array}, \quad (2.18)$$

и

$$\tilde{A}_2^{\text{тек.}} = \begin{array}{c} x_1 \quad x_2 \quad x_3 \\ \boxed{\begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,1 & 0,5 & 0,9 \\ \hline \end{array}} \end{array}. \quad (2.19)$$

Тогда:

$$\delta(\tilde{A}_1^{\text{тек.}}, \bar{A}_1^{\text{ном.}}) = \frac{0,5+0,5+0,5}{3} = 0,5, \quad (2.20)$$

$$\delta(\tilde{A}_2^{\text{тек.}}, \bar{A}_2^{\text{ном.}}) = \frac{0,1+0,5+0,9}{3} = 0,5. \quad (2.21)$$

Из оценки по линейным расстояниям не выявляются различия в ТС объектов. Тем не менее, при анализе технического состояния второго объекта с позиции теории надежности, становится очевидно, что его состояние менее предпочтительно. Это обусловлено тем, что ИТС по параметру x_1 , равный 0,1,

указывает на наиболее уязвимое место объекта, следовательно, вероятность отказа здесь максимальна. Произведем расчет квадратичных расстояний:

$$\varepsilon(\tilde{A}_1^{\text{тек.}}, \bar{A}_1^{\text{ном.}}) = \sqrt{\frac{(1-0,5)^2 + (1-0,5)^2 + (1-0,5)^2}{3}} = 0,5, \quad (2.22)$$

$$\varepsilon(\tilde{A}_2^{\text{тек.}}, \bar{A}_2^{\text{ном.}}) = \sqrt{\frac{(1-0,1)^2 + (1-0,5)^2 + (1-0,9)^2}{3}} \approx 0,6. \quad (2.23)$$

Этот пример эффективно иллюстрирует применение квадратичного расстояния как дополнительного инструмента для оценки ТС технических или технологических объектов. Тем не менее, линейное расстояние находит более широкое применение, поскольку оно дает возможность ускорить процесс вычислений при управлении ТС сложных современных технических и технологических систем [91].

В качестве перспективы можно рассмотреть исследование идентификации параметров ИТС технического или технологического объекта.

2.2 Оценка экобезопасности состояний технических и технологических объектов

Учитывая тенденцию к ускорению технологического развития и увеличению использования наукоемкого оборудования, что определяет уменьшение циклов обновления технических и технологических решений, становится актуальным пересмотр подходов к экобезопасности. Переориентация с реагирования на уже случившиеся экологические последствия к их предотвращению становится ключевым направлением. В этом контексте разработка новых методик управления экобезопасностью состояний технических и технологических объектов выходит на передний план. Основной характеристикой предлагаемой методики является интеграция количественной оценки и оптимизации потенциала утилизации на этапе проектирования, предполагая заложение основ переработки объектов на стадии их создания.

Ключевым элементом анализа экобезопасности являются характеристики состава, структуры и влияния на окружающую среду данных объектов.

В качестве количественного определения утилизационной способности предлагается подход, основанный на анализе ряда ключевых показателей утилизации, которые разрабатываются на основе глубокой декомпозиции и всестороннего рассмотрения утилизационного объекта, процессов его утилизации и захоронения, а также продуктов утилизации и оценки углеродного следа [92], [47] (см. рис. 2.9).

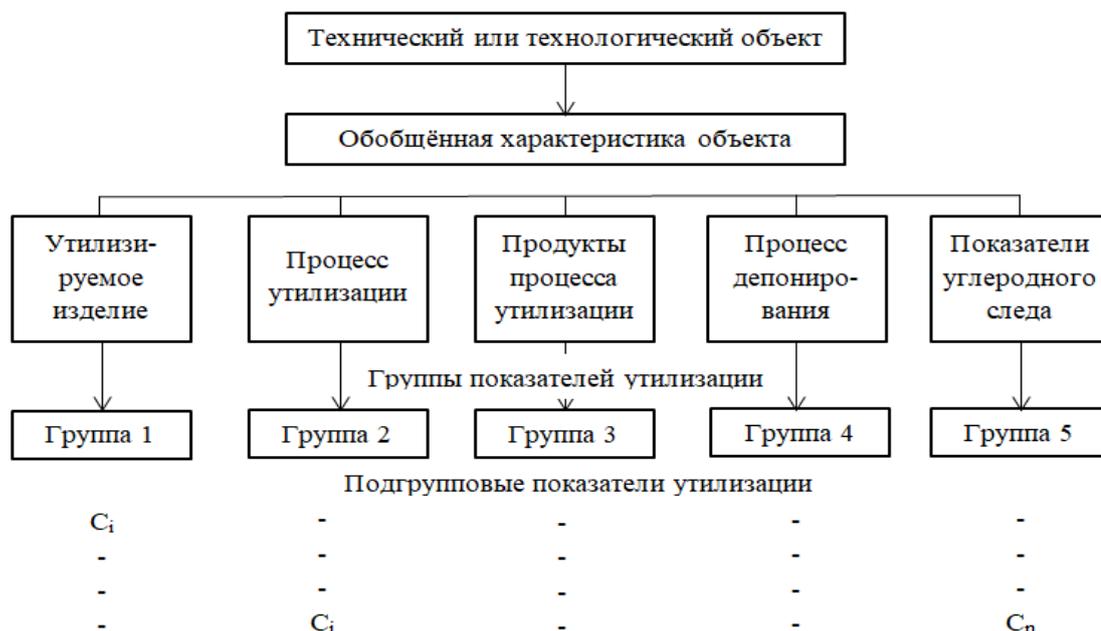


Рис. 2.9. Показатели оценки экобезопасности состояний технических и технологических объектов

В соответствии с рис. 2.9 множество показателей обобщенной характеристики экобезопасности состояний объекта предлагается разделить на пять групп.

В группу индикаторов, отражающих конструктивные аспекты объекта подлежащего утилизации, включаются такие параметры, как степень разборки, уровень возможности переработки, степень использования материалов, пригодных к рециклингу, показатель углеродного следа.

Степень разборности технического или технологического объекта определяется коэффициентом разборности:

$$K_{\text{разб}} = N_c / N_{\text{общ}}, \quad (2.24)$$

где N_c - количество элементов изделия, состоящих из нескольких видов материалов;

$N_{\text{общ}}$ - общее количество составных компонентов технического объекта.

Степень применимости рециклируемых материалов в составе объекта определяется соответствующим коэффициентом [49]:

$$K_{\text{пр}} = n / P, \quad (2.25)$$

где n - количество видов рециклируемых материалов;

P - общее количество видов материалов в составе объекта.

Степень рециклинга элементов объекта определяется отношением массы его элементов, которые могут быть переработаны и использованы повторно, к общей массе изделия:

$$K_{\text{рец}} = M_{\text{ут}} / M_{\text{общ}}, \quad (2.26)$$

где $M_{\text{ут}}$ - масса извлекаемых из конструкции объекта элементов, материал которых способен к рециклингу;

$M_{\text{общ}}$ - общая масса технического объекта.

Среди критериев, анализирующих утилизацию объекта с точки зрения экобезопасности, можно выделить, например, степень потенциальной угрозы его составляющих для окружающей среды. Влияние объекта на окружающую среду можно оценить через класс опасности как самого объекта, так и его отдельных частей, используя классификацию токсичных промышленных отходов и методы их утилизации [90]. Объект, не включающий токсичные элементы, считается безопасным для окружающей среды.

Также показателем, который следует принять во внимание, является углеродный след технического или технологического объекта в процессе его утилизации, который охватывает общее количество выбросов парниковых газов (ПГ) [15], генерируемых в ходе утилизационных мероприятий:

$$K_{\text{угс}} = C_{\text{пр}} + C_{\text{пов}} + \Pi * C_{\text{кр}} \quad (2.27)$$

$C_{пр}$ - выбросы ПГ, привязанные к извлечению или производству сырьевого материала, необходимого для производства продукции, из природных ресурсов, как если бы они все были первичным материалом [101];

$C_{пов}$ - выбросы ПГ, определяемые в результате операций по утилизации в конце жизненного цикла объекта и дальнейшей обработки повторно используемых вторичных материалов;

Π - доля повторно использованного материала;

$C_{кр}$ - кредит повторного использования материалов.

Ко второй категории относятся критерии, связанные с экономическими аспектами утилизации [49].

Оценка стоимости процесса утилизации на единицу изделия ($C_{ут}$) определяется как суммарные затраты на процессы его разборки, транспортировки, сортировки, переработки, реализации и другие этапы. В расчет стоимости каждого из подэтапов входят расходы на дополнительные материалы, трудозатраты и энергоресурсы.

$$C_{ут} = \sum_{k=0}^n C_k, \quad (2.28)$$

где C_k - стоимость k -го вида работ в расчёте на одно изделие;

k - количество видов работ.

Тогда величина самого стоимостного коэффициента утилизации ($K_{ут}$) определяется отношением:

$$K_{ут} = (C_p - C_{ут}) / C_p, \quad (2.29)$$

где C_p - среднерыночная стоимость утилизируемых элементов технического или технологического объекта.

В случае, когда затраты на утилизацию ($C_{ут}$) оказываются меньше средней рыночной стоимости утилизируемых элементов изделия (C_p), переработка и повторное использование этих элементов становится экономически неоправданной. Параметры, относящиеся к исходам процесса утилизации, такие как степень использования материалов и уровень опасности конечных продуктов утилизации, составляют третью группу показателей.

Критерии, связанные с депонированием или организованным хранением отходов, фактически повторяют те, что используются для оценки утилизации. Пятая группа включает показатели, описывающие углеродный след, или совокупное количество выбросов, произведенных в ходе утилизации, согласно ГОСТ Р 562762014 - "Углеродный след продукции" [16].

Эти критерии позволяют проводить оценку экобезопасности состояний технических и технологических объектов, учитывая множество важных факторов: их природу, направленность и возможные последствия. В зависимости от особенностей объекта, важность этих параметров может различаться, делая прямое сравнение промышленных объектов по отдельным критериям затруднительным [93].

На практике предпочтительнее использовать единый комплексный индекс, который бы обобщал все аспекты экобезопасности состояний объекта и облегчал бы выбор наиболее приемлемого с точки зрения экобезопасности варианта проектирования. В этом контексте предлагается индекс экобезопасности, способствующий интегральной оценке экобезопасности объектов.

Для определения общего индекса экобезопасности рекомендуется суммировать заранее определенные частные показатели (C_i), используя экспертные оценки их значимости. Таким образом, каждый из N показателей экобезопасности получит свою оценку Y_i , где i – порядковый номер показателя (рис. 2.9).

На основе *методов математической статистики* полученные результаты экспертных оценок обрабатываются и становятся базой для расчёта весовых коэффициентов частных показателей экобезопасности F_i :

$$F_i = \frac{\sum_j Y_{ij}}{\sum_i \sum_j Y_{ij}} \quad (2.30)$$

При этом должно выполняться условие $\sum_{i=1}^m F_i = 1, F_i > 0$

Далее, значение обобщенного индекса экобезопасности вычисляется через суммирование вкладов отдельных показателей с учетом их специфического влияния на экобезопасность состояния данного технического или технологического объекта:

$$IEB(N) = \sum_{i=1}^m F_i B_i, \quad (2.31)$$

где $IEB(N)$ – комплексный показатель экобезопасности оцениваемого варианта объекта;

N – вариант оцениваемого объекта;

m – количество единичных показателей экобезопасности;

B_i – значение оцениваемого показателя экобезопасности;

F_i – значение коэффициента показателя экобезопасности.

В заключение, на основе рассчитанного обобщенного индекса экобезопасности делаются выводы о степени экобезопасности состояния анализируемого технического или технологического объекта. Этот процесс включает как детальный разбор объекта и его компонентов для формирования универсального индекса экобезопасности, так и применение методов статистики и современных принципов системного анализа [95, 96] для его количественного определения. Кроме этого, осуществляется экспертная оценка значимости отдельных показателей экобезопасности, что способствует более точной и объективной оценке.

В настоящее время существуют так называемые «калькуляторы экологического (углеродного) следа», работающие как в онлайн, так и в оффлайн-режимах. В основе данного инструмента, лежит теория вопросников. Объектом данного исследования является воздействие объекта на окружающую среду. В качестве объекта, может выступать отдельный человек, организация, мероприятие или изделие. В продолжение дальнейших исследований представляет интерес создание подобного программного сервиса для оценки степени экобезопасности состояний для технических и технологических объектов на основе предложенного индекса экобезопасности.

2.3 Модифицированная функциональная систематика для обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов

Классификационное пространство функциональной систематики (ФС) [97] охватывает все виды технических и технологических объектов, а также материалы, относящиеся ко всем областям знаний и отраслям промышленности; процессы, материалы и оборудование, необходимые для создания, испытания, изготовления и эксплуатации средств производства, а также для развития научных знаний; информационные объекты.

Информационно-поисковым языком ФС являются функциональные формулы объектов и процессов [97]. Формулы определяют способность материала, машины, изделия, процесса выполнять определенные служебные функции в заданных условиях взаимодействия с факторами внешней среды. Функциональные формулы характеризуют также и морфологию систематизируемых объектов. Функциональные формулы так же, как и химические формулы, одинаково воспринимаются на всех естественных языках, что обеспечивает интегративно-междисциплинарную сущность ФС.

Методика ФС в области технических и технологических систем охватывает семь основных аспектов: фундаментальные принципы, классификацию объектов и процессов в контексте материального производства, *экологическую классификацию*, организацию комплексов функциональных систем, методологии идентификации объектов, *прогностическое моделирование* и систему таксономических категорий, а также функциональную информатику. Осуществление определённых служебных функций через машины, механизмы и материалы непосредственно связано с использованием физических объектов, а также с действием полей, волн, излучений, микрочастиц и энергии. В связи с этим ФС включает в себя систематизацию всех элементов и процессов, имеющих

отношение к материальному производству, экологии и внепроизводственной сфере.

Основа методологии ФС заключается в принципах функциональных взаимодействий, подразумевающих рассмотрение действий в сферах производства, экологии, исследований и разработок как взаимодействие по крайней мере двух материальных объектов в определенной среде. Принцип применимости гласит, что каждый материальный объект создан для выполнения определенной функциональной роли в условиях взаимодействия с окружающей средой. Взаимосвязь между систематизированными объектами выражается через их функциональные связи, отраженные в функциональных формулах. При систематизации внимание уделяется взаимодействиям, направленным на достижение определенных функциональных целей, то есть функциональным воздействиям. Эти воздействия, происходящие в рамках элементарной функциональной системы, лежат в основе классификационной структуры процессов и материальных объектов, организованных в иерархические группы, известные как таксоны.

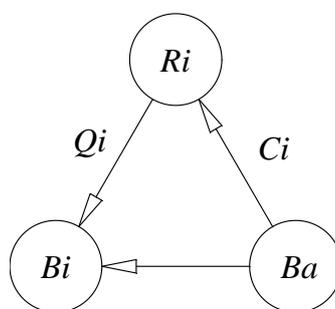


Рис. 2.10. Структура функциональных систем

В элементарной функциональной системе выделяют объекты, такие как объект-функционал Ri , объект Bi , на который воздействуют, и объект-фактор Ba внешней среды. Материальные объекты, обладающие способностью осуществлять целенаправленное воздействие на исходные объекты, именуются объектами-функционалами Ri . Эти объекты-функционалы классифицируются на вещественные объекты-функционалы Mi , объекты-функционалы в виде полей, волн, излучений и микрочастиц Ti , энергетические объекты-функционалы Ji и

процесс-функционалы Pi . Воздействие объекта-функционала Ri на объект, подвергающийся воздействию Vi (функциональная связь $Ri-Vi$), направлено на выполнение определенной служебной функции Fi , что выражается в логической формуле:

$$Ri \rightarrow Fi \rightarrow Vi,$$

где: Ri - объект-функционал;

Fi - служебная функция;

Vi - объект, подвергающийся воздействию

Функциональные отношения $Va-Ri$ и $Va-Vi$ (рис.2.10) указывают на взаимосовместимость объектов-функционалов с факторами внешней среды. Эта совместимость оценивается через критерий совместимости Ci , что способствует формированию структуры новой таксономической категории — норм совместимости с факторами внешней среды.

$$Ci (Va),$$

где Ci - критерии совместимости;

Va - материальные объекты-факторы внешней среды.

Во множестве материальных объектов отсутствует определенная жесткая прикрепленность к какой-то одной из трех позиций (рис. 2.10) [97].

Исходя из выполняемых функций, любой материальный объект может выступать в роли активного элемента, влияющего на процесс (объект-функционал), пассивного элемента, на который направлено действие, или же элемента из внешней среды, воздействующего на процесс. В рамках функциональной систематики, каждый рассматриваемый объект рассматривается как активный элемент, предназначенный для выполнения специфической функции в контексте взаимодействия с внешними факторами. Объекты, которые испытывают воздействие или участвуют во взаимодействии с активными элементами, условно называются исходными объектами, и тем самым образуют основу для определения структуры выполняемых функций.

Взаимодействия между активными элементами, исходными объектами, и факторами из внешней среды осуществляются посредством процессов-

функционалов P_i , которые являются механизмами реализации функций. Служебные функции F_i , исходные объекты V_i и критерии совместимости с факторами внешней среды C_i (V_a) лежат в основе классификации активных элементов и процессов в иерархически упорядоченные группы, или таксоны.

Таксономия, представляющая собой теорию систематизации, в контексте ФС выражается через структуру функциональных формул. Таксономическая модель (рис. 2.11) демонстрирует структуру таких формул для технических и технологических объектов.

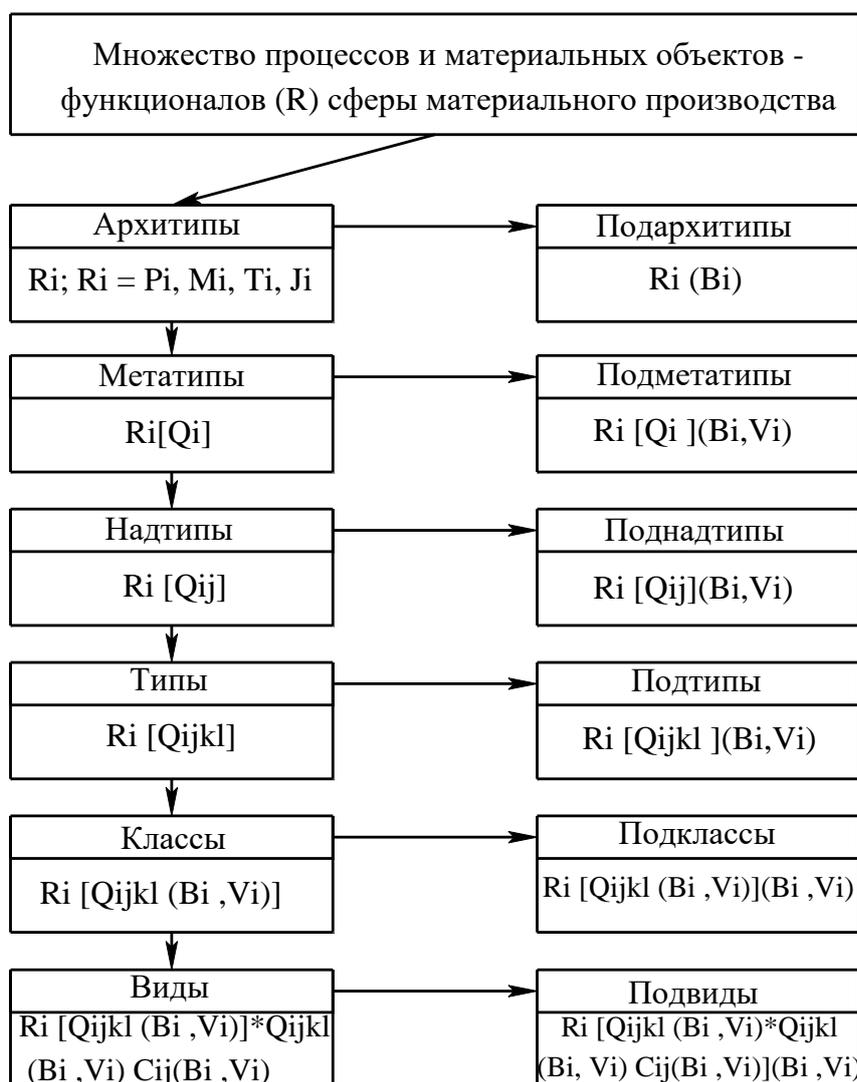


Рис. 2.11. Таксономическая модель технических и технологических объектов

На рис. 2.11 показаны:

R_i – объекты и процессы-функционалы;

Q_{ijkl} – служебные функции; (B_i, V_i) – мерон исходного объекта;

(B_i, V_i) в позиции перед правой квадратной скобкой – мероны факторов внешней среды;

(B_i, V_i) в позиции после правой квадратной скобки – мерон морфологического образа объекта-функционала;

C_{ij} – критерии совместимости с факторами внешней среды;

Функциональные формулы служат для идентификации принадлежности систематизированных объектов или процессов к конкретному таксону, выражая их способность выполнять заданные функции в контексте взаимодействия с внешними факторами.

Таксономическая модель, представленная на рисунке 2.11, образует фундамент функциональной систематики и находит применение в экологической классификации с учетом определенных адаптаций. Сущность и инновационность данной модели состоит в поэтапном расширении формулы за счет включения в нее оснований для классификации. В результате, формула таксона формируется путем объединения формулы классифицируемого элемента с формулой, указывающей на критерий его классификации. В качестве примера, формула классификации материала $M1 [Qijkl (Bijkl)]$ объединяет тип материала $M1 [Qnkl]$ с указанием на основание его классификации, выраженное через морфологию функциональных задач $Vijk$ [93].

Множество объектов и процессов-функционалов материального производства делится на четыре подмножества:

P – процессы-функционалы;

M – вещественные объекты-функционалы;

T – поля, волны, излучения, микрочастицы и элементарные частицы-функционалы;

J – энергия в качестве функционала.

Важно отметить различие между материалами и изделиями, используемыми в функциональной систематике. Материалы описываются как отдельные

химические соединения, элементы, их комбинации, сплавы, смеси и растворы, предназначенные для создания промежуточных продуктов, компонентов, сборочных единиц, машин, устройств, а также для производства других материалов. В контексте их применения в производственных процессах, материалы делятся на функциональные и конструкционные. Функциональные материалы наделены определенными служебными свойствами и образуют специфические микрокомплексы. Конструкционные материалы, в свою очередь, используются для создания несущих структур, корпусных элементов и других частей, не выполняющих специализированных функций.

Согласно представленной таксономической модели (рис. 2.11), множество функциональных процессов и объектов-функционалов делится на надтаксоны, таксоны и подтаксоны [97].

В предложенной *модификации* для отображения состояния объекта в рамках ФС используется расширенная таксономическая модель. Этот подход позволяет включать множественные параметры состояния объектов, расширяя исходную таксономическую модель вправо. Таким образом, формула функциональной систематики обогащается дополнительной информацией о состоянии объекта, учитывая различные его аспекты и характеристики, что способствует более детальному и точному представлению объекта в систематизированном виде [93].

$$R_i[Q_{ijkl}(B_i, V_i) * Q_{ijkl}(B_i, V_i)C_{ij}(B_i, V_i)](B_i, V_i)(S_i(B_i, V_i), S_i(B_i, V_i), \dots) \quad (2.32)$$

где S – таксон состояния объекта,

i в S_i – нормированное значение параметра объекта в процентах,

(B_i, V_i) находящиеся после S_i – мерон параметра объекта.

Например: (S98(L4.13.1), S100(L4.13.2), S86(L4.13.3)) – нормированное значение габаритной высоты составляет 98%, нормированное значение габаритной ширины составляет 100%, нормированное значение габаритной длины составляет 86%.

Модифицированная таксономическая модель [98] обеспечивает возможность записи количественных характеристик технического и/или технологического объекта, в том числе вектора состояний объекта.

Для оценки технического состояния объектов со сложной структурой, состоящих из различных элементов, требуется провести анализ технического состояния каждого отдельного компонента системы, исходя из заранее определенных параметров для каждого из них. После этого, необходимо вычислить комплексные показатели для структур, расположенных на более высоких уровнях иерархии внутри сложного технического объекта, как показано на рисунке 2.12 [99].

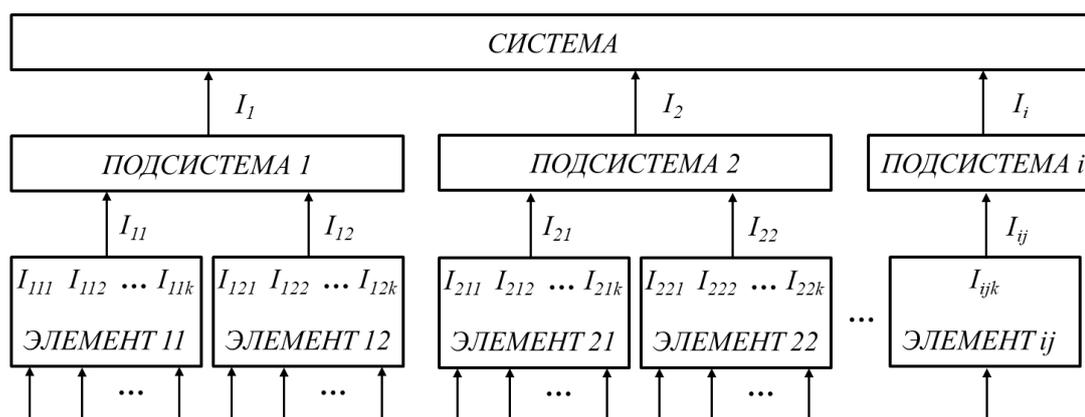


Рис. 2.12. Модель иерархической структуры сложного технического или технологического объекта

ИТС может служить таким показателем и, аналогично комплексному индексу экобезопасности, интегрироваться в качестве таксона состояния объекта в формулы ФС. Применение *модифицированных методов ФС* для кодирования и поиска аналогичных объектов, включая объекты-функционалы, подверженные воздействиям объекты и внешние влияющие факторы, способствует эффективному поиску соответствий. Эффективность такого алгоритма гарантирована при условии наличия обширной базы данных систематизированных объектов, что позволяет многократно вносить описание одного и того же технического или технологического объекта в базу ФС.

Модифицированная таксономическая модель для технических и технологических объектов [100] выделяется способностью к декомпозиции и анализу структурного состава объектов сложной структуры, обеспечивая понимание их классификации. Функциональная декомпозиция объекта сложной структуры, состоящего из множества связанных подсистем, определяется

особенностью выбора подсистем, и характеризуется наличием отношений между ними (функциональные, информационные, логические и т.д.). При этом степень связи, между подсистемами технического или технологического объекта сложной структуры, можно описать коэффициентом взаимосвязи $K = N / N0$, где N – число взаимодействующих подсистем, $N0$ — общее количество подсистем в структуре объекта. В рамках функциональной декомпозиции, рекомендуется использовать разбиение на составные подсистемы, при условии, что такое разбиение не изменяет основные части системы. При этом, на основе отдельных подсистем может быть легко построена составная модель, описывающая состояние всего объекта сложной структуры. Таким образом, создание баз данных объектов на основе модифицированных методов ФС, может быть использовано в качестве базы для оптимального синтеза экобезопасных технических и технологических объектов, что продемонстрировано в главе 4.

Модифицированная систематика функциональных систем отличается от стандартных классификаций своим расширенным охватом объектов, фокусировкой на использовании информационно-поискового языка и предназначена для долгосрочного использования. Она включает в себя разнообразие материалов, продукции, машин, оборудования, относящихся к различным областям знаний и отраслям промышленности, а также процессы и ресурсы, необходимые для их разработки, испытаний, изготовления и эксплуатации.

В отличие от узкоспециализированных классификаций, которые ведут к углублению дифференциации знаний, предложенная систематика способствует интеграции и синтезу знаний. В промышленных классификациях объекты обычно классифицируются по их наименованиям, не учитывая их свойств и функциональных связей, что может быть достаточно для статистических нужд, но недостаточно для сфер материаловедения, машиностроения и научных исследований. Функциональные формулы, аналогично химическим, понятны на всех языках, что делает их важным инструментом для междисциплинарного взаимодействия [93].

В сфере машиностроения, особенно в станкостроении, актуален вопрос мониторинга технического состояния (ТС) объектов. Создание системы мониторинга и хранения данных о ТС объекта часто невозможно без значительных затрат. Использование адаптированных методов функциональной систематики (ФС) позволяет разработать такую систему, охватывающую все аспекты материальных и нематериальных объектов, что особенно важно для учета экологических аспектов.

Рассмотрение применения адаптированных методов ФС к промышленному технологическому оборудованию выявило их эффективность в машиностроительной области. Основные концепции в рамках таксономии объектов и процесс-функционалов металлообработки, экологии и использования смазывающе-охлаждающих жидкостей (СОЖ) были анализированы с целью изучения состава и структуры функциональных систем, формирующих объекты сложной структуры.

Металлообрабатывающее станочное оборудование (МС) было выбрано в качестве объекта-функционала (ОФ), обрабатываемая заготовка-деталь (Д) – как объект воздействия, а смазывающе-охлаждающие жидкости (СОЖ) – в качестве фактора внешней среды (см. рис. 2.13) [82].

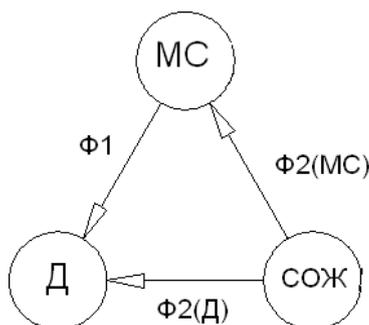


Рис. 2.13. Функциональная система металлообрабатывающего оборудования

Воздействия ОФ на исходный объект (функциональная связь МС – Д), происходят для реализации указанной функции Ф1. Данную зависимость можно охарактеризовать записью:

$$МС \rightarrow Ф1 \rightarrow Д \quad (2.33)$$

Обработка детали выступает в роли основной служебной функции. Взаимодействия между функциональными связями Ф2(МС) и Ф2(Д) демонстрируют согласованность между объектом-функционалом и элементами внешней среды, например, смазывающе-охлаждающими жидкостями (СОЖ), посредством критерия К совместимости. В контексте выполняемых функций, любой материальный объект в системе может выступать как инициатор действия или его реципиент. Систематизированный объект определяется как объект-функционал, предназначенный для реализации специфической функции в рамках взаимодействия с элементами внешней среды. В этой связи, обрабатываемая металлическая деталь рассматривается как исходный объект, который формирует основу функциональных взаимодействий.

Функциональные действия осуществляются через процессы-функционалы П. Полученная структура служит фундаментом для группировки множества объектов-функционалов и процессов в иерархические категории – таксоны, сгруппированные по общим признакам.

В контексте функциональной компьютерной классификации, токарный горизонтальный станок 16А20Ф3, как объект-функционал, может быть представлен следующим образом:

$$M6[Q2.13.7.2(A5.16.11.4)C2.7(B)] \quad (2.34)$$

где М6 – машины и оборудование, Q2.13.7.2 - для технологических преобразований в производстве, А5.16.11.4 – токарные станки для точения заготовок из металла, С2.7 – диаметр обработки 300-800 мм, В –расположение горизонтальное.

На основе предложенных методов модифицированной ФС, разработан программный комплекс «iIndex», что подтверждено свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662285 от 02.11.2017 [102]. Разработанный комплекс, может использоваться как для создания формул ФС, так и дальнейшей их расшифровки, а также предусмотрена возможность дальнейшей его интеграции в современные системы управления базами данных (СУБД) (рис. 2.14).

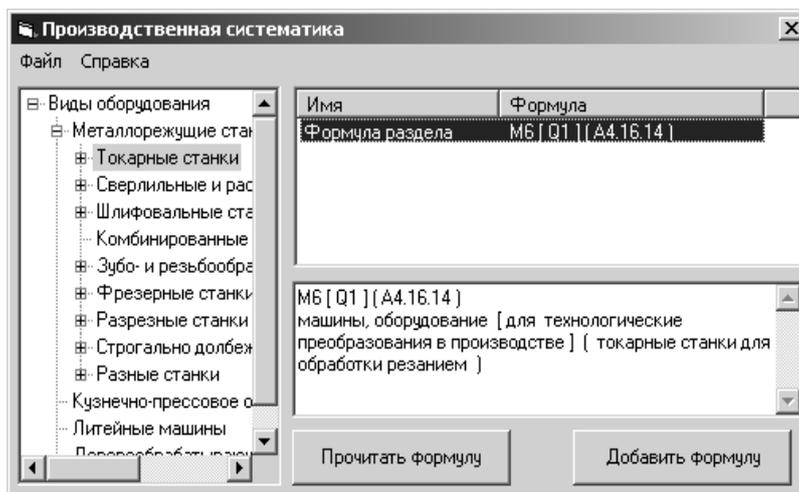


Рис. 2.14. Пример записи формулы в каталогах производственной систематики в программном комплексе «iIndex»

На данный момент все действующие системы классификации, начиная от широко применяемой универсальной десятичной классификации и Международной классификации изобретений до менее известной библиотечно-библиографической классификации, способствуют дальнейшему углублению разобщенности знаний. Это, в свою очередь, затрудняет объективную оценку возможностей использования различных объектов и процессов в производственной сфере и их взаимодействий. Основные проблемы текущих систем, задачей которых является классификация объектов, проявляются в игнорировании следующих аспектов:

- 1) структурных характеристик объектов;
- 2) особенностей их взаимодействия;
- 3) способности объекта выполнять заданные функции в определенных условиях.

Эти аспекты значительно влияют на производительность поисковых систем в сфере производства и снабжения. Необходимость сохранения последовательности жизненного цикла и единого использования классификаторов являются ключевыми для эффективного применения классификационных систем. Полное понимание всех деталей автоматизации поисковых процедур обеспечивает наилучшие результаты классификации, особенно при расширении ассортимента и

сокращении объемов производства изделий. *Модифицированная функциональная систематика* выделяется по следующим параметрам[104]:

- 1) обширностью покрываемой классификационной области;
- 2) акцентом на включение критериев качества и экобезопасности состояний объектов;
- 3) использованием информационно-поискового языка;
- 4) ориентацией на долгосрочное применение.

2.4 Идентификация состояний технических и технологических объектов

Современные технические и технологические объекты представляют собой системы с комплексной структурой, содержащие множество элементов с разнообразными связями и взаимодействиями. Основные характеристики, влияющие на их качество, включают:

- Единую цель функционирования всей системы;
- Разнообразие функций, выполняемых подсистемами;
- Возможность разделения на подсистемы и их иерархическую организацию;
- Стойкость к внешним и внутренним воздействиям и способность к саморегуляции.

Идентификация состояний технических и технологических объектов заключается в классификации объекта по заданному набору параметров в соответствующий класс состояний. Задачи параметрической идентификации включают оценку параметров системы на основе наблюдений за входными и выходными данными при известной структуре объект, при этом если начальные данные об объекте ограничены, требуется предварительно определить структуру модели, что называется структурной идентификацией [107].

Математическую модель (ММ) любого технического или технологического объекта можно задать в виде традиционной модели «черного ящика» [108]:

$$\Sigma_m = \{T_m, X_m, U_m, \Omega_m, Y_m, \Gamma_m, H_m, G_m\} \quad (2.35)$$

где T_m — множество моментов времени; X_m — множество состояний объекта; U_m — множество мгновенных значений входных воздействий; Ω_m — множество допустимых входных воздействий; Y_m — множество мгновенных значений выходных воздействий; Γ_m — множество допустимых выходных воздействий; H_m — оператор переходов, устанавливающий функциональную связь между состояниями; X_m, G_m — операторы, устанавливающие связь между состоянием системы и ее выходной интегральной характеристикой [109], предопределяющей множество Γ_m .

В зависимости от уровня и назначения модели величины $X_m, U_m, \Omega_m, Y_m, \Gamma_m$ могут принимать различные характеристики, например, в качестве U_m и Y_m можно взять входные и выходные процессы формирования напряжений для импульсного блока питания.

Под множеством моментов времени T_m здесь подразумевается последовательность дискретных моментов времени, а отсчеты — соответствующие им процессы.

Технический или технологический объект можно представить как систему, состоящую из множества взаимодействующих подсистем [115], т.е. сложную систему, которая позволяет выполнять определенные функции (F), для достижения целевых задач (протекание процессов) и конструктивно-технологические параметры (P), характеризующих состояния объекта.

Функциональные параметры (F) характеризуют основное назначение объекта, охватывая действия, производимые объектом-функционалом, цель этих действий, и связь объекта с внешней средой. Под конструктивно-технологическими параметрами (P) подразумевается классификационное пространство методов модифицированной ФС, которая рассматривается в п. 2.3, и определяющие его конструкцию, состав, форму, а также состояния, описываемые индексами технического состояния и экобезопасности. И тогда системная модель объекта примет следующий вид:

$$I = \begin{cases} \langle B_i^I, O_i^I, C_i^I, M^I, H^I \rangle \\ \langle T^I, K^I, Pt^I, Tt^I \rangle \\ \langle ITS^I, IEB^I \rangle \end{cases}, \text{ где } i = \overline{1, m} \quad (2.36)$$

где *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 в которых реализуется объект; H^I – множество морфологических систем, в которых реализуется объект; *уровень конструкторско-технологических параметров*: T^I – тип объекта, K^I – класс объекта, *уровень параметров состояний* m

Таким образом, структурная модель формирования формул модифицированной ФС технических и технологических объектов представлена на рис. 2.15.

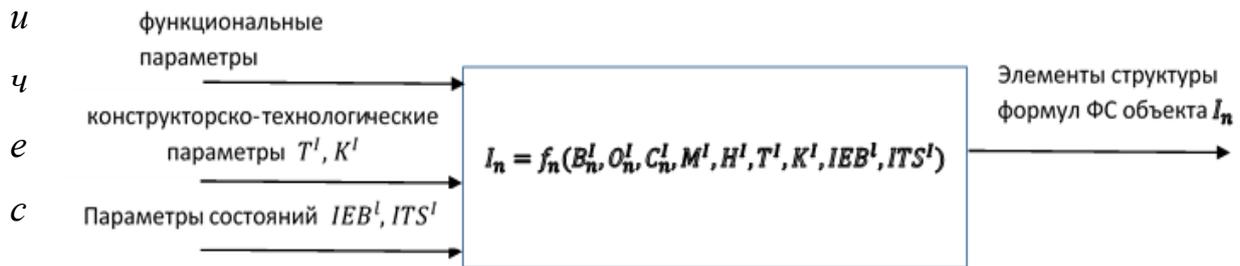


Рис. 2.15. Структурная модель формирования формул модифицированной ФС состояний технических и технологических объектов

Полученная модель формирования формул модифицированной ФС состояний технических и технологических объектов может быть использована при организации обратной связи на всех этапах ЖЦ при управлении качеством и

Э
Л

При моделировании процесса управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов используется теоретико-

множественная модель: $Y = F(X, \Lambda, U)$, где X – множество функциональных и

конструкторско-технологических параметров, определяющих состояния объектов

в зависимости от внешних условий, U – вектор управляющих воздействий (ТООиР),

О
Н

П
О

а
л

F – теоретико-множественный функционал, выражающий соответствие $w = (X, Y, F)$ с учётом воздействия внешних факторов Λ и управляющих воздействий U , при этом Y – множество выходных данных (рис. 2.16).

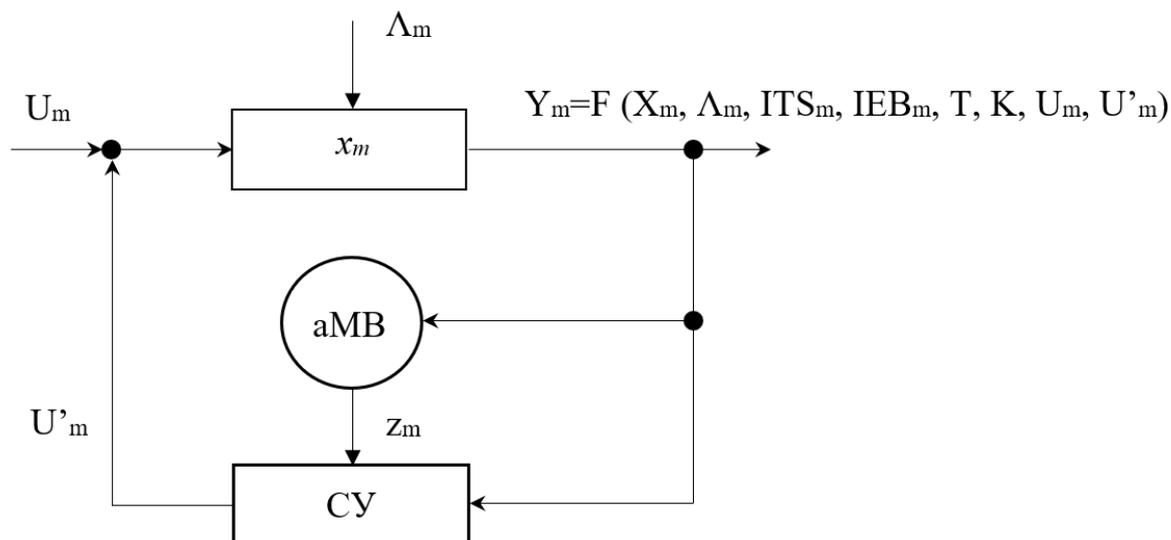


Рис. 2.16. Модель управления качеством состояний технических и технологических объектов, где аМВ - адаптивные модели вычислений

Для конструкторско-технологических параметров ITS, IEB, T, K введём соответствующие множества допустимых значений $D_{ITS}, D_{IEB}, D_T, D_K$, и тогда теоретико-множественная модель:

$$Y = F(ITS, IEB, D_{ITS}, D_{IEB}, D_T, T, D_K, K, \Lambda, U, U'), \quad (2.37)$$

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 , что и описывает модель управления качеством состояний технических и технологических объектов.

Использование данных подходов применительно к широкому классу объектов весьма проблематично, при этом как было показано ранее (в п. 2.1.1) многие параметры, определяющие состояние объекта имеют нечеткую структуру, либо могут быть описаны с помощью множества различным образом взаимосвязанных величин, которые в большинстве случаев, трудно

представить аналитически. К такого рода техническим и технологическим объектам относятся многочисленные объекты промышленных предприятий, которые характеризуются высоким уровнем сложности и встроенными системами управления. Структура данных технических и технологических объектов в подавляющем большинстве ситуаций неизвестна, и в подавляющем большинстве ситуаций задача идентификации технического или технологического объекта сложно реализуема, т.к. необходимо идентифицировать только определенные характеристические параметры, без вмешательства в технологический процесс и без каких-либо управляющих воздействий. Задача значительно упрощается, в случае возможности подачи специально разработанного тестового воздействия на вход (входы) технического или технологического объекта, характер и последовательность которого, определяются заранее разработанным алгоритмом, в рамках спланированного эксперимента, возможно с использованием специальных средств. Это позволяет получить необходимую информацию о свойствах и характеристиках состояний технического или технологического объекта при минимуме экспериментальных данных и, следовательно минимальных затратах и трудоёмкости. Однако, по результатам эксперимента на техническом или технологическом объекте сложной структуры, не всегда можно построить адекватную (точную) модель объекта.

2.5 Функциональная схема управления качеством состояний технических и технологических объектов

На основе методики функционального моделирования IDEF0 разработана схема управления качеством состояний технических и технологических объектов, демонстрирующая этот процесс на примере оборудования промышленного предприятия. На рисунке 2.17 представлены фрагменты контекстной схемы, а на рисунке 2.18 – декомпозиционной.

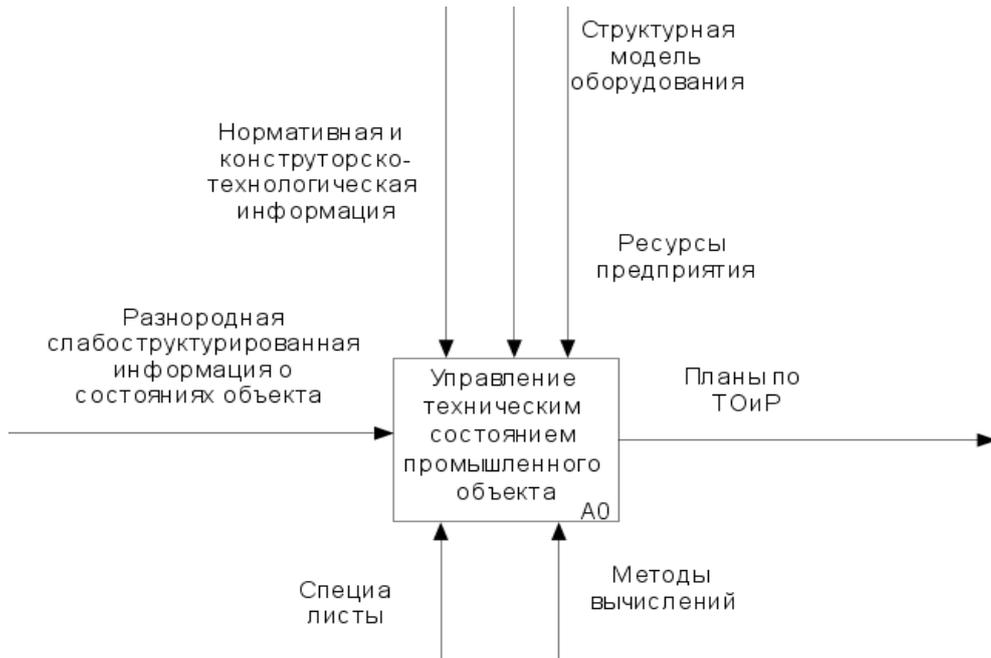


Рис. 2.17. Фрагмент функциональной схемы управления качеством состояний технических и технологических объектов (контекстная диаграмма)

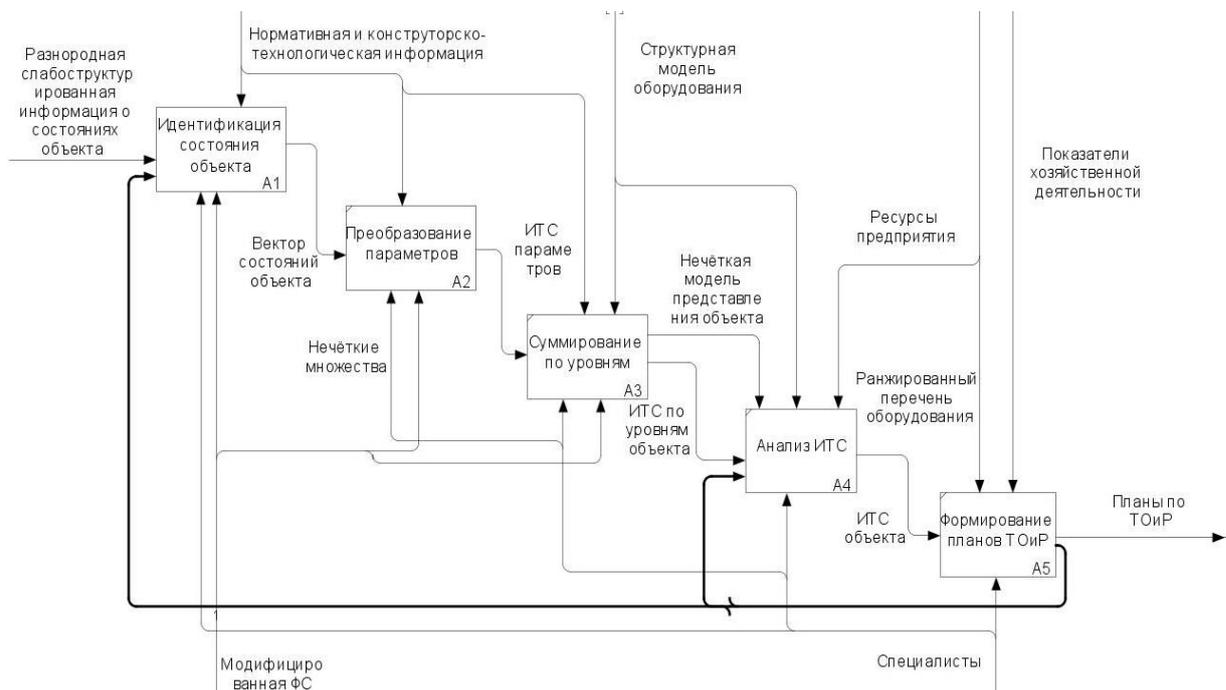


Рис. 2.18. Фрагмент функциональной схемы управления качеством состояний технических и технологических объектов (диаграмма декомпозиции)

Первым этапом функциональной схемы управления качеством состояний технических и технологических объектов является процесс идентификации

состояний технического или технологического объекта, на основе разнородной и слабоструктурированной информации о состояниях объекта. В результате выполнения которого формируются индексы состояний объекта (ИТС), на базе конструкторско-технологической и нормативно-технической документации на объект.

Далее, производится приведение общего ИТС объекта к значению ИТС для каждой подсистем, на основе теории нечётких множеств.

На следующем этапе выполняется агрегирование общего ИТС объекта. Формируется нечёткая модель представления объекта.

Далее выполняется анализ полученного значения общего ИТС объекта и значений ИТС подсистем. И в результате формируются планы по ТООИР с учётом показателей хозяйственной деятельности предприятия [117].

Модель предусматривает управление и отслеживание выполнения планов по ТООИР, с возможностью корректировки, путём обеспечения обратной связи по входу (выделенная линия).

Представленная функциональная модель (рис. 2.17 - 2.18) [119, 123] позволяет обеспечить управление качеством состояний технических и технологических объектов. Однако возникает проблема скорости выполнения данного процесса, особенно это актуально для современных технических и технологических объектов сложной структуры. И в реальных ситуациях, например для производственных объектов, это не позволяет обеспечить выполнение целевых временных установок на ограничение времени принятия решений или инициирования целевых воздействий. Поэтому для обеспечения эффективного управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов требуется интеллектуализация данного процесса [120], путём использования новых интеллектуальных (научноёмких) моделей вычислений для обеспечения качества состояний технических и технологических объектов.

2.6 Выводы по главе 2

1. Показано что техническое состояние технического и технологического объекта – понятие комплексное, требующее интеграции по всем многочисленным параметрам объекта.
2. Проведён анализ современных принципов ТОиР, в рамках которого, отмечена тенденция обслуживания технических и технологических объектов по фактическому ТС и обозначены основные задачи, среди которых особое место занимает определение ТС объекта.
3. Предложен индекс технического состояния (ИТС) объекта, как комплексный показатель, позволяющий обобщить информацию о состояниях технического или технологического объекта.
4. Предложен комплексный индекс экобезопасности как суммарная функция, основанная на оценках отдельных показателей утилизации и их значимости для определённых видов продукции, для количественной оценки экобезопасности состояний технических и технологических объектов.
5. Выполнена модификация функциональной систематики путём включения показателей, отражающих обобщённые характеристики качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов.
6. Разработана функциональная диаграмма управления качеством состояний технических и технологических объектов на примере оборудования промышленного предприятия.
7. Определена необходимость ускорения получения информации о состояниях технических и технологических объектов и общепринятой методики обработки информации для принятия решений, что указывает на необходимость в интеллектуализации процесса управления качеством и экобезопасности состояний технических и технологических объектов.

3 КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ. ОТКРЫТАЯ СИСТЕМА АДАПТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И ЭКОБЕЗОПАСНОСТЬЮ СОСТОЯНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Применение общепринятых методов обработки информации при решении задач, связанных с обеспечением контролепригодности, отказоустойчивости и экобезопасности технических и технологических объектов, приводит к значительным временным и ресурсным затратам ввиду необходимости анализа больших массивов данных, что снижает общую эффективность обеспечения качества и экобезопасности состояний данных объектов.

В настоящее время успешно развиваются подходы, основанные на наукоёмких моделях вычислений, включая в том числе «мягкие», оптимизационные (биоинспирированные, вдохновленные «живой природой») и прогностические модели вычислений, использование которых позволяет решить задачу оперативного и стратегического управления качеством и экобезопасностью состояний современных технических и технологических объектов.

Таким образом, эффективное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов требует системного подхода в применении наукоёмких адаптивных моделей вычислений, что и обеспечивает интеллектуализацию процесса управления, с учётом условий, свойств и особенностей ЖЦ технических и технологических объектов.

3.1 Модели «мягких» вычислений

В начале 1940-х годов два американских исследователя У. Маккалок и У. Питтс разработали модель нейрона, что явилось первой попыткой формализовать работу нервной системы и создать математическую модель нейрона [126], в результате чего были заложены основы искусственных нейронных сетей (ИНС)

[124]. В 1994 г. известный учёный Л. Заде [84] сформулировал концепцию «мягких вычислений», включающую в себя, в том числе и нечеткую логику [125], что положило начало ряду перспективных направлений.

В настоящее время наблюдается сближение представителей разных направлений искусственного интеллекта: традиционная обработка знаний и естественные языки; нейронные сети; распознавание и синтез речи; многоагентные системы. Данное сближение связано не только с естественным развитием науки, но и определяется глубинными тенденциями интеграции. Важнейшая тенденция в развитии искусственного интеллекта заключается в интеграции отдельных направлений, причем наблюдается глубинная интеграция, осуществляемая на основе создания гибридных систем.

ИНС являются универсальным инструментом для работы с разнообразными сложными объектами. Главным преимуществом корректно построенных и обученных ИНС является скорость работы, что весьма важно при решении задач оперативного обеспечения контролепригодности, отказоустойчивости и экобезопасности технических и технологических объектов.

3.1.1 Нейросетевые модели вычислений

ИНС являются неотъемлемым инструментом машинного обучения, прежде всего благодаря высокой скорости и точности работы, при условии предварительного обучения на достаточном объеме данных.

Основным методом процесса настройки ИНС является изменение синаптических весов. Этот подход очень близок к теории линейных адаптивных фильтров [126], однако особенностью ИНС является возможность изменять свою топологию в процессе обучения.

Совершенно очевидно, что свою силу нейронные сети черпают, во-первых, из распараллеливания обработки информации и, во-вторых, из способности самообучаться, т.е. создавать обобщения. Под обобщением понимается способность получать обоснованный результат на основании данных, которые не

встречались в процессе обучения. Эти свойства позволяют использовать инструментарий ИНС для решения задач оптимального синтеза контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасных технических и технологических объектов, что продемонстрировано в главе 5 «Практическая реализация интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов».

Реализация ИНС обеспечивает следующие важные свойства:

1. *Нелинейность*. Искусственные нейроны могут быть линейными и нелинейными. Нейронные сети, построенные из соединений нелинейных нейронов, сами являются нелинейными. Более того, эта нелинейность особого вида, так как она *распределена* по сети. Нелинейность является чрезвычайно важным свойством, особенно если сам физический механизм, отвечающий за формирование входного сигнала, тоже является нелинейным (например, диагностические параметры).

2. *Адаптивность*. Нейронные сети обладают способностью адаптировать свои синаптические веса к изменениям окружающей среды. В частности, нейронные сети, обученные действовать в определенной среде, могут быть легко переучены для работы в условиях незначительных колебаний параметров среды.

3. *Достоверность*. В контексте задачи классификации состояний можно разработать нейронную сеть, собирающую информацию не только для определения конкретного класса, но и для увеличения достоверности принимаемого решения. Впоследствии эта информация может использоваться для исключения сомнительных решений, что повысит продуктивность нейронной сети.

4. *Отказоустойчивость*. Нейронные сети, потенциально отказоустойчивы. Это значит, что при неблагоприятных условиях их производительность падает незначительно.

Впервые модель искусственного нейрона (модель Маккалока-Питтса) была описана в [126]. В этой модели на вход нейрона подается взвешенная сумма из n признаков объекта. Значения всех признаков, характеризующих объект, в виде

вектора передаются в нейрон. Под взвешенной суммой понимают сопоставление весового коэффициента w_i каждому входящему признаку. Знак весового коэффициента определяет характер связи нейрона: связи с отрицательными значениями называют тормозящими, а с положительными – возбуждающими; а абсолютная величина характеризует степень воздействия конкретного признака на нейрон. Если взвешенная сумма превышает порог активации нейрона w_0 , нейрон «активируется», а результат преобразования взвешенной суммы поступает на выход a . Модель Маккалока-Питтса описывается выражением

$$a(x) = \theta(\sum_{i=1}^n (w_i * x^i - w_0)), \quad (3.1)$$

где w_i и x^i - сигналы на входах нейрона и веса входов, $\theta(x) = [x \geq 0]$ – ступенчатая функция Хевисайда. На рис. 3.1 приведена структура модели.

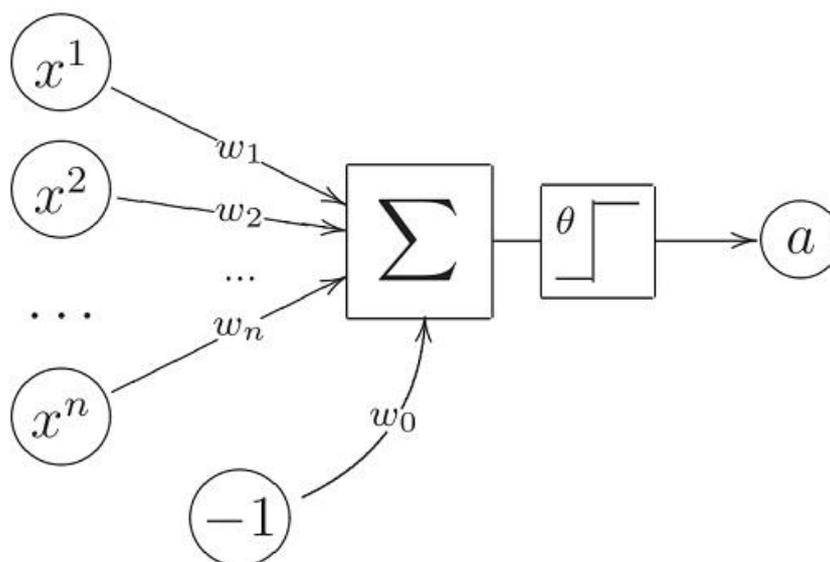


Рис. 3.1. Структура модели искусственного нейрона

Функцию $\theta(x)$, преобразующую значение взвешенной суммы, принято называть функцией активации (ФА) нейрона, которая определяет зависимость сигнала на выходе нейрона от взвешенной суммы сигналов на его входах. Обычно ФА является монотонно возрастающей и имеет область значений $[-1,1]$ или $[0,1]$. Также ФА должны быть непрерывно дифференцируемой на всей числовой оси [30]. Искусственный нейрон полностью характеризуется своей ФА. Применение различных ФА позволяет вносить нелинейность в работу нейрона и ИНС.

Существенным недостатком представленной модели является ФА, так как нейрон с такой ФА игнорирует часть информации о входном сигнале, если взвешенная сумма не превышает заданного порогового значения.

Правильно подобранная или разработанная ФА повышает точность нейросетевой модели и способна значительно снизить время обучения глубокой сети. Аппарат теории нейросетевого моделирования содержит несколько *базовых* ФА для проектирования модели ИНС, некоторые из них приведены ниже:

Линейная, известная также как линейная комбинация, определяет линейную зависимость сигнала на выходе нейрона от взвешенной суммы сигналов на его входе. Сигнал на выходе нейрона линейно связан со взвешенной суммой сигналов на его входе.

$$f(x) = ax \quad (3.2)$$

где под x подразумевается взвешенная сумма сигналов на входах нейрона, a — настраиваемый параметр функции. В ИНС с несколькими слоями, как правило, нейроны с линейными ФА составляют входной слой и при этом допускается сдвиг функции по обеим осям.

На практике чаще применяется её модификация – шаговая функция, изображенная на рис. 3.2

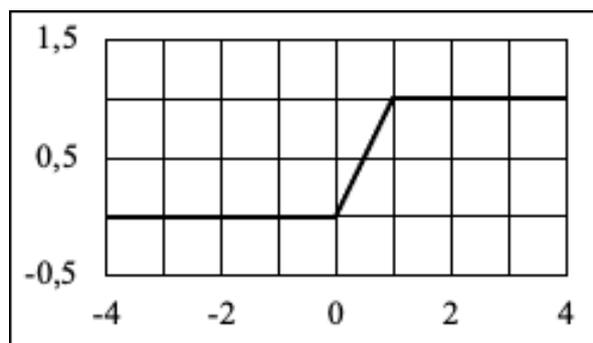


Рис. 3.2. График линейной шаговой функции

Данная функция описывается выражением:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ x, & 0 < x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

где под x подразумевается взвешенная сумма сигналов на входах нейрона.

При этом возможен сдвиг функции по обеим осям, как показано на рисунке 3.3 и недостатком линейной функции с насыщением относительно обыкновенной линейной можно назвать то, что она не является дифференцируемой на всей числовой оси.

Пороговая, известная также как функция Хевисайда, ее график приведен на рис. 3.3.

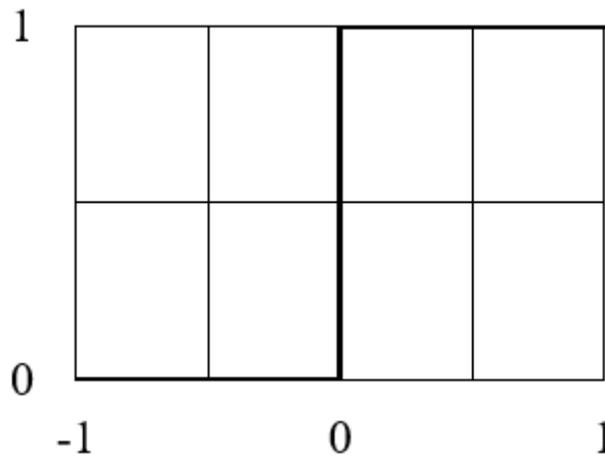


Рис. 3.3. График пороговой ФА

Выход этой функции определяется в зависимости от того, соответствует ли вход заданному порогу.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 1 \\ 0 & \end{cases}, \quad (3.4)$$

где под x подразумевается взвешенная сумма сигналов на входах нейрона, а порог функции определен единицей.

Недостатком данной функции является, как и для линейных, невозможность дифференцирования на всей числовой оси.

Выпрямительный линейный блок (ReLU), принадлежит к семейству линейных функций, определяется как положительная часть своего аргумента

$$f(x) = \max(0, x), \quad (3.5)$$

где под x подразумевается взвешенная сумма сигналов на входах нейрона.

График функции изображен на рис. 3.4.

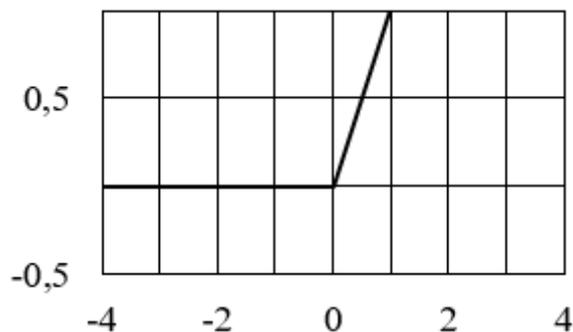


Рис. 3.4. График функции ReLU

Данная ФА характеризуется низкой вычислительной сложностью, и в качестве недостатков выделяют игнорирование отрицательных значений параметра x , из чего следует «нулевой» градиент для таких параметров, при котором весовые коэффициенты сети никогда не обновляются новыми значениями.

Логистическая (сигмоидальная)

$$f(x) = (1 + e^{-ax})^{-1}, \quad (3.6)$$

где под x подразумевается взвешенная сумма сигналов на входах нейрона, a – параметр функции, определяющий ее «крутизну». Когда $a \rightarrow \infty$, функция вырождается в пороговую, при $a = 0$ функция вырождается в $f(x) = 0.5$. График функции приведен на рис. 3.5.

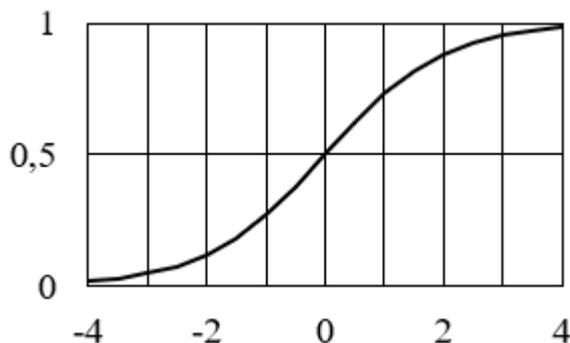


Рис. 3.5. График логистической функции

Функция является дифференцируемой на всем диапазоне значений. Область значений функции находится в интервале (0, 1). Преимущество функции заключается в простоте ее производной, а недостатком является малое изменение значения производной при слишком малых или слишком больших значениях. Особенностью нейронов с такой передаточной характеристикой является то, что они усиливают сильные сигналы существенно меньше, чем слабые, поскольку области сильных сигналов соответствуют пологим участкам характеристики.

Область значений функции **гиперболического тангенса**, график которой приведен на рис. 3.6, в отличие от логистической кривой, лежит в интервале (-1, 1)

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad (3.7)$$

где под x подразумевается взвешенная сумма сигналов на входах нейрона.

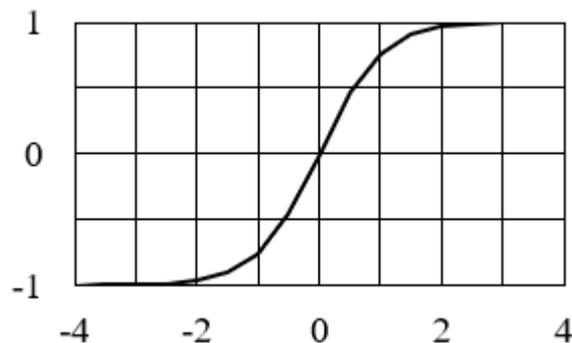


Рис. 3.6. График функции гиперболического тангенса

Преимущества и недостатки аналогичны обозначенным для логистической функции. Данная функция используется значительно чаще сигмоидальной поскольку определяет более широкий диапазон значений. В отличие от логистической функции, среднее значений функции гиперболического тангенса ближе к центру симметрии, что позволяет таким ИНС проводить обучение быстрее.

Помимо приведенных, известны и другие ФА, такие как, сигмоидальный взвешенный блок, радиально-базисная функция, экспоненциальный линейный блок [127]. Таким образом, тип ФА выбирается в зависимости от условий и свойств решаемых задач, а также архитектуры ИНС.

К базовым типам архитектур ИНС относятся сеть прямого распространения, рекуррентная нейронная сеть, сверточная нейронную сеть. Различие между архитектурами заключается в способе распространения сигнала. На практике с применением базовых архитектур строят глубокие ИНС для любых задач. Глубокие сети помимо входного и выходного слоев, содержат в своей структуре также наборы скрытых слоев.

Нейронная сеть прямого распространения - простейшая модель глубокой ИНС, состоит из нескольких слоев нейронов. Топология соединений нейронов в такой сети подразумевает однонаправленное распространение сигнала от каждого нейрона одного предыдущего слоя ко всем нейронам следующего слоя, как показано на рис. 3.7.

Представленная на рис. 3.7 сеть состоит из двух слоев (Слой 1 и Слой 2). Вектор \bar{X} , состоящий из n признаков, поступает на вход сети. Элементы вектора являются действительными числами. Матрицы W^1 и W^2 содержат весовые коэффициенты первого и второго слоя сети. Вектор \bar{Y} представляет собой вывод сети. Два компонента вектора (Y_1 и Y_2) указывают на решаемую сетью задачу бинарной классификации. Сети прямого распространения могут содержать больше одного внутреннего слоя и при этом размерность каждого слоя может быть произвольной.

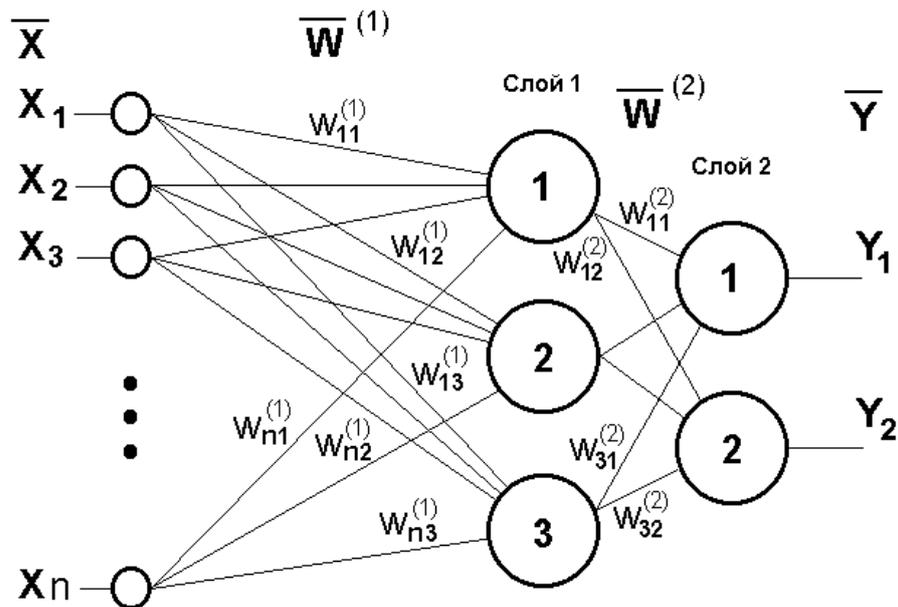


Рис. 3.7. Структура сети прямого распространения

Как правило, размерность внутреннего слоя уменьшается по мере приближения к выходному слою, а выходные значения последнего слоя представляют собой решение сети в рамках конкретной задачи, например решение классификатора в рамках задачи бинарной классификации.

Математическая модель Слоя 1 сети прямого распространения, изображенной на рисунке 3.7, формализуется следующим образом:

$$a^{(1)} = \begin{cases} a_1^{(1)} = g(W_{11}^{(1)}x_1 + W_{21}^{(1)}x_2 + \dots + W_{n1}^{(1)}x_n) \\ a_2^{(1)} = g(W_{12}^{(1)}x_1 + W_{22}^{(1)}x_2 + \dots + W_{n2}^{(1)}x_n), \\ a_3^{(1)} = g(W_{13}^{(1)}x_1 + W_{33}^{(1)}x_2 + \dots + W_{n3}^{(1)}x_n) \end{cases} \quad (3.8)$$

где $a_i^{(1)}$ – вывод i -го нейрона Слоя 1, g – некоторая функция активации, $W^{(1)}$ – матрица весовых коэффициентов Слоя 1.

Вывод Слоя 2 формализуется в виде

$$Y = a^{(2)} = \begin{cases} a_1^{(2)} = g(W_{11}^{(2)} + W_{21}^{(2)} + W_{31}^{(2)}) \\ a_2^{(2)} = g(W_{12}^{(2)} + W_{22}^{(2)} + W_{32}^{(2)}) \end{cases} \quad (3.9)$$

где $a_i^{(2)}$ – вывод i -го нейрона Слоя 2

Сети прямого распространения обычно используются как вспомогательные элементы при построении более сложных нейросетевых моделей, при этом в задачах классификации слой сети прямого распространения часто используется в качестве последнего слоя, а число нейронов в слое, соответствует числу классов конкретной задачи классификации.

Рекуррентная нейронная сеть (РНС) — это класс ИНС, которые в отличие от сетей прямого распространения, характеризуются наличием обратной («рекуррентной») связи у нейронов, и при этом соединения между нейронами образуют направленный или неориентированный граф во временной последовательности. Это позволяет РНС использовать свое внутреннее состояние в качестве памяти при обработке упорядоченных последовательностей входных данных переменной длины [41] и делает их применимыми для таких задач, как

классификация состояний технических и технологических объектов.

Важной отличительной особенностью РНС является наличие общих весовых коэффициентов (матрицы W , U). Эти коэффициенты используются на каждом этапе обучения (поскольку РНС имеет один слой), в отличие от традиционных нейронных сетей, где на каждом слое используются свои весовые коэффициенты.

Так как в РНС нейроны не только передают результат обработки нейронам следующего слоя, но и самим себе (обратная связь), обобщенную структуру можно выразить в виде нескольких слоев сети прямого распространения, как проиллюстрировано на рис. 3.8.

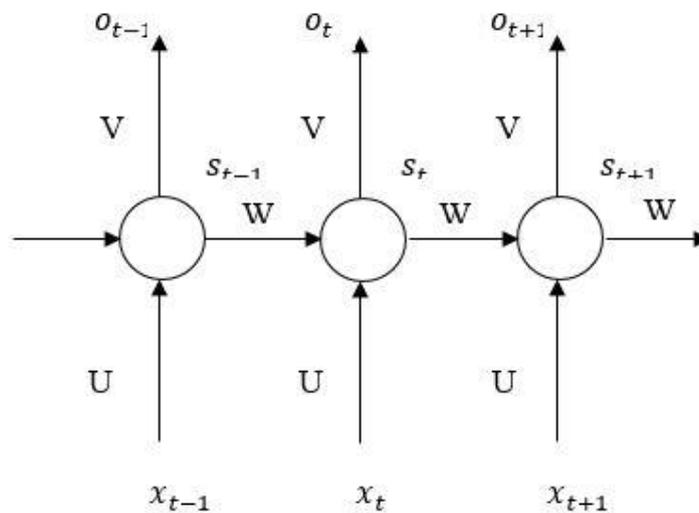


Рис. 3.8. Развернутая обобщенная структура РНС

Параметры U , V , W на рисунке 3.8 – векторы весовых коэффициентов, x_t – ввод сети на шаге t , s_t – скрытое состояние сети на шаге t , вычисляется на основе предыдущего скрытого состояния и текущего ввода сети:

$$s_t = f(U * x_t - W * s_{t-1}), \quad (3.10)$$

где f – это функция активации, o_t – вывод сети на шаге t :

$$o_t = \text{softmax}(V * s_t), \quad (3.11)$$

где softmax – нормализованная экспоненциальная функция

$$\text{softmax}(z) = \frac{e^z}{\sum_{i=1} e^{z_i}} \quad (3.12)$$

Таким образом, рекуррентный нейрон принимает на вход два вектора: фактический набор признаков – вектор X и вектор H , характеризующий внутреннее

состояние нейрона после обработки X . В отличие от традиционных ИНС, использующих различные рассчитываемые на каждом слое параметры, РНС использует одни и те же параметры (U, V, W) на всех шагах, что, в свою очередь, уменьшает количество параметров в обучении и дальнейшем использовании.

Известные разновидности РИНС представляют собой модификации РНС: сеть с долговременной-краткосрочной памятью (Long-Short Term Memory, LSTM) и управляемый рекуррентный блок (Gated Recurrent Unit, GRU) [127].

Противостоять проблеме исчезающего градиента LSTM сети позволяет механизм фильтров. Сеть обладает фильтрами ввода, вывода, потери и состояния-кандидата. Механизм фильтров позволяет регулировать поступление новой информации в вектор состояния сети, вывод состояния, обновление состояния. Ниже представлены уравнения LSTM сети:

$$i_t = \sigma(U_i * x_t + W_i * h_{t-1}) \quad (3.13)$$

$$f_t = \sigma(U_f * x_t + W_f * h_{t-1}) \quad (3.14)$$

$$o_t = \sigma(U_o * x_t + W_o * h_{t-1}) \quad (3.15)$$

$$g_t = \tanh(U_g * x_t + W_g * h_{t-1}), \quad (3.16)$$

где i_t, f_t, o_t, g_t – элементы векторов фильтров сети, σ – логистическая функция, \tanh – функция гиперболического тангенса, x – входная последовательность, h – вектор скрытого состояния ячейки сети, W и U – матрицы весовых коэффициентов фильтров сети i, f, o, g ; индекс t – индекс элемента обучающей последовательности.

На основании значений фильтров LSTM сети определяются ее вектора внутреннего состояния (внутренней памяти) и скрытого состояния:

$$c_t = \tanh(i_t \circ g_t + f_t \circ c_{t-1}) \quad (3.17)$$

$$h_t = o_t \circ c_t, \quad (3.18)$$

где c_t – вектор внутреннего состояния ячейки сети, h_t – вектор скрытого состояния ячейки сети, \circ – операция поэлементного произведения. Структура ячейки LSTM сети представлена на рис. 3.9.

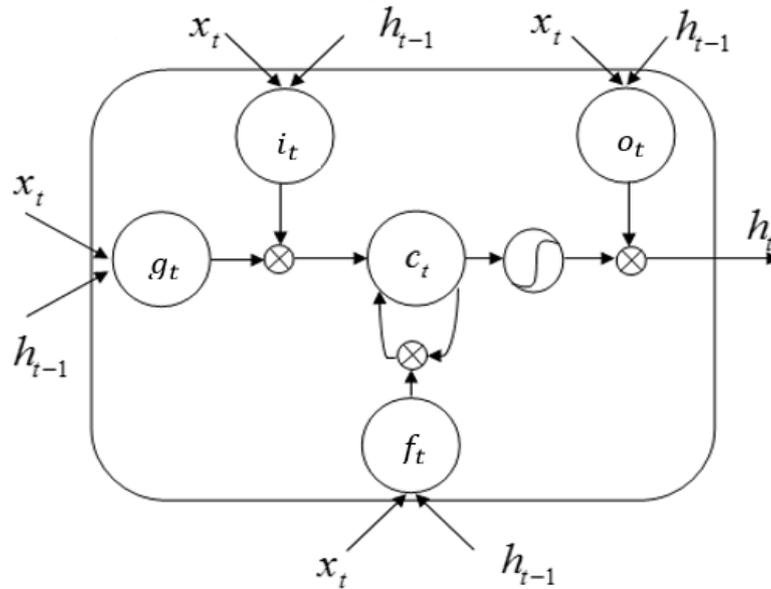


Рис. 3.9. Структура LSTM нейрона

Вектора i , f , o называются фильтрами ввода, сброса, вывода, соответственно, и благодаря сигмоидальной функции, которая «сжимает» значения этих векторов в интервал от 0 до 1 и, таким образом, при выполнении операции поэлементного произведения с другими векторами, определяется порог пропуска вектора через фильтр. Все фильтры имеют одинаковую размерность, равную размерности вектора скрытого состояния.

Вектор g – вектор новых значений-кандидатов, которые могут быть добавлены к следующему состоянию ячейки, вычисляется на основе текущего ввода и предыдущего скрытого состояния.

Вектор c – внутренняя память ячейки (ее внутреннее состояние), комбинация произведений предыдущего внутреннего состояния с фильтром сброса и нового внутреннего состояния-кандидата g с фильтром ввода.

Вектор h – вектор скрытого состояния ячейки. Скрытым состояние называется потому, что оно выводится не напрямую, а только как часть произведения фильтра вывода и вектора внутреннего состояния ячейки.

Таким образом, фильтр ввода регулирует поступление новой информации в сеть, фильтр сброса регулирует поступление предыдущего внутреннего состояния сети в текущее, фильтр вывода регулирует пропуск текущего скрытого состояния сети на следующий этап работы.

Данный механизм позволяет LSTM сети бороться с проблемой исчезающего градиента при работе с длинными последовательностями. Посредством обучения параметров фильтров (U , W) сеть «настраивает» свою «память».

Сеть GRU отличается от LSTM меньшим количеством операций при обработке сигнала в рекуррентном нейроне и только два фильтра – фильтр сброса и фильтр обновления.

$$u_t = \sigma(W_u x_t + R_u h_{t-1}) \quad (3.19)$$

$$r_t = \sigma(W_r x_t + R_r h_{t-1}) \quad (3.20)$$

$$c_t = \tanh(W_c x_t + U_c (r_t \circ h_{t-1})) \quad (3.21)$$

$$h_t = u_t \circ c_t + (1 - u_t) \circ h_{t-1} \quad (3.22)$$

Фильтр u_t регулирует скорость обновления скрытого состояния, в то время как фильтр r_t решает, какую часть прошлой информации следует сбросить, освободив часть внутренней памяти [45].

Несмотря на меньшее количество обучаемых параметров, позволяющих сети работать быстрее, чем LSTM, на практике оказалось, что GRU не всегда превосходит LSTM по эффективности обработки последовательностей данных, а выбор об использовании той или иной разновидности РНС часто основывается на требованиях к архитектуре и быстродействию нейросетевой модели, так как GRU хоть и обладает лучшим быстродействием, но может уступать LSTM по точности.

В основе принципа работы сверточной искусственной нейронной сети (СНС) [46] лежит операция «свертки». Суть свертки заключается в выделении существенных признаков состояний объектов. В ходе выполнения операции свертки, каждый параметр умножается на ядро свёртки, результат суммируется и записывается в соответствующую позицию выходного состояния.

Набор различных сверток позволяет выделять различные детали. С каждым слоем свертки выделяются все более абстрактные детали, вплоть до выделения понятий «высокого» уровня. При этом сеть настраивает не весовые коэффициенты, а матрицы сверток, что позволяет выделять значимые для конкретной прикладной задачи признаки состояний технических и технологических объектов.

Структура СНС представлена на рис. 3.10.



Рис. 3.10. Структура СНС

Структура СНС включает в себя набор слоев свертки и подвыборки, а также слой прямого распространения.

Сверточные слои являются основой СНС, поскольку они содержат ядра свертки (веса), которые извлекают базовые признаки, позволяющие отличать различные состояния объектов.

Слой свёртки содержит набор «сверток» и выделяет набор признаков соответственно. Весовые коэффициенты свертки оптимизируются в процессе обучения сети. Результат каждой свёртки передается в ФА. На рисунке 3.10 слой активации объединен со слоем свертки. Каждый сверточный нейрон содержит ядро свертки, применяемое для получения вывода сверточного нейрона. Сверточный нейрон выполняет поэлементное скалярное произведение с уникальным ядром и выходом соответствующего нейрона предыдущего слоя. Результат произведения будет содержать столько промежуточных результатов, сколько уникальных ядер, и таким образом сверточный нейрон — это результат всех промежуточных результатов, суммированных вместе с усвоенным смещением.

СНС - один из лучших алгоритмов по классификации состояний технических и технологических объектов, к преимуществам которой можно отнести меньшее число оптимизируемых весовых коэффициентов по сравнению с сетью прямого распространения, так как каждая свертка (матрица весов) используется для всех возможных состояний объекта.

Среди недостатков выделяют большое количество гиперпараметров сети, которые необходимо задать при создании сети: количество слоев, число фильтров, размерность матриц сверток каждого фильтра, шаг сдвига ядра свертки, ФА применяемая к результату свертки. Процедура обучения нейросетевых архитектур обычно подразумевает только оптимизацию весовых коэффициентов нейронов, в то время как нелинейности, как правило, явным образом выбираются заранее, а их возможные параметры обычно рассматриваются как гиперпараметры, которые также настраиваются вручную. При таком подходе выбор конкретной ФА зависит от прикладной задачи. Для повышения эффективности ИНС (точность, скорость обучения) используются адаптивные свойства изменяемых ФА, При этом рассматривается либо модификация конкретных функций, либо выбор из множества заданных, либо поиск конкретной формы при помощи генетических алгоритмов, которые не гарантируют получения оптимального решения за приемлемое время. Кроме того, прослеживается тенденция усложнения внутренней структуры нейрона: но ни один из этих методов для построения адаптивных ФА не рассматривает возможности применения аппарата теории нечетких множеств, сама концепция которого построена на нечеткой природе данных.

В результате, ИНС — популярный и широко распространённый инструмент для работы со сложными техническими и технологическими объектами. Ключевым преимуществом правильно построенной и обученной ИНС является ее операционная эффективность, которая имеет решающее значение для решения задач управления интеллектуального качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

3.1.2 Нечёткие модели вычислений (нечёткие отношения)

Нечеткая логика, разработанная на основе концепции нечетких множеств, предложенной Л. Заде в 1965 году [84], представляет собой важное дополнение к классической логике. Выдающиеся ученые, такие как А. Кофман, А. Мамдани, Р.

Беллман и другие [85,131-135], внесли значительный вклад в разработку и применение теории нечетких систем, расширяя ее возможности и области применения.

Нечеткая логика вдохновлена природой человеческих рассуждений, характерным признаком которых является отсутствие четкости и позволяет формализовать такие приближенные суждения в виде нечетких логических систем. В широком смысле нечеткая логика оперирует нечеткими множествами, представляющими собой совокупность элементов, относительно которых нельзя с полной определенностью делать утверждение о принадлежности того или иного элемента к множеству, вместо этого нечеткое множество позволяет утверждать о мере принадлежности. Нечеткое множество

$$A = \{(x, u_{A(x)})\} \quad (3.23)$$

это множество пар вида $(x, u_{A(x)})$, где $x \in U$, а $u_{A(x)}$ - функция принадлежности (ФП), которая ставит в соответствие каждому элементу x некоторое действительное число из отрезка $[0,1]$. Функция принадлежности позволяет определить степень принадлежности произвольного элемента к нечеткому множеству. Одним из основных понятий нечеткой логики в широком смысле является понятие лингвистической переменной, значениями которой являются фразы из естественного или искусственного языка, то есть значения, описываемые нечеткими множествами. Формально лингвистическая переменная задается набором множеств:

$$\{X, T(X), U, G, M\}, \quad (3.24)$$

где X - имя переменной; $T(X)$ – множество ее значений (терм-множество переменной X), являющихся языковыми выражениями, при этом для каждого значения необходимо задать ФП; U - универсальное множество действительных чисел; G – синтаксическое правило, порождающее новые термы переменной X с использованием союзов «и», «или», «не», «очень», «более или менее»; M - математическое правило, определяющее вид функции принадлежности для каждого значения образованного при помощи правила G .



Рис. 3.11. ФП для значений лингвистической переменной "Виброскорость"

На рис. 3.11 приведен в качестве примера лингвистической переменной приведена величина «Скорость вибрации», которая имеет три значения: низкое, среднее и высокое. Степень принадлежности отличается от вероятности, но при этом также принимает значения в диапазоне от 0 до 1. Например, при $x = 3,1$ мм/с индексы членов по оси y составляют 0,8 (низкий) и 0,3 (средний).

Набор правил приближенных суждений составляет базу нечетких правил в нечеткой логической системе (НЛС).

Обобщенная структура системы приведена на рис. 3.12.



Рис. 3.12. Структура НЛС

Блок фаззификации преобразует четкие величины данных, поступающих на вход системы, в нечеткие, база нечетких правил включает приближенные рассуждения, формализованные в виде условий и следствий, блок решений определяет какие правила активируются поступившими на вход данными, и преобразует нечеткие входные данные в следствия активированных правил,

которые также являются нечеткими, блок дефаззификации превращает нечеткие данные с выхода блока решений в чёткую величину.

НЛС активно используется в задачах классификации. Нечеткая классификация представляет процесс объединения объектов в нечеткое множество, характеристическая функция которого с некоторой степенью соотносит объект с этим множеством. Нечеткое множество является синонимом нечеткого класса. Отличительная черта нечеткой классификации в том, что объект может быть соотнесен к нескольким нечетким классам с разной степенью принадлежности.

К преимуществам использования аппарата теории нечетких множеств в задаче классификации можно отнести [21]:

- Наглядность нечеткой логики и высокий уровень абстракции;
- Нечеткость лучше выражает естественную классификацию;
- Возможность разделять на кластеры и классифицировать пересекающиеся, нечеткие по своей природе данные;
- Принцип размытости границ классов позволяет объединять различные подходы как в интерпретации, так и в обработке данных;
- Нечеткие классификаторы позволяют сократить объем вычислений и увеличить быстродействие, в сравнении с вероятностными классификаторами.

Недостаток создания НЛС заключается в том, что набор правил обычно задается экспертом, при этом построение окончательной модели требует объединения знаний специалистов различных областей и многократного тестирования, и поскольку вид и параметры ФП выбираются субъективно, они могут быть не вполне адекватны реальной действительности. Кроме этого, недостатками НЛС являются отсутствие стандартной методики их создания.

3.1.3 Нейро-нечёткие модели вычислений

В 1994 году немецкий исследователь Д. Баршдорф представил новую концепцию в области технической диагностики [62], основанную на использовании

нейросетевых технологий в сочетании с принципами нечеткой логики. Этот подход заложил основу для активного развития и применения нейро-нечетких моделей вычислений, включающих преимущества нейронных сетей и нечеткой логики для повышения эффективности процессов диагностики и управления.

А) Адаптивная нейро-нечеткая интерференционная модель вычислений (ANFIS)

Адаптивная нейро-нечеткая интерференционная система (ANFIS) [141], которая была предложена Джангом в 1993 году, использует несколько видов нечетких моделей, в частности модель Сугено [139].

Структура модели ANFIS, показана на рисунке 3.13, и имеет два входа и один выход. Каждый из двух входных данных имеет три нечетких члена, связанных с его значением (L, M и H), что приводит к нечеткости TSK из девяти правил следующего вида [143]:

$$\text{Если } X \in S1 \text{ и } Y \in S2, \text{ то } f = c_{10} + c_{11}x_1 + c_{12}x_2,$$

$$\text{Если } X \in S1 \text{ и } Y \in M2, \text{ то } f = c_{20} + c_{21}x_1 + c_{22}x_2,$$

$$\text{Если } X \in S1 \text{ и } Y \in L2, \text{ то } f = c_{30} + c_{31}x_1 + c_{32}x_2,$$

$$\text{Если } X \in M1 \text{ и } Y \in S2, \text{ то } f = c_{40} + c_{41}x_1 + c_{42}x_2,$$

$$\text{Если } X \in M1 \text{ и } Y \in M2, \text{ то } f = c_{50} + c_{51}x_1 + c_{52}x_2,$$

$$\text{Если } X \in M1 \text{ и } Y \in L2, \text{ то } f = c_{60} + c_{61}x_1 + c_{62}x_2,$$

$$\text{Если } X \in L1 \text{ и } Y \in S2, \text{ то } f = c_{70} + c_{71}x_1 + c_{72}x_2,$$

$$\text{Если } X \in L1 \text{ и } Y \in M2, \text{ то } f = c_{80} + c_{81}x_1 + c_{82}x_2,$$

$$\text{Если } X \in L1 \text{ и } Y \in L2, \text{ то } f = c_{90} + c_{91}x_1 + c_{92}x_2.$$

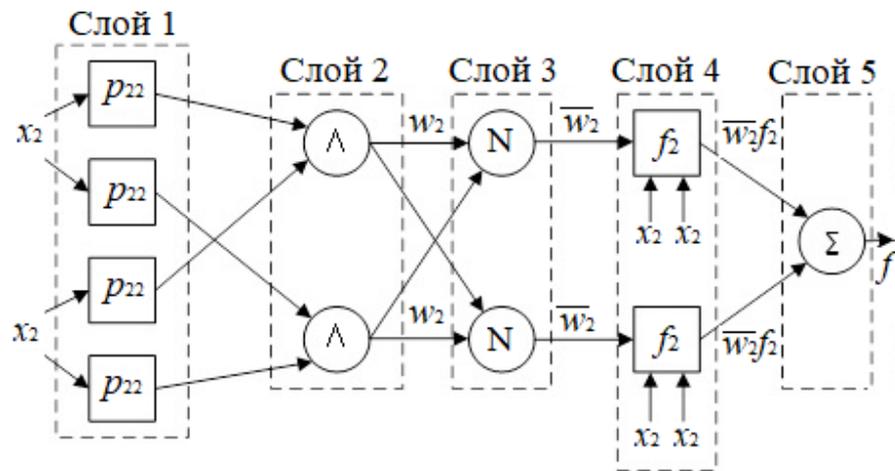


Рис. 3.13. Структура ANFIS

Функция принадлежности, используемая для представления каждого члена входных данных $L1, M1$, представляет собой обобщенную функцию Белла, которая имеет следующий математический вид:

$$\mu(x, \alpha, \beta, \gamma) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - y}{\alpha} \right|^{2\beta}} \quad (3.25)$$

Для этой модели для каждого нечеткого члена (α, β, γ) потребуется восемнадцать параметров, поскольку каждый из входных данных имеет три члена, поэтому общее число функций принадлежности будет 18. Поскольку будет использоваться девять правил, потребуется двадцать семь параметров для постоянных значений на выходах $(c10, c11, \dots)$.

В обучении ANFIS использовалось начальное приближение ФП, основанных на данных, а не сгенерированных случайным образом. Эта практика обычно обеспечивает лучшую сходимость, и потребуется меньше ресурсов для обучения. Однако, чтобы найти значения для коэффициентов c , для решения системы линейных уравнений будет использоваться метод наименьших квадратов, чтобы минимизировать ошибку. Системы состоят из производной ошибки относительно каждого значения коэффициента c , с соответствующей матрицей коэффициентов (34×34) . После нахождения значений c они были зафиксированы, и была проведена еще одна эпоха с помощью данных для точной настройки значений $(\alpha,$

$\beta, y)$ с использованием метода градиентного спуска, а затем еще одна эпоха для поиска новых значений c .

Структура ANFIS предполагает наличие пяти слоев. Первый слой предназначен для определения степени принадлежности каждого из значений лингвистических переменных различным нечетким множествам, участвующим в формировании нечетких правил.

Второй слой выполняет вычисление левых частей нечетких правил вида «Если X принадлежит S1 и Y принадлежит S2», реализуя логическую операцию пересечения между нечеткими множествами. В алгоритме ANFIS выполнение операции пересечения представлено в виде вычисления алгебраического произведения значений функций принадлежности:

$$w_i = \mu_{S1}(x_i) \times \mu_{S2}(x_j),$$

где i, j – номер элемента.

Третий слой отвечает за нормирование значений, полученных после вычисления результатов действия левых частей правил. Нормирование производится следующим способом:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i},$$

где n – количество правил.

Четвёртый слой представляет настраиваемый элемент системы. Нормированные результаты вычисления левых частей правил \bar{w}_i используются для определения результата применения нечетких правил. Результирующее нечеткое множество для каждого правила задается выражением вида:

$$f(x_1, x_2) = c_{10} + c_{11}x_1 + c_{12}x_2$$

Как видно из выражения входные сигналы x_1 и x_2 подаются на четвёртый слой напрямую. Для получения результата действия правила необходимо умножить значение выходной функции правила на соответствующее нормированное значение:

$$w_i f(x_i, x_j) = w_i (c_{10} + c_{11}x_i + c_{12}x_j)$$

Результирующий сигнал выходного пятого слоя вычисляется как сумма результатов действия всех правил:

$$f = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i, x_j)$$

Для настройки используется гибридный двухпроходный алгоритм. На первом этапе определяются параметры четвёртого слоя с использованием метода наименьших квадратов. На втором этапе настройки используется алгоритм обратного распространения ошибки.

Пусть $S_1 = ((c_{10}, c_{11}, c_{12}), \dots, (c_{пр}, c_{пр}, c_{пр}))$ - параметры предпосылок, $S_2 = ((q_{10}, q_{11}, q_{12}), \dots, (q_{пр}, q_{пр}, q_{пр}))$ - параметры заключений, $S = S_1 \cup S_2$.

При фиксированных параметрах из множества S_1 имея K обучающих примеров, можно представить задачу обучения в виде $AX = B$, где X содержит параметры из множества S_2 . Так как число обучающих примеров обычно выше числа примеров в S_2 , то точное решение данной системы уравнений невозможно, но можно воспользоваться методом наименьших квадратов для аппроксимации X^* , которая минимизирует ошибку $\|AX - B\|^2$.

$$X^* = (A^T A)^{-1} A^T B$$

Для вычисления используется итеративная процедура:

$$S_{i+1} = S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_{i+1}^T S_i}{1 + S_i a_{i+1} a_{i+1}^T}$$

$$X_{i+1} = X_i S_{i+1} a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T S_i),$$

где $X_0 = 0$; $S_0 = yI$, y – большое число, I – единичная матрица; a_{i+1}^T – i -ая строка матрицы A ;

$$b_{i+1}^T - i\text{-ый элемент вектора } B; \quad X^* = X_K.$$

Для каждого параметра α_i из S1 обновление осуществляется по правилу:

$$\Delta a_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial a_i},$$

где $E = \sum_{j=1}^K (O_{5,1}(x^{(j)}) - z^{(j)})^2$ – ошибка на обучающей выборке;

$$\eta = \frac{k}{\sqrt{\sum_i \frac{\partial E}{\partial a_i}}};$$

η – скорость обучения,

k – размер шага.

Однако недостатками нейро-нечётких моделей являются чувствительность к количеству входных переменных и ФП; возможность возникновения явления переобучения; ограниченная возможность варьирования типов ФП.

В) Нейро-нечёткий классификатор (ННК)

В задачах классификации состояний технических и технологических объектов остро стоит проблема повышения точности ИНС, которая определяется созданием адаптивной функцией активации искусственного нейрона, использующей НЛС с интервальными нечеткими множествами второго типа. Нечеткое множество определяется ФП, которая характеризует меру принадлежности конкретного объекта к множеству. На сегодняшний день аппарат теории нечетких множеств содержит интервальные нечеткие множества 2-го типа (ИНМ-2), которые являются развитием концепции нечетких множеств и характеризуются неопределенностью конкретного типа ФП. Такие множества описываются двумя ФП – верхней и нижней, при этом под нечеткостью ФП понимается множество всех возможных функций между верхней и нижней ФП.

Нечеткие множества применяются в составе НЛС, которая используется для работы с неопределенностью, и кроме нечетких множеств содержит фазификатор, базу правил и дефазификатор. 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 R , σ – ввод НЛС, A_i – интервальные нечеткие множества 2-го типа, а $\varphi_i = B_i$ – вывод системы, известный в теории нечетких множеств как «следствие», при этом $B_1 = N$, $B_2 = 0$, $B_3 = P$, где P и N – числовые коэффициенты. Интервальные нечеткие множества 2-го типа приведены на рис. 3.14.

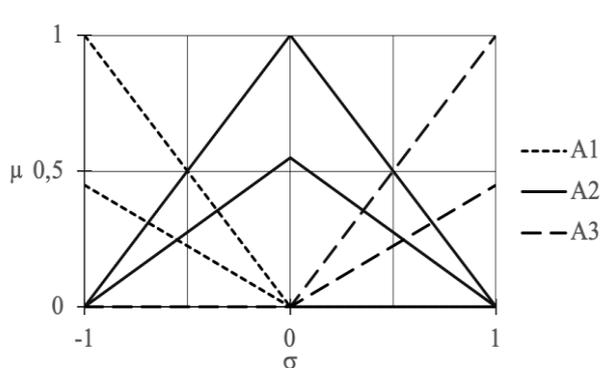


Рис. 3.14. Интервальные нечеткие множества 2-го типа, используемые в НЛС

Например, многослойный нейро-нечеткий классификатор (МННК) можно получить путем внедрения слоя нечетких нейронов в многослойный персептрон, как показано на рис. 3.15.

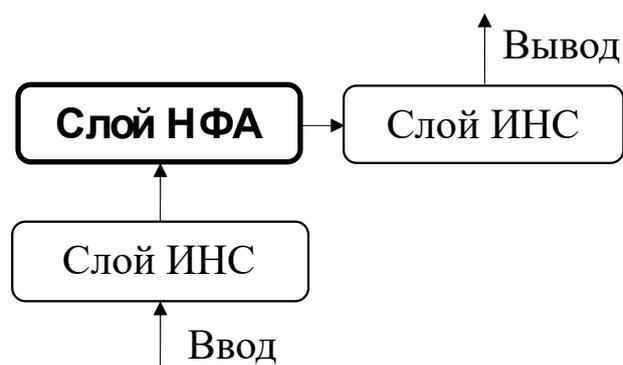


Рис. 3.15. Структура МННК

На рис. 3.16 изображена структура сверточного нейро-нечеткого классификатора (СННК), построенного путем добавления слоя нечетких нейронов в сверточную ИНС. Слой сверточной ИНС выполняет функцию выделения наиболее значимых для классификации признаков.

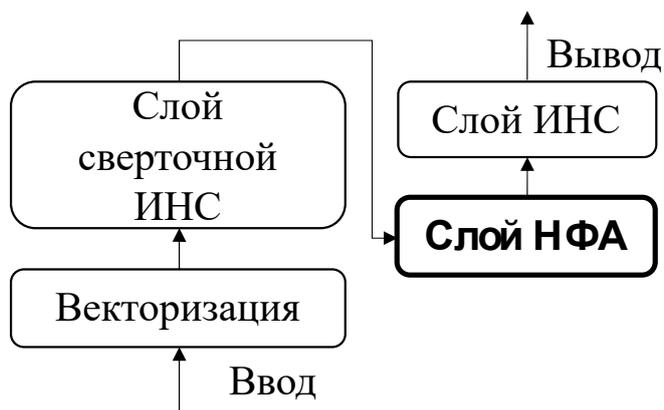


Рис. 3.16. Структура СННК

Применив слой ННРС вместо обыкновенной РНС можно получить рекуррентный нейро-нечеткий классификатор (РННК), как показано на рис. 3.17.

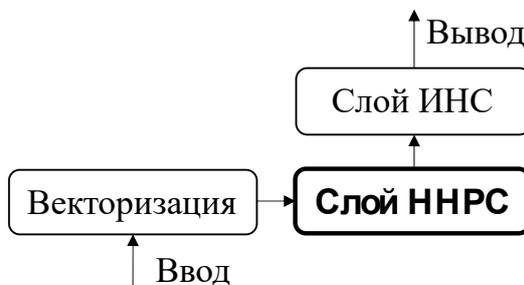


Рис. 3.17. Структура РННК

В сверточном слое операция свертки применяется к входным данным с использованием множества фильтров, за которыми следует функция активации. Для математического описания сверточного слоя ИНС потребуются следующие обозначения:

- Ввод: $a^{[l-1]}$ – вывод предыдущего слоя $[l-1]$ размерностью $(n_H^{[l-1]}, n_W^{[l-1]}, n_C^{[l-1]})$, где $a^{[0]}$ представляет изображение, передаваемое на вход слоя;

- Дополнение $p^{[l]}$ фильтра 1-го слоя
- Шаг $s^{[l]}$ смещения фильтра 1-го слоя
- Количество фильтров $n_C^{[l]}$ 1-го слоя, где размерность каждого ядра свертки

$K^{(n)}$ составляет $(f^{[l]}, f^{[l]}, n_C^{[l]})$

- Смещение n -ой свертки $b_n^{[l]}$ 1-го слоя
- Функция активации $g^{[l]}$ 1-го слоя
- Вывод $a^{[l]}$ 1-го слоя размером $(n_H^{[l]}, n_W^{[l]}, n_C^{[l]})$

Тогда 1-й слой сверточной ИНС определяется выражением:

$$\text{conv}(a^{[l-1]}, K^{(n)})_{x,y} = g^{[l]} \left(\sum_{i=1}^{n_H^{[l-1]}} \sum_{j=1}^{n_W^{[l-1]}} \sum_{k=1}^{n_C^{[l-1]}} K_{i,j,k}^{(n)} a_{x+i-1, y+j-1, k}^{[l-1]} + b_n^{[l]} \right), \quad (3.26)$$

где размерность свертки определяется в виде

$$\dim(\text{conv}(a^{[l-1]}, K^{(N)})) = (n_H^{[l]}, n_W^{[l]}) \quad (3.27)$$

Таким образом, вывод сверточного ИНС слоя определяется выражением:

$$a^{[l]} = g^{[l]}(\text{conv}(a^{[l-1]}, K^{(1)})), g^{[l]}(\text{conv}(a^{[l-1]}, K^{(2)})), \dots, g^{[l]}(\text{conv}(a^{[l-1]}, K^{(n_C^{[l]})})), \quad (3.28)$$

где $n \in [1, 2, \dots, n_C^{[l]}]$, а размерность вывода сверточного слоя ИНС определяется в виде

$$\dim(a^{[l]}) = (n_H^{[l]}, n_W^{[l]}, n_C^{[l]}) \quad (3.29)$$

А параметры ядра свертки определяются, как:

$$n_{H/W}^{[l]} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{n_{H/W}^{[l-1]} + 2p^{[l]} - f^{[l]}}{s^{[l]}} + 1 \right\rfloor, & s > 0 \\ n_{H/W}^{[l-1]} + 2p^{[l]} - f^{[l]}, & s = 0 \end{cases}, \quad (3.30)$$

где $n_C^{[l]}$ определяется количеством фильтров.

В зависимости от типа классификации – бинарная или многоклассовая, в качестве последнего слоя нейро-нечеткого классификатора (ННК) указывается слой ИНС прямого распространения, выдающий либо два, либо несколько сигналов, при этом каждый сигнал представляет собой решение классификатора о принадлежности конкретного экземпляра данных к классу из заданного множества.

Представленные структурные элементы обеспечивают возможность для построения ННК для работы с данными различной физической природы.

Для обучения ННК применим тот же алгоритм обучения, что и для ИНС. В общем случае алгоритм машинного обучения классификатора на множестве обучающей выборки включает в себя несколько этапов:

1. Формирование обучающей выборки
2. Выбор алгоритма классификации
3. Обучение классификатора на обучающей выборке
4. Тестирование классификатора
5. Изменение параметров настройки классификатора

После достижения оптимальной точности классификатора на контрольной выборке, классификатор считается обученным и готовым к работе с новыми данными, не включенными в обучающую выборку.

Основные этапы алгоритма приведены на рис. 3.18. Обучение представленного ННК подразумевает решение оптимизационной задачи по минимизации целевой функции, и оптимизируемыми параметрами, как правило, являются весовые коэффициенты ИНС.

Таким образом, задача обучения заключается в поиске оптимальных параметров, которые дают лучшую аппроксимацию (приближение). Для этого в задаче определяется целевая функция, называемая функцией потерь, которая количественно определяет расстояние между реальными и прогнозируемыми значениями на всем обучающем наборе.



Рис. 3.18. Обобщенная блок-схема алгоритма ННК

Минимизация целевой функции выполняется последовательно, при этом, на каждой итерации выполняется два основных шага:

1. Прямое распространение: данные «распространяются» по сети либо целиком, либо порциями, и для каждой порции данных определяется значение целевой функции, которое отражает суммарное значение всех ошибок, совершенных при аппроксимации отображения u .

2. Обратное распространение: состоит из вычисления частных производных целевой функции по отношению к параметрам нейросетевой модели, а затем применения алгоритма градиентного спуска для обновления параметров ИНС.

Этот процесс повторяется итеративно, каждая итерация является отдельной эпохой обучения и алгоритм обучения ННК можно представить следующим образом:

- Инициализация параметров ИНС.
- Для $i = 1, 2, \dots, N$: (где N - количество эпох)
 - Выполнить прямое распространение:
 - Для $\forall i$, определить прогнозируемое нейросетевой моделью значение \hat{y}_i для примера x_i
 - Определить значение целевой функции $L = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L(\hat{y}_i, y_i)$ где m - размер обучающей выборки. Функция L оценивает расстояния между реальным и прогнозируемым значением в точке x_i .
 - Выполнить обратное распространение:
 - Применить метод градиентного спуска для обновления параметров нейросетевой модели

Использование нейро-нечётких моделей вычислений способствует решению задач классификации и определения состояний технических и технологических объектов [153]. Эти модели лежат в основе интеллектуального подхода к управлению качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических систем. Практические примеры их применения для ряда технических и технологических объектов представлены в п.5.2 «Примеры технических и технологических объектов. Промышленные применения».

3.2 Биоинспирированные модели вычислений

Многие задачи управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов продолжают сводить к задачам глобальной оптимизации. Эти задачи определяются высокой вычислительной сложностью, размером пространства поиска, низким уровнем формализованности, и сложной топологией в допустимом диапазоне.

Для их решения, т.е. нахождения экстремума целевой функции, широко применяются *траекторные и популяционные* алгоритмы поисковой глобальной оптимизации. *Траекторные* алгоритмы (например, авторегрессионные, динамическое программирование) предполагают обновление на каждой итерации решаемой задачи, положения лишь одного из множества всех кандидатов в решении [154, 155]. В алгоритмах, работающих с популяциями, где присутствует множество кандидатов или особей, каждая итерация включает в себя перемещение всех особей популяции, за исключением, возможно, небольшого количества.

Стохастические поисковые алгоритмы оптимизации активно используются для решения общих задач глобальной поисковой оптимизации. Они часто упоминаются как вдохновленные природой [52] («биоинспирированные» модели вычислений), что лучше всего отражает суть этих алгоритмов.

Существует множество примеров эффективных решений сложных задач оптимизации состояний технических и технологических объектов с использованием «биоинспирированных» моделей вычислений. Например, проектирование сложных технических компонентов, разработка новых материалов и контроль состояний динамической системы. Кроме этого, популяционные алгоритмы широко используются в задачах многокритериальной оптимизации.

На сегодняшний день существует много различных видов «биоинспирированных» алгоритмов, но большинство из них не масштабируемы и чувствительны к начальным распределениям.

3.2.1 Эволюционно-генетические модели вычислений

Суть модели эволюционного алгоритма заключается в использовании основных принципов теории биологической эволюции - отбора, мутации и воспроизводства особей. Наиболее развитый класс эволюционных алгоритмов – эволюционно-генетические алгоритмы (ЭГА).

В рамках теории ЭГА [155] предлагается моделировать эволюционные процессы (скрещивания, мутации, естественный отбор, отбор), происходящие в популяциях живых организмов, с целью нахождения оптимальных вариантов многопараметрических функций.

В настоящее время ЭГА— это популярный поисковый адаптивный метод, основанный на эволюционных факторах конструирования популяции, которые позволяют одновременно анализировать некоторое подмножество решений, формируя на каждом шаге квазиоптимальные решения. Процесс генетического поиска по своей сути является методом случайной вариации значений аргументов целевой функции. Данный механизм решения оптимизационных задач, в отличие от существующих механизмов, осуществляет не замену одного сгенерированного решения на другое, а получение новых решений посредством информационного обмена между ними. Полученные решения, в зависимости от соответствующего значения целевой функции, либо отбрасываются, либо замещают собой некоторые из исходных решений. Результатом работы генетического алгоритма является лучшее из полученных за заданное число итераций решений.

Схема базового или классического ЭГА изображена на схеме рис. 3.19.



Рис. 3.19. Общая схема базового ЭГА

Обобщенно базовый ЭГА можно определить следующим образом [93]:

$$\text{ЭГА} = (P^0, K, \lambda, L, Sl, R, f, k) \quad (3.31)$$

где $P^0 = \{x^\gamma\}$ – начальная популяция; x^γ – потенциальное решение задачи, представленное в виде хромосомы; λ – размер популяции; K – биективное отображение множества допустимых решений во множество хромосом, определяющее способ кодирования; L – длина хромосомы; Sl – операторы селекции; R – операторы рекомбинации; $f = f(x)$ – функция приспособленности (целевая функция для эволюционной оптимизации); k – критерий останова.

А. Модифицированные эволюционно-генетические модели вычислений

Предложенная модификация ЭГА (мЭГА) основывается на адаптации параметров под специфику решаемой задачи. Если рассмотреть в качестве генома популяции множество состояний объекта $J = \{1, 2, \dots, j, \dots, M\}$, то любая перестановка элементов данного множества может быть допустимой хромосомой. При раскодировании хромосомы x^γ формирование последовательности S_γ и вычисление функции приспособленности $f(x^\gamma) = C(S_\gamma)$ прекращается при достижении заданного значения функции $\varphi(S_\gamma) = \varphi_0$ [157].

Для гарантии однозначного совпадения между хромосомой и тестовой последовательностью, начинаем декодирование с первых генов хромосомы. Тест, связанный с первым геном, определяет корень дерева тестовой последовательности, разделяя все блоки исследуемой системы на классы $\{B_0^1, B_0^2, \dots, B_0^j, \dots, B_0^H\}$, и создавая в дереве H ветвей, которые включают потенциально неисправные состояния диагностируемого объекта. Проходя последовательно по всем ветвям, состояние, соответствующее следующему гену x_1^γ , добавляется к ветви j только в том случае, если он позволяет выполнить дальнейшее разбиение подмножества B_0^j на классы $\{B_1^1, B_1^2, \dots, B_1^j, \dots, B_1^G\}$. Затем, операция повторяется для всех состояний объекта, соответствующих оставшимся генам $x_2^\gamma, \dots, x_M^\gamma$. Процесс прекращается, при выполнении одного из следующих условий:

1. – в каждом классе содержится ровно по одному блоку
2. $\forall(i, j): |B_j^i| = 1$
3. Рассмотрены все гены x_i^γ хромосомы x^γ .

В качестве операторов R рассматриваются разнообразные методы мутации, главным критерием при подборе которых является генерация допустимой хромосомы.

Выбор операторов R определяет направление генетического поиска и влияет на скорость схождения ЭГА. Схождением называется такое состояние всей

популяции, когда все её хромосомы почти одинаковы и находятся в области некоторого экстремума. В такой ситуации применение операторов R практически не изменяет популяции, а вышедшие из этой области хромосомы отбрасываются операторами селекции, так как чаще имеют худшее значение целевой функции. Сходимость генетического алгоритма может означать, либо нахождение глобально оптимального решения (рис. 3.20а), либо попадание в локальный оптимум (рис. 3.20б) [158].

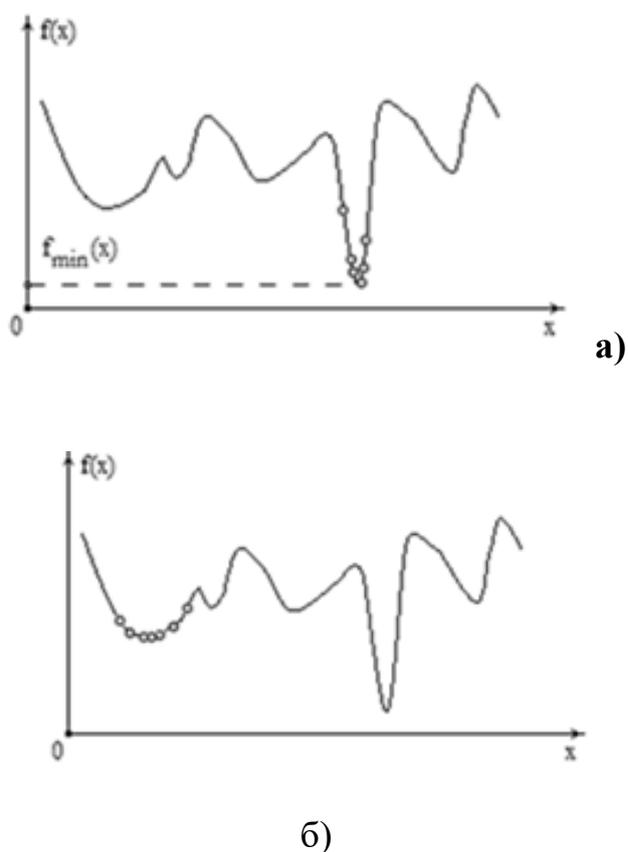


Рис. 3.20. Примеры схождения к глобальному (а) и локальному (б) оптимумам

Для нивелирования «попадания» в область локального оптимума и, чтобы гарантировать продолжение поиска оптимального решения на бесконечном количестве итераций, необходимо обеспечить, чтобы вероятность нахождения оптимального решения в результате выполнения генетических операций была больше нуля. В контексте заданной задачи это условие может быть выражено в виде:

$$P(x^{onm} \rightarrow S_{onm}) \neq 0 \quad (3.31)$$

1. x^{opt} — хромосома, соответствующая оптимальному решению;
2. S_{opt} — оптимальная стратегия;
3. P — вероятность появления x^{opt} после применения генетических операторов.

Это условие является необходимым и достаточным, и таким образом, чтобы гарантировать возможность выхода из локального оптимума, необходимо обеспечить присутствие в популяции хотя бы одной приемлемой хромосомы [106].

$$\forall i: P(x^i \in X_{don}) \neq 0 \quad (3.32)$$

- x^i — хромосома;
- X — множество допустимых состояний;
- P — вероятность появления состояния в результате применения генетических операторов.

Данное условие является достаточным, и оно может быть использовано для анализа выбранного набора операторов на всём пространстве поиска и позволяет сформулировать требования к операторам R :

1. Выполнение любого оператора $R_i \in R$ на множестве допустимых хромосом приводит к получению допустимых хромосом-потомков;
2. Набор операторов позволяет выполнять поиск во всём пространстве допустимых решений;
3. Предусмотрены средства выхода из локальных оптимумов.

К операторам R относятся различные операторы кроссинговера и операторы мутации. Первый тип операторов реализует информационный обмен между несколькими хромосомами, второй тип — реализует обмен между участками одной хромосомы. При применении операторов R создаются новые хромосомы, отличающиеся от родительских хромосом и друг от друга. Различают следующие операторы:

- операторы кроссинговера:
 - упорядоченный;
 - упорядоченный фрактальный;

- частично-соответствующий;
- циклический;
- жадный;
- операторы мутации с различным числом и положением точек разрыва.

Предлагается в качестве набора операторов R использовать одноточечный упорядоченный оператор кроссинговера со случайной точкой разрыва в паре с жадным оператором кроссинговера (рис. 3.21).

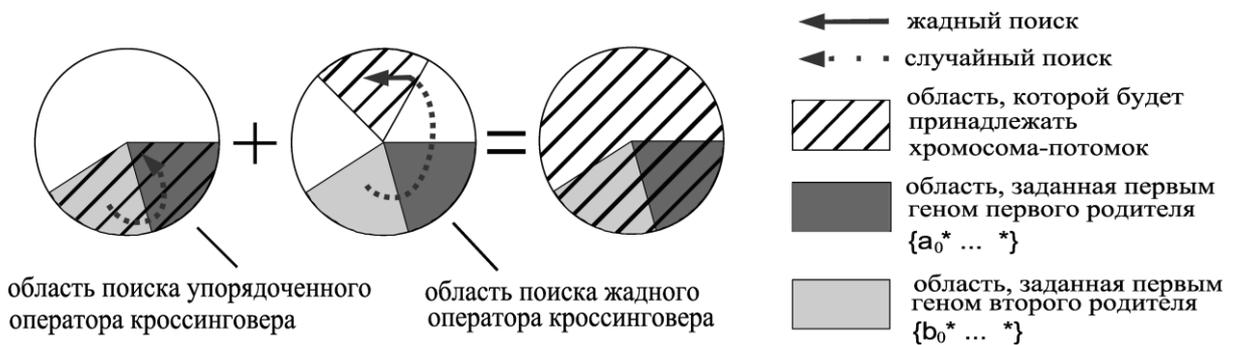


Рис. 3.21. Область поиска предложенного набора операторов R

Сочетание выбранных операторов кроссинговера обеспечивает необходимые условия для выхода из локальных оптимальных решений.

Жадный кроссинговер (ЖК) увеличивает скорость сходимости генетического алгоритма с помощью управляемого поиска и возвращает в пространство поиска потерянные в результате селекции области $(a_i^{**} \dots^*)$.

Чтобы генетический алгоритм работал эффективно, он должен поддерживать постоянный размер популяции. Для этого используется свойство элитарности (элитной селекции), которая отвечает за механизмы принятия решений и стратегии формирования новой популяции.

Использование элитарности позволяет сохранить лучшее найденное решение в популяции до тех пор, пока не будет обнаружено оптимальное решение.

Учитывая, что задача нахождения локального оптимального решения при выборе оператора R уже решена, предлагается применять метод элитарного отбора как оператор выбора, основываясь на сравнении значений целевой функции. При данном методе, если размер родительской популяции составляет M , то новое

поколение формируется из M хромосом потомства в сочетании с их родительским набором.

Для ускорения выхода из локальных оптимумов предлагается использовать **адаптивную поисковую стратегию**, включающую обнаружение локальных оптимумов и расширение области поиска для выхода из локального оптимума.

Для обнаружения локального оптимума на рис. 3.22 будем контролировать среднее и минимальное значения целевой функции в популяции. Если в течение некоторого числа итераций U они остаются неизменными, то можно предполагать, что произошло схождение ЭГА.

Положение глобального оптимума заранее неизвестно, поэтому всегда будем считать такое состояние алгоритма преждевременным схождением — локальным оптимумом. Пусть $i \in [0, \infty)$ — номера итераций алгоритма, а $\{f_i\}$ — упорядоченная последовательность минимальных значений целевой функции $f(x)$ в популяции на данных итерациях. Согласно **принципу элитизма** имеем: $\forall i: f_i \leq f_{i+1} \leq f_{экстр}$, поэтому последовательность $\{f_i\}$ является сходящейся. Тогда последовательность $\{\Delta f_i = f_{i+1} - f_i\}$ также является сходящейся. Сходимость алгоритма достигается на итерации j при получении $\Delta f_j = 0$, тогда на основе теоремы Коши можем считать, что $|f_j - f_{экстр}| < \Delta f_{j-1}$ и произошло попадание в оптимум с точностью Δf_{j-1} .

При обнаружении оптимума расширять область поиска будем постепенно, в несколько этапов, в зависимости от длительности пребывания ЭГА в состоянии сходимости:

1. В обычном режиме (если нет подозрения на попадание в локальный оптимум) — к одной половине популяции применяется упорядоченный оператор кроссинговера, к другой жадный;
2. Если минимальное значение целевой функции не менялось в течение U итераций — к первой четверти популяции применяется упорядоченный

- оператор кроссинговера, ко второй — жадный, к оставшимся хромосомам — оба оператора одновременно;
3. Если минимальное значение целевой функции не менялось в течение U итераций — к одной половине популяции применяется упорядоченный оператор кроссинговера, к другой жадный; в обоих случаях вторая родительская хромосома берётся не из популяции, а генерируется случайно;
 4. Если минимальное значение и среднее значения целевой функции не менялись в течение U итераций, то используем оператор «геноцида» — запоминаем лучшее решение, остальную популяцию генерируем случайным образом заново; далее производим поиск в режиме 1.

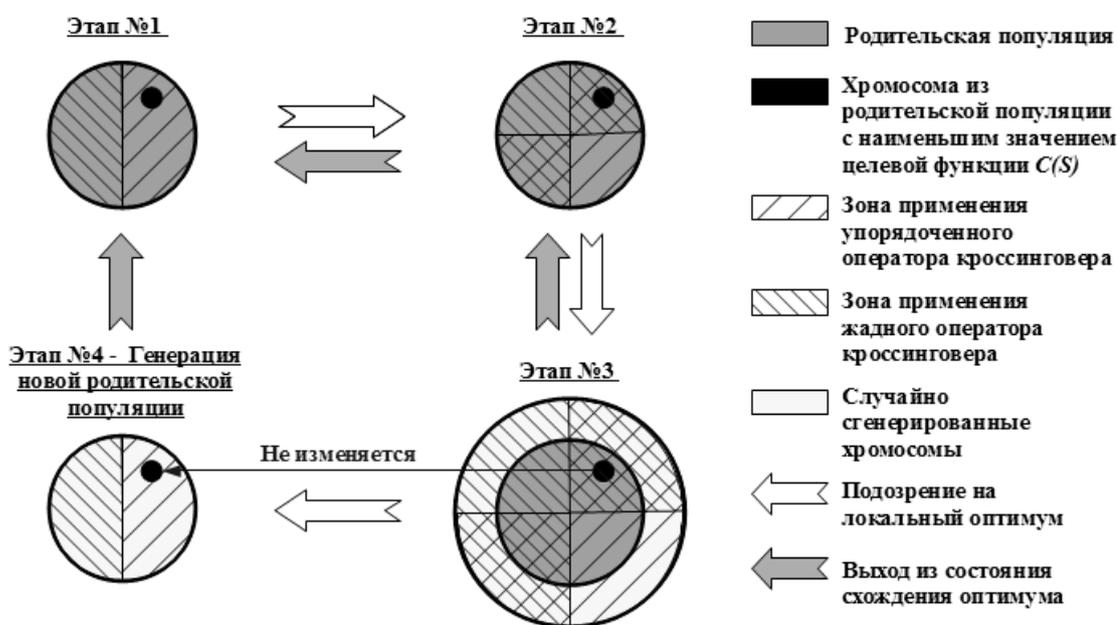


Рис. 3.22. Схема адаптивной поисковой стратегии

Предложенная поисковая стратегия основана на принципе *элитизма*, позволяет ускорить выход из локальных оптимумов и обеспечивает более быстрое схождение по сравнению с классическими ЭГА, использующими кроссинговер и мутацию, а тогда график сходимости разработанного мЭГА будет выглядеть как показано на рис. 3.23.

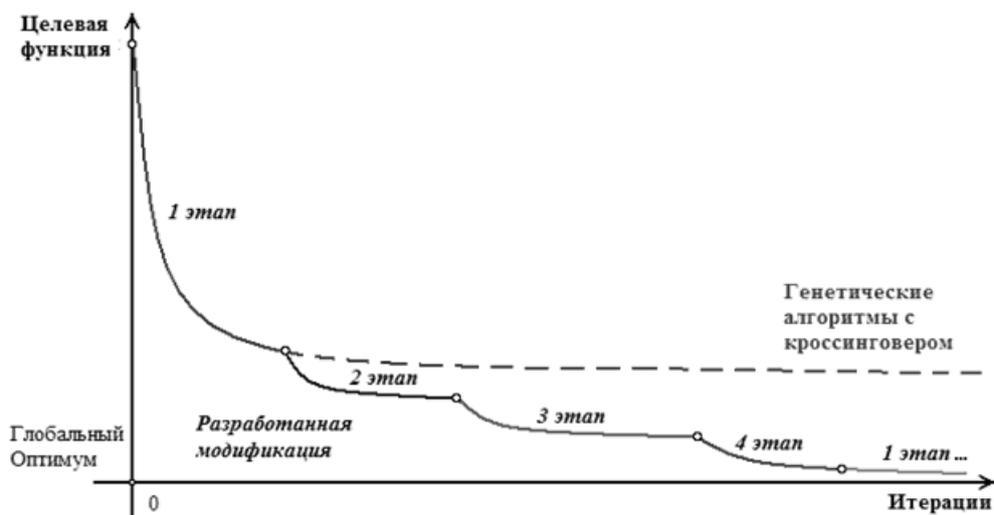


Рис. 3.23. Сравнение графика сходимости мЭГА и базового ЭГА без адаптивной поисковой стратегии

А алгоритм мЭГА может быть представлен в следующем виде (рис 3.18).

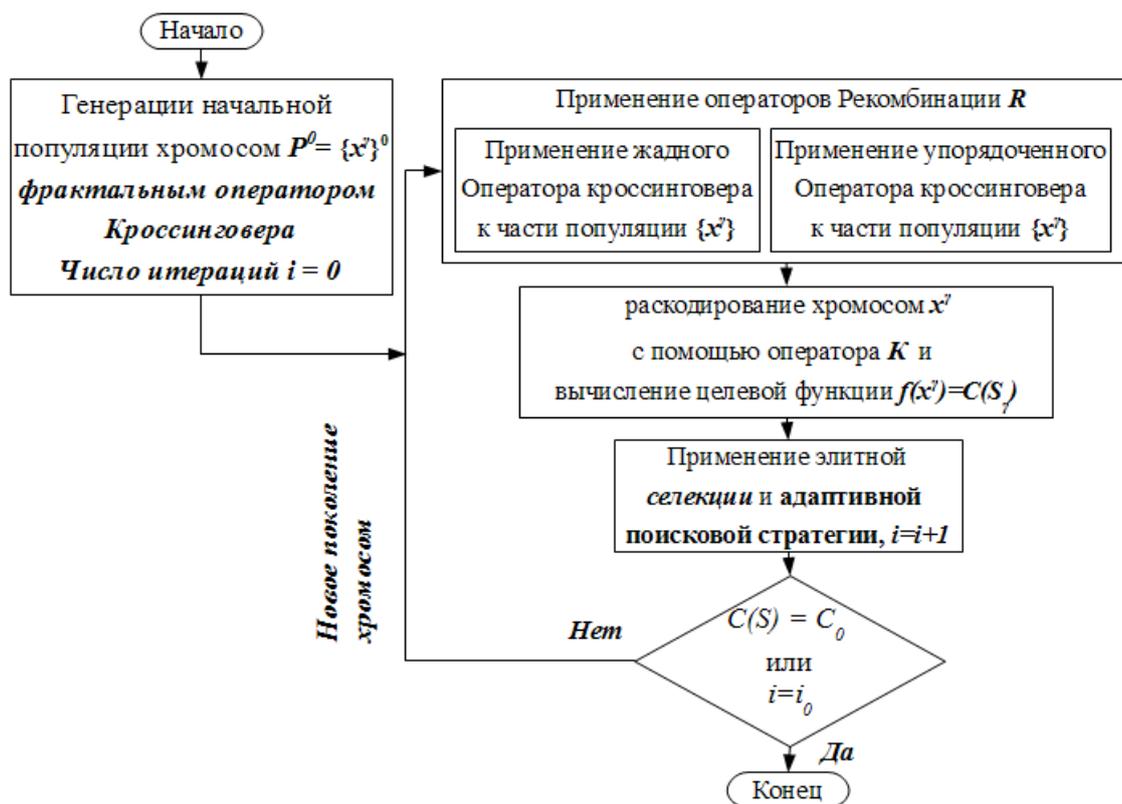


Рис. 3.24. Схема мЭГА

Эта модификация отличается от базового ЭГА в следующем:

1. Используется уникальный метод кодирования решений и конструкция функции приспособленности.

2. Алгоритм способен работать с решениями различной длины.
3. Вместо традиционного оператора мутации используется комбинация особых операторов кроссинговера.
4. Для выхода из локальных оптимумов вводится адаптивная стратегия поиска, ускоряющая процесс сходимости. Исходный размер популяции хромосомом автоматически регулируется исходя из объема выполненных исследований.

Результаты данного поиска оказывают влияние на выбор хромосомы для применения к оператору R, так как алгоритм параллельно обрабатывает несколько альтернативных решений и основывается на большинстве прогнозов.

Выбранный метод кодирования, использование операторов случайного поиска и стратегия адаптивного поиска могут привести к резкому изменению на другое подмножества решений, что позволяет избежать локального оптимума. Использование оператора комбинированного поиска сокращает среднее время интеграции алгоритма и позволяет выполнять поиск в условиях изоляции глобального оптимума. Алгоритм завершается, когда функция достигает требуемого значения или после определенного количества повторений.

Блоки, связанные с использованием жадного и упорядоченного кроссинговера, включают в себя операции, независимые от данных, что определяет возможность применения параллельных вычислений в процессе реализации алгоритма.

В. Параллельные модифицированные эволюционно-генетические модели вычислений

Параллельные генетические алгоритмы (ПГА) [71, 72] становятся все более популярными по мере увеличения сложности и объема данных при управлении качеством и экобезопасностью состояний объектов. Поскольку генетические алгоритмы наиболее успешно применяются для решения сложных вычислительных задач, важно использовать параллельные методы для обеспечения оперативного управления качеством и экобезопасностью состояний технических и

технологических объектов. Генетические алгоритмы имеют возможность параллельной реализации, при этом скорость нахождения решения является наиболее распространенной причиной использования ПГА. Вычисления функций при нахождении решений могут выполняться одновременно, если их можно распределить между несколькими вычислительными процессорами. Возможности генетических алгоритмов расширяются за счет распределенных вычислений.

В модифицированной схеме мЭГА возможна реализация применения каждого оператора кроссинговера к своему подмножеству популяции хромосом, что обеспечивает возможность параллельного выполнения операторов в разных вычислительных потоках [93] (рис. 3.25).

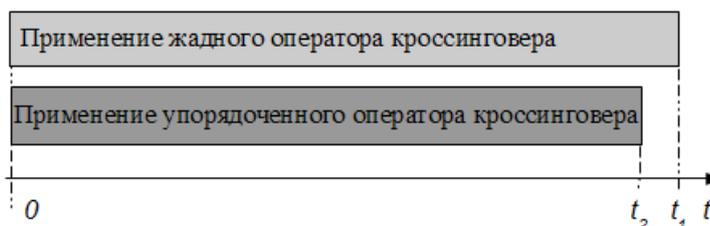


Рис. 3.25. Сравнение операторов кроссинговера

Алгоритм применения оператора кроссинговера к подмножеству хромосом включает следующие шаги:

1. Отбор двух хромосом из подмножества, к которым оператор кроссинговера еще не применялся.
2. Применение оператора кроссинговера к отобранным хромосомам, в результате чего формируются два новых решения.
3. Включение в набор потомков как новых, так и исходных родительских решений.

Если образовалась родительская пара хромосом, то оператор ЖК можно применять к этой паре параллельно. Увеличение эффективности будет в $N/2$ раза выше, чем при непрерывной работе алгоритма, где N — размер популяции родительских хромосом.

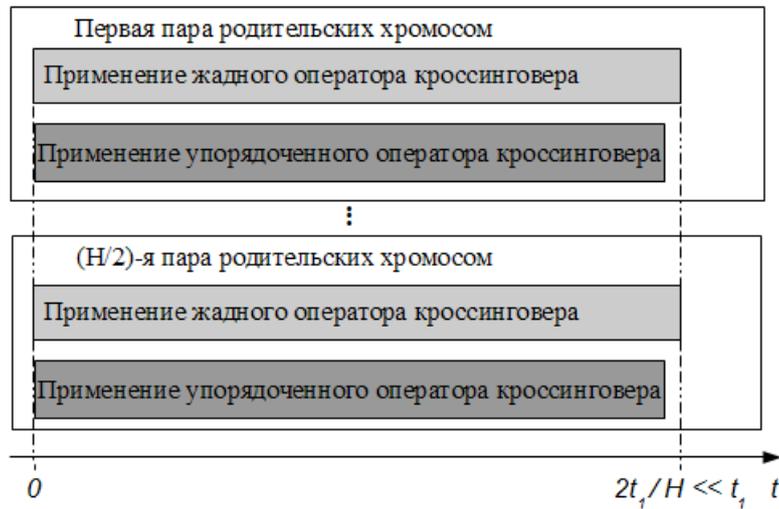


Рис. 3.26. Параллельное применение жадного и упорядоченного кроссинговера к парам родительских хромосом

Каждая итерация мЭГА включает в себя создание хромосом-потомков и подсчёта для них целевой функции, что может быть реализовано в виде следующего процесса (рис. 3.27) [93].

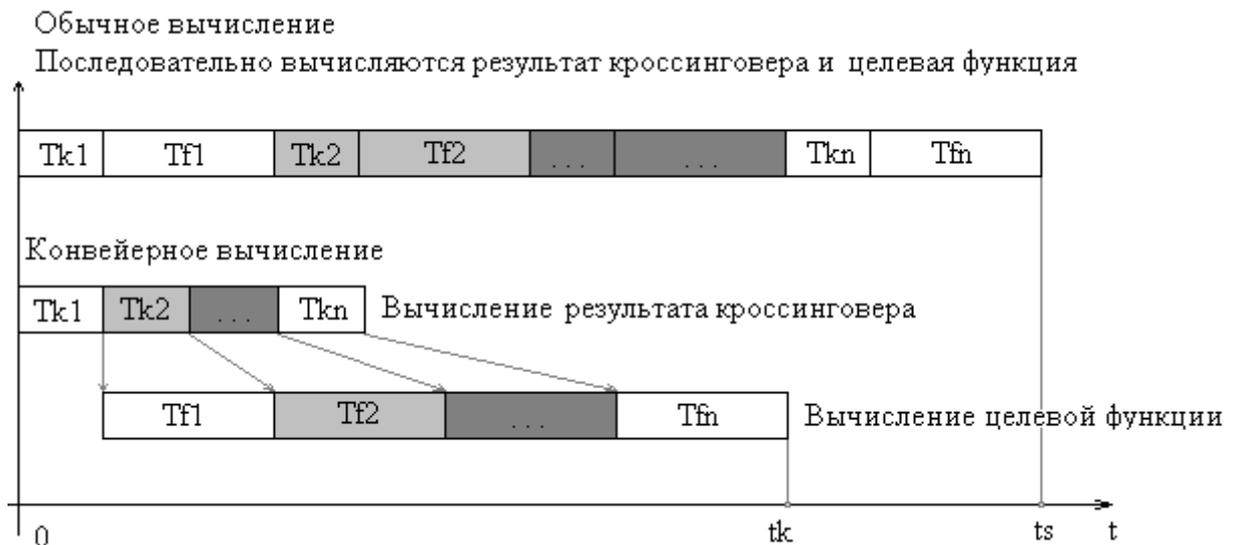


Рис. 3.27. Использование мЭГА с параллельными вычислениями, где T_{ki} – время выполнения оператора кроссинговера на i -й паре родительских хромосом; T_{fi} – время вычисления целевой функции хромосомы-потомка

Поскольку ПГА имеет широкий спектр применений и популярен среди исследователей, генетические алгоритмы наиболее успешно применяются к вычислительно-трудоемким задачам, поэтому важно использовать параллельные модели вычислений для повышения скорости и эффективности вычислений, что

продемонстрировано на примере мЭГА. Благодаря постоянно растущей вычислительной мощности можно решить большое количество задач. Использование параллелизма в реализациях мЭГА, может повысить эффективность и избежать или смягчить последствия многих недостатков, присущих обычному ЭГА, таких как вырождение популяции и преждевременная сходимость.

Параллельные модели вычислений широко используются для обучения нейронных сетей, особенно рекуррентных, в области робототехники и мехатроники, например, для оптимизации траектории захватных устройств при перемещении из одной точки в другую, что показано в главе 5 «Практическая реализация интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов».

3.2.2 Параллельно – популяционные модели вычислений

Популяционные алгоритмы оптимизации характеризуются тем, что в большинстве случаев для них имеется определенная аналогия в обществе, живой или неживой природе. Так, известны такие популяционные алгоритмы, как рой муравьёв, рой медоносных пчел, светлячков, гравитационного поиска и др. В сравнении с классическими подходами, популяционные алгоритмы поисковой оптимизации демонстрируют значительные преимущества, особенно при решении сложных задач большой размерности, мультимодальных задач и задач, которые трудно формализовать. При таких условиях популяционные алгоритмы обеспечивают высокую вероятность нахождения глобального экстремума оптимизационной функции.

К недостаткам популяционных алгоритмов следует отнести сильную зависимость их эффективности от свободных параметров, число которых в большинстве алгоритмов достаточно велико.

Алгоритм работы классического популяционного алгоритма [72] включает следующие ключевые этапы:

Шаг 1. Инициализация популяции.

На начальном этапе в пределах заданной области поиска формируется начальный набор приближений к целевому решению, что эквивалентно созданию исходной популяции агентов.

Шаг 2. Применение эволюционных операторов (миграция агентов).

Используя определенные миграционные операторы, происходит перемещение агентов в пространстве поиска с целью наилучшего приближения к экстремуму заданной функции.

Шаг 3. Завершение процесса поиска.

Вычислительный процесс прекращается при достижении критериев завершения итераций. В качестве результативного приближения к решению задачи выбирается оптимальное из всех обнаруженных положений агентов популяции. При отсутствии выполнения условий завершения, процедура возвращается ко второму шагу.

Из-за модульной структуры популяционных алгоритмов в любой алгоритм можно внести различные изменения, например, изменяя и комбинируя правила запуска популяции, операторы перемещения и условия завершения поиска, в качестве которого используется условие достижения заданного числа повторений или наступления режима стагнации алгоритма, в этом случае оптимизационная функция не меняется для конкретных поколений, на протяжении нескольких итераций и необходимо использовать другие условия, например остановку оператора.

Одним из основных понятий популяционных алгоритмов является понятие фитнес-функции (ФФ) [161]. С помощью этой функции оценивают «качество» агентов популяции. В общем смысле в процессе миграции агенты движутся так, чтобы приблизиться к глобальному экстремуму ФФ.

В общем случае в качестве ФФ используется некоторое стохастическое, линейное или нелинейное преобразование оптимизационной функции.

Первые поколения популяционного алгоритма преимущественно исследуют область поиска с целью найти новых кандидатов на решение задачи.

Промежуточные поколения совмещают исследование и эксплуатацию уже найденных решений, а агенты последних поколений алгоритма заняты уточнением найденных ранее решений.

Популяционные алгоритмы являются стохастическими, их эффективность сильно зависит от начального приближения, заданного при инициализации популяции. Поэтому для оценки эффективности данных алгоритмов используют многократные прогоны алгоритма, исходя из разных начальных приближений (метод мультистарта).

Популяционные алгоритмы классифицируются по следующим типам: природные аналоги (муравьиная оптимизация, рой частиц, светлячков, сорняковый алгоритм, кукушкин поиск, поиск косяком рыб и многие другие); степень гибридизации (простые и композиционные); фиксации памяти (с запоминанием предыдущих итераций и без неё); класс итераций (с простыми и составными итерациями).

Популяционные алгоритмы с параллельными вычислениями [161] широко применяются для повышения их эффективности. Существует множество различных параллельно–популяционных моделей вычислений (ППМВ), и наиболее распространенными из них являются следующие [72]:

1. Глобальная модель параллелизма

Параллельные алгоритмы, построенные на основе данной модели, представляют собой параллельные версии соответствующих последовательных алгоритмов. Они используют параллелизм по данным и организуют параллельные вычисления в соответствии с концепцией главный-подчиненный (master-slave).

Главный процесс выполняется на host-процессоре параллельной вычислительной системы и реализует основной популяционный алгоритм. Каждый из рабочих процессов одновременно выполняется на отдельном процессоре и проводит вычисления значений ФФ. После каждой итерации подчиненный процесс передает значения главному процессу, который, основываясь на этих данных, вычисляет новые значения агентов и отправляет их подчиненным процессам для дальнейших вычислений. Параллельные популяционные алгоритмы,

использующие модель глобального параллелизма, имеют преимущество в доступе и использовании общей информации о популяции. Это обеспечивает более эффективное и быстрое принятие решений на основе данных о всей популяции. Однако, следует отметить, что такие алгоритмы могут столкнуться с высокими затратами на координацию и обмен данными между параллельными процессами. Это может привести к увеличению времени выполнения и ухудшению масштабируемости алгоритма при работе с большими объемами данных.

2. Островная модель параллелизма

Алгоритмы параллелизма, основанные на островных моделях, также иногда называют алгоритмами миграции. Рекомендации по выбору между глобальными и островными моделями параллелизма указывают на предпочтение островных моделей в ситуациях, когда информационно-коммуникационная сеть характеризуется ограниченной пропускной способностью и когда требуется снизить вычислительную сложность. Островные модели особенно эффективны для работы с большими популяциями.

3. Диффузная модель параллелизма

Алгоритмы, основанные на диффузной модели параллелизма, представляют собой особый вид алгоритмов, работающих по принципу островной модели. В таких алгоритмах каждая субпопуляция состоит из одного агента, что подразумевает, что количество островов равно количеству агентов и, следовательно, числу процессоров в вычислительной системе. Коммуникационные затраты в диффузной модели зависят от выбранной топологии взаимодействия агентов, и эти затраты увеличиваются с ростом связности соответствующего графа. Алгоритмы данного класса демонстрируют высокую производительность в условиях низкой связности графа и/или высокой вычислительной сложности целевой функции.

Кроме диффузной модели, в области параллелизма существуют и другие модели, а именно:

- Модель некоммутирующей мультипопуляции,
- Пространственно вложенная модель,

- Модель расщепления,
- Модель коэволюции,
- Комбинированные модели.

Применение ППМВ для решения оптимизационных задач позволяет не только обеспечить ускорение поиска оптимальных решений, а также улучшить адаптивность алгоритмов. Пример применения ППМВ приведён в главе 5 «Практическая реализация интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов» для задачи оптимизации траектории перемещения исполнительных устройств робототехнического сварочного комплекса.

Таким образом, среди многообразия оптимизационных алгоритмов, в том числе популяционных, вероятно, можно найти по крайней мере один алгоритм, способный обеспечить по меньшей мере удовлетворительные результаты. Однако не существует универсального алгоритма, гарантирующего высокую эффективность при решении всех возможных оптимизационных задач.

3.3 Прогностические модели вычислений

Управление качеством и экобезопасности состояний технических или технологических объектов неразрывно связано с задачей установления прогноза будущих состояний данных объектов, и значительно возрастает в контексте развития средств автоматизации и увеличения сложности производственных процессов.

Рассматриваются модифицированные авторегрессионные (АР) модели вычислений [163], позволяющие установить как текущее состояние объекта, так и его прогноз, а также ансамблевые технологии машинного обучения, являющимися эффективной альтернативой использованию единственного метода прогнозирования.

3.3.1 Модифицированные авторегрессионные модели вычислений

Под авторегрессией традиционно понимается оценка значений временного ряда по прошлым значениям этого же ряда. Математическими моделями (ММ) динамических систем описывается широкий класс различных технических и технологических объектов для цели управления и прогнозирования их состояний. Для её решения широко используются авторегрессионные методы, берущие своё начало от работ Н. Винера и А.Н. Колмогорова. Упрощенное, но строгое изложение теории линейного предсказания Винера-Колмогорова, была в последствии дана в работе Боде и Шеннона [46]. Как следует из этих и большого числа последующих работ, линейная теория принципиально может устанавливать прогноз на число шагов соответствующих радиусу корреляции прогнозируемого процесса. Результаты этих исследований справедливы для линейных ММ источников прогнозируемых сигналов. Представляют интерес любые попытки нахождения, пусть не самых широких, но имеющих практическое применение класса моделей, допускающих получение регрессионных ММ.

Модель, в которой расчетные значения уровней ряда определяются как линейная функция от предыдущих наблюдений, называют авторегрессионной. Авторегрессионные модели вычислений (АР-модели) широко используются для описания процессов описания состояний объектов. Характерной особенностью стационарных временных рядов является то, что их вероятностные свойства не изменяются во времени, то есть, функции распределения данных рядов не меняются при сдвиге времени.

При моделировании нестационарных по своей природе процессов, авторегрессионная функция объединяется с другими методами анализа динамики: скользящей средней, трендом, сезонной волной. Объединение разных моделей в единое целое существенно расширяет сферу их использования.

В настоящей работе исследуется возможность перехода от класса нелинейных уравнений невысокого (3-го порядка) в форме Коши (уравнения Лоренца, Рёсслера, “хищник-жертва” и др.) к регрессионным моделям (уже

нелинейным) и использования их для целей прогнозирования. Главное преимущество нахождения прогноза с помощью АР-модели, заключается в том, что в качестве источника данных достаточно одного экспериментального временного ряда, а не трёх, как этого требуют исходные ММ.

В настоящее время используется множество АР-моделей для прогнозирования различных процессов, но они позволяют прогнозировать на число шагов, ограниченное радиусом корреляции. Хотя несомненное их достоинство состоит в том, что они позволяют работать с одной реализацией процесса с объекта, состояние которого характеризуется набором из n переменных. При известной ММ объекта из n дифференциальных уравнений (ДУ) 1-го порядка в форме Коши, представляет интерес получить одно регрессионное уравнение, возможно нелинейное, которое позволяло бы устанавливать прогноз на большее число шагов, чем модель источника для реализации того же процесса. Цель состоит в том, что при прогнозировании с использованием такого уравнения не требуется знание ДУ и определения его решения для всех компонент, а требуется только знание n отсчетов этого процесса. Количество отсчётов n , которые должны быть известны для установления прогноза, зависит исключительно от числа компонент вектора состояния ММ, состоящей из системы ДУ 1-го порядка в форме Коши. Данное утверждение имеет большой практический смысл, суть которого заключается в следующем [123]:

- абсолютное большинство процессов используемых на практике, представлены в виде последовательности отсчётов (временного ряда) для какой-либо одной из компонент вектора состояний, поэтому применение для установления прогноза в данной ситуации, не представляется возможным, а использование АР-модели вполне приемлемо;
- при установлении прогноза, требуется знание значений абсолютно всех компонент вектора состояний в один момент времени, что не всегда возможно и требует значительных затрат (дополнительные измерительные приборы; их синхронизация и т.д.).

Как было упомянуто выше, задачи предсказания и идентификации тесно взаимосвязаны. Это объясняется тем, что обычно идентификация проводится в целях облегчения предсказания поведения идентифицируемой системы в будущем, поэтому представляет интерес, вышеизложенную задачу получения АР-модели и задачу идентификации, свести к общей цели, а именно – цели установления прогноза.

Наибольшее распространение, в настоящее время, в различных областях науки и техники получили ММ объектов из 3-х ДУ первого порядка (в форме Коши), общего вида (3.33). К их числу относятся такие известные модели как аттрактор Лоренца ($b_{11} = -b_{12} = -a$, $b_{21} = b$, $b_{22} = -1$, $b_{33} = -c$, $c_{22} = -1$, $c_{31} = 1$, при всех остальных тождественно равных нулю), аттрактор 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), а также уравнения “хищник-жертва” и др. [98].

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \cdot y \\ x \cdot z \\ y \cdot z \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

В настоящее время, одним из наиболее широко используемых методов решения систем ДУ является метод Рунге-Кутты. Для установления прогноза с помощью данного метода, необходимо знать:

Вектор начальных значений.

Начало и конец отрезка $[t_0, t_1]$ на котором находится значение.

Количество точек на интервале $[t_0, t_1]$, по которым аппроксимируется решение.

Значения параметров, входящих в состав системы ДУ.

На практике, не всегда представляется возможным получение всех необходимых входных данных для решения ДУ, поэтому стоит подробнее остановиться на том, какие данные часто встречаются на практике.

Главное преимущество «сведения» системы к АР-модели, заключается в том, что получение прогноза при помощи АР-модели может широко использоваться на практике, т.к. не требуется знания значений отсчётов для всех параметров состояния объекта, а необходимо значения отсчётов для одной из компонент [99].

В общем виде, «сведение» системы ДУ (1) к АР-уравнению - невыполнимо, т.к. из данной системы невозможно получить уравнение, которое имело бы в своём составе лишь одну переменную ($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$). Поэтому, в ходе исследований рассматривались частные случаи, и были сделаны следующие выводы:

Для ММ в форме (3.33) при произвольных ненулевых коэффициентах этого уравнения получение АР-модели невозможно.

Для того чтобы из уравнений (3.33) в форме Коши получить АР-модель относительно какой-либо компоненты, необходимо, чтобы некоторые из коэффициентов были равны нулю. Какие из коэффициентов равны нулю, выбирается исходя из условия, что в правой части уравнения системы (3.33) не должно содержаться более двух переменных (в общем случае их три), причём одна из них такая же, как и в левой части. Кроме того, АР-модель будет относительно той компоненты, которая стоит в левой части уравнения.

Число АР-моделей, которые могут быть получены, ограничено числом переменных (компонент вектора состояний), для системы (3.33) их максимальное количество равно трём.

Располагая соответствующей АР-моделью для одной из компонент уравнений (3.33), можно найти уравнение связи этой компоненты с оставшимися компонентами.

В ходе исследования было установлено, что для таких классов моделей, как "аттрактор Э. Лоренца" и "аттрактор О. Росслера" такое сведение имеет место. При всех тождественно равных нулю коэффициентах, за исключением $b_{11} = -b_{12} = -a$, $b_{21} = b$, $b_{22} = -1$, $b_{33} = -c$, $c_{22} = -1$, $c_{31} = 1$, уравнение (3.33) переходит в уравнения "аттрактора Э.Лоренца", а при коэффициентах $a_3 = b$, $b_{12} = b_{13} = -1$, $b_{21} = 1$, $b_{22} = a$, $b_{33} = -c$, $c_{32} = 1$, в уравнения "аттрактора О.Росслера".

Далее для примера приводится искомое нелинейное регрессионное уравнение для ДУ "аттрактора Э.Лоренца", а на рисунке 3.23 результаты сравнения для графика прогноза полученных АР—моделей (2) по трём выборкам (пунктир) и "точного" поведения соответствующих компонент, (сплошная линия). Для возможности сравнения реализаций на рисунке 3.28 представлен график среднеквадратичной погрешности расхождения графиков, полученных с ДУ и вычисленных на основе АР—модели по уравнению (3.34).

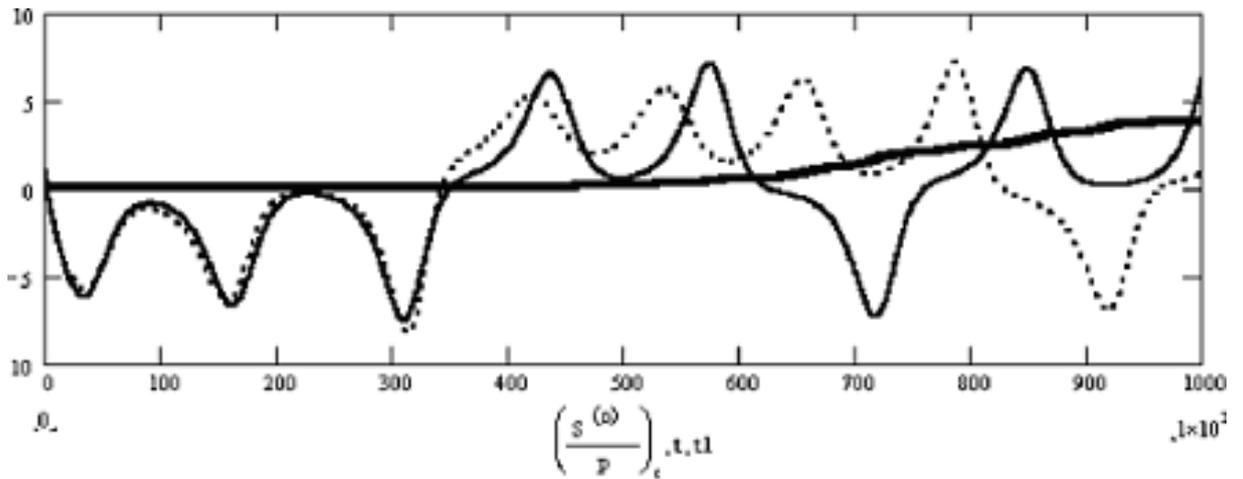


Рис. 3.28. График среднеквадратичной погрешности для ДУ "аттрактора Э.Лоренца"

$$\begin{aligned}
 x(t) = & x(t-p) \cdot \left[2 + \frac{x(t-2p)}{x(t-3p)} - p(a+1+c) \right] + x(t-2p) \cdot \left[(ap-2-p) \frac{x(t-2p)}{x(t-3p)} + \right. \\
 & \left. + p(1+a+2c-acp-cp) - p^2(a+1+c) - 1 \right] + x(t-3p) \cdot \left[x(t-2p) \frac{1-ap+ap^2}{x(t-3p)} - \right. \\
 & \left. - p(a+c-acp-cp) + p^2 x^2(t-3p) + ap^3 \cdot (bc-c-x^2(t-3p)) \right] \quad (3.34)
 \end{aligned}$$

На рис. 3.28 результаты сравнения для графика ДУ "аттрактора О.Росслера" и регрессионного уравнения для компоненты $z(t)$. Особенностью графика для компоненты $z(t)$ в аттракторе Росслера, в отличие от многих ДУ, в том числе и аттрактора Лоренца, состоит в её импульсном характере. Ясно, что линейные регрессионные АР-модели в этом случае не годятся для получения

удовлетворительного прогноза. Нелинейная же регрессионная модель для $z(t)$ позволяет получить удовлетворительный прогноз, по крайней мере, местоположение пиков. Для возможности сравнения реализаций, полученных с ДУ и АР-моделями, на рисунке 3.29 представлен график среднеквадратичной погрешности.

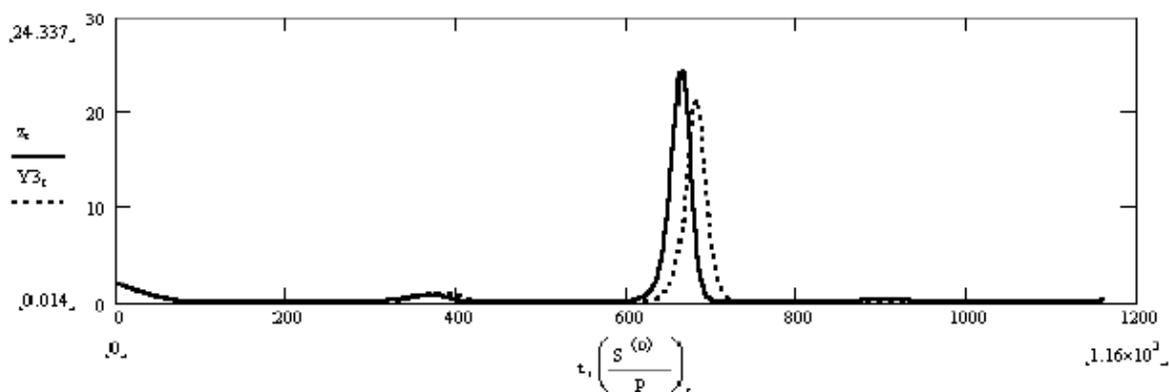


Рис. 3.29. График среднеквадратичной погрешности для ДУ "аттрактора О.Росслера"

Как показывает анализ, нелинейные АР-модели типа (3.34) могут хорошо аппроксимировать довольно широкий класс процессов в машиностроении и, следовательно, быть использованы для целей их прогнозирования.

Все рассмотренные выше алгоритмы не имеют реальной ценности, если они не могут быть применены к реальным данным, поэтому проведём испытания разработанного комплекса, применительно к известным моделям – аттрактор Лоренца и Ресслера. В последнее время, данные уравнения очень активно исследуются для целей прогнозирования.

Рассмотрим подробно конкретные классы ДУ для которых описанное выше “сведение” к АР-модели возможно.

“Странный” аттрактор Э.Лоренца.

Замечательный числовой эксперимент содержится в работе Эдварда Лоренца, проведенный на основе уравнений тепловой конвекции в жидкости:

$$\begin{aligned} x'(t) &= -a \cdot x(t) + a \cdot y(t) \\ y'(t) &= b \cdot x(t) - y(t) - x(t) \cdot z(t) \\ z'(t) &= -c \cdot z(t) + x(t) \cdot y(t) \end{aligned}, \quad (3.35)$$

Для исследований хаотических движений Лоренц выбрал ставшие ныне классическими значения параметров $a = 10$; $b = 28$; $c = 8/3$ при начальных условиях:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

и при $dt = 0,01$. Фазовое пространство при этих параметрах имеет следующий вид (рис. 3.30).

Аттрактор Лоренца является классическим странным аттрактором, т.е. его фазовое пространство представляет собой притягивающее множество, по которому движутся хаотические траектории.

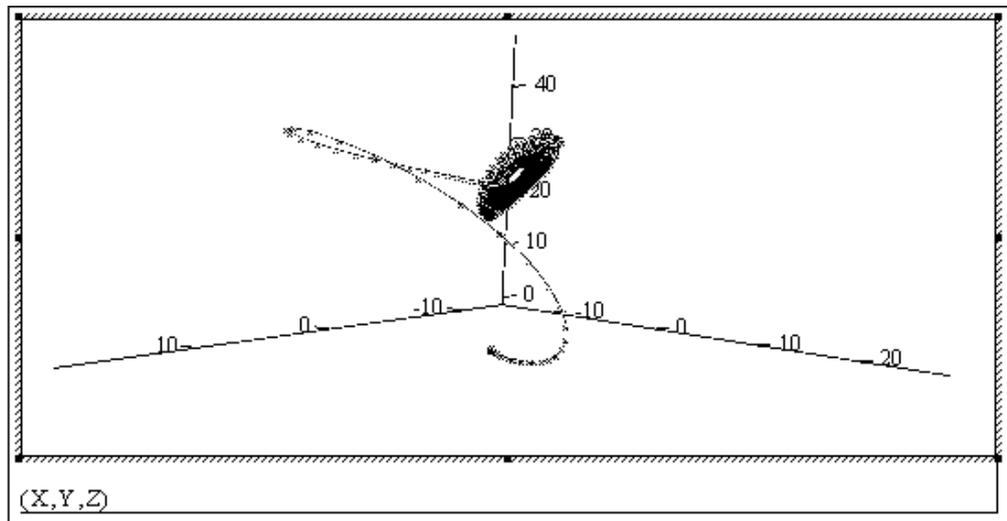


Рис. 3.30. Фазовое пространство аттрактора Лоренца

Попробуем «усложнить» фазовое пространство аттрактора Лоренца и установим прогноз с помощью предложенных АР-моделей.

При параметрах $a = 5$; $b = 15$; $c = 1$, начальных условиях:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -7 \\ 11 \end{pmatrix},$$

фазовое пространство имеет вид, представленный на рис. 3.31.

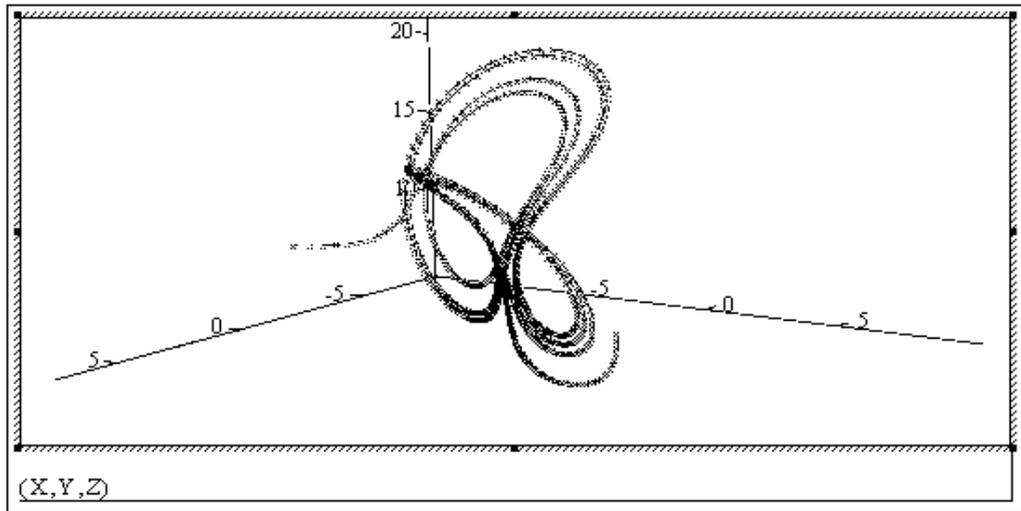


Рис. 3.31. Фазовое пространство аттрактора Лоренца

А графики компонент аттрактора Лоренца представлены на рисунках 3.32-3.34.

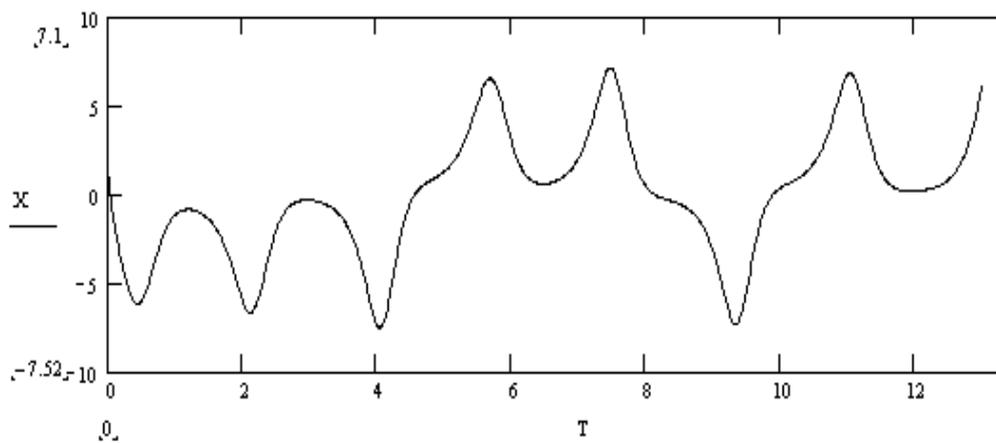


Рис. 3.32. Компонента $x(t)$ аттрактора Лоренца

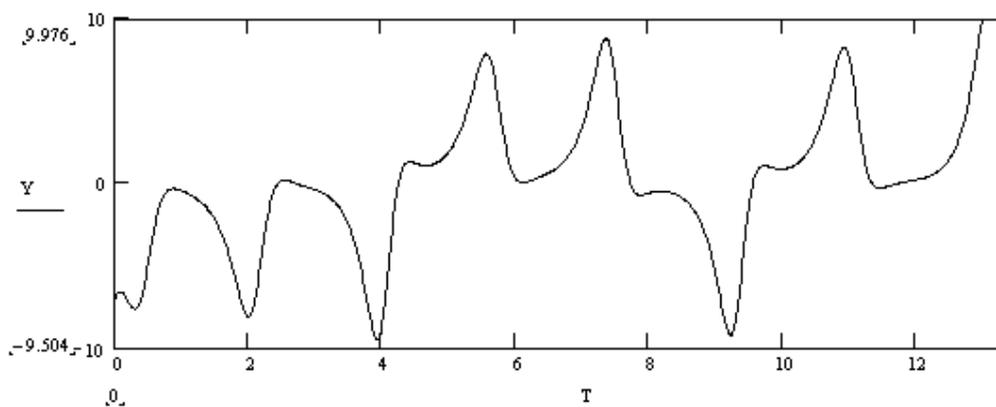


Рис. 3.33. Компонента $y(t)$ аттрактора Лоренца

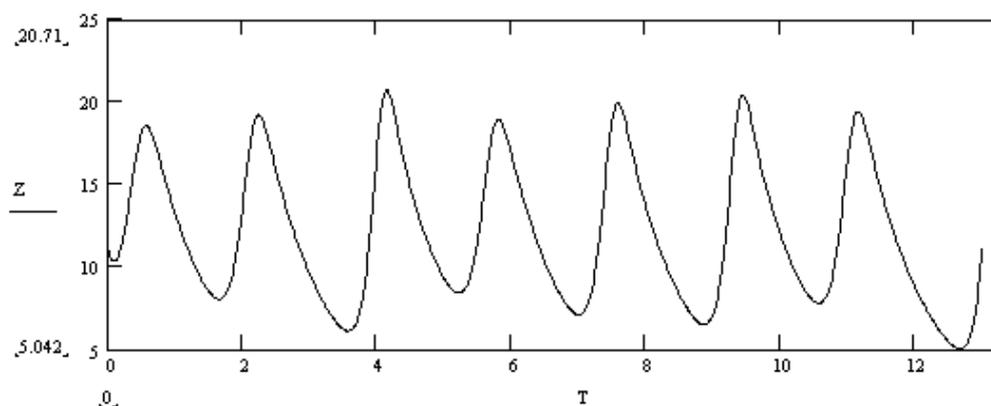


Рис. 3.34. Компонента $z(t)$ аттрактора Лоренца

Проверим, как при таком сложном виде графиков компонент, будет работать наша система.

Сначала найдём АР-уравнения, для этого введём значения коэффициентов ММ аттрактора Лоренца в модуль поиска АР-уравнений. Они будут следующими: $a_{11} = -a_{12} = -a$, $a_{21} = b$, $a_{22} = -1$, $a_{33} = -c$, $b_{22} = -1$, $b_{31} = 1$ при всех остальных тождественно равных нулю. Если применить условие нахождения АР-уравнения описанное выше в данной работе, то получается, что этому условию удовлетворяет лишь одно уравнение, в левой части которого содержится $x'(t)$.

Программа подтверждает данное условие и выдает одно АР-уравнение для компоненты $x(t)$, вид которого приведён в формуле (3.35).

В результате решения системы линейных уравнений получаем

$$a = 5.032626 ; b = 14.650660 ; c = 1,022287.$$

Полученные результаты для компоненты $x(t)$ отражены на графике сравнения, где сплошной линией показан прогноз, полученный с помощью АР-уравнения, а пунктирной – точное поведение соответствующих компонент (рисунок 3.35).

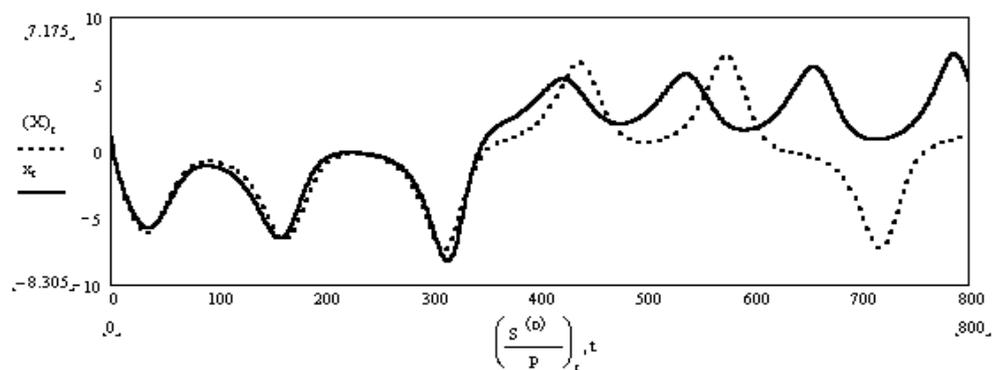


Рис. 3.35. График сравнения для компоненты $x(t)$

Используя уравнения связи был найден прогноз и для остальных компонент – $y(t)$ и $z(t)$ (рис. 3.36 - 3.37).

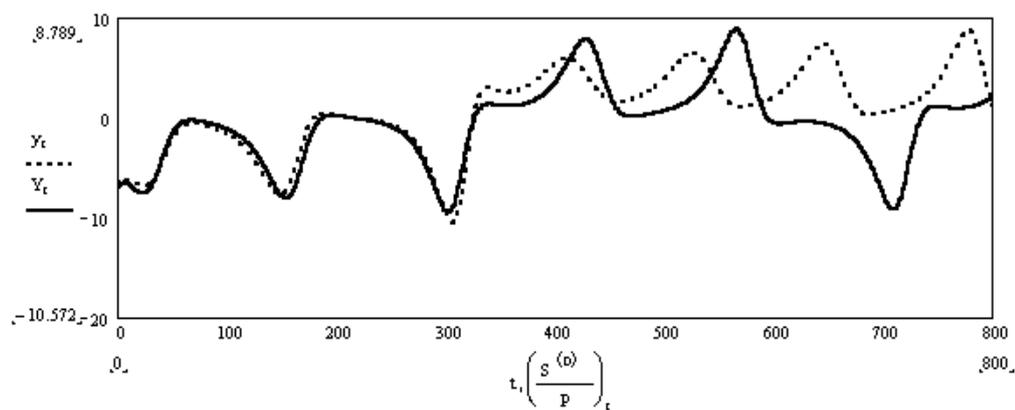


Рис. 3.36. График сравнения для компоненты $y(t)$

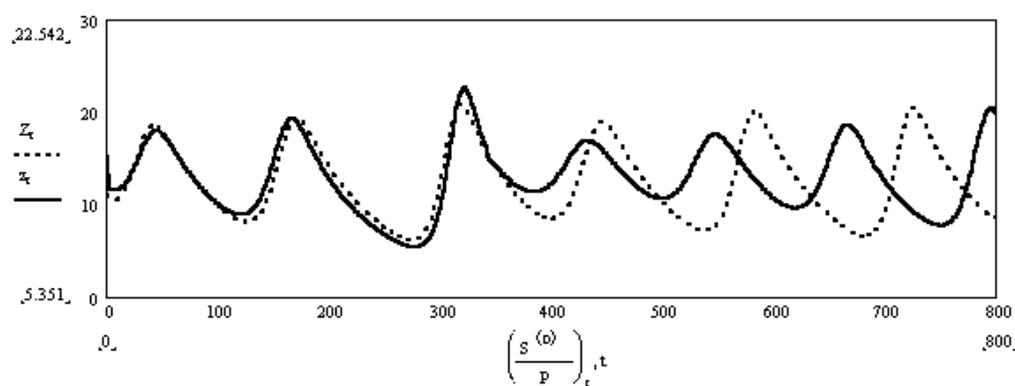


Рис. 3.37. График сравнения для компоненты $z(t)$

“Странный” аттрактор Ресслера.

$$\begin{aligned}
 x'(t) &= -y(t) - z(t) \\
 y'(t) &= x(t) + a \cdot y(t) \\
 z'(t) &= b - c \cdot z(t) + x(t) \cdot z(t)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Эти уравнения при параметрах $a = b = 0.2$, $c = 5.7$ и начальных условиях:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ -3 \\ 2 \end{pmatrix},$$

имеют следующий вид фазового пространства (рис. 3.38).

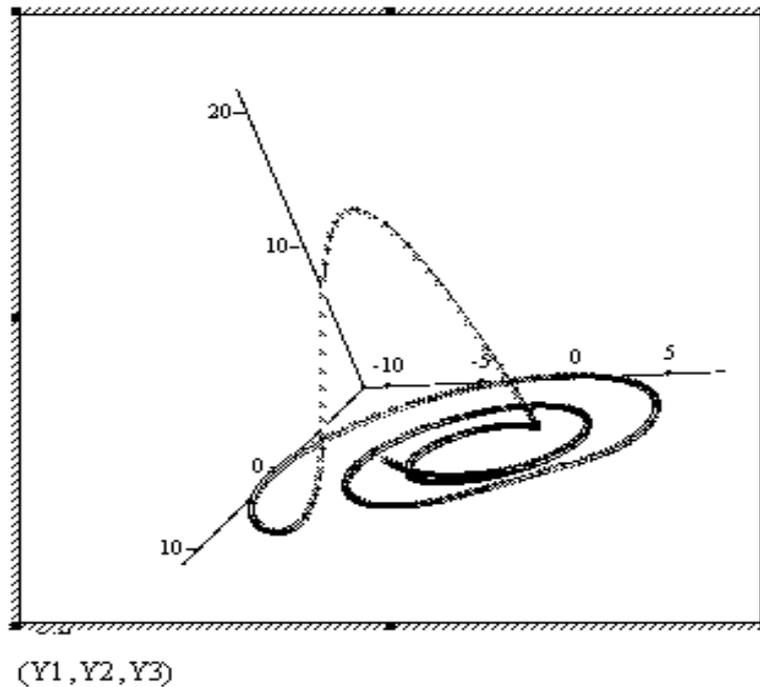


Рис. 3.38. Фазовое пространство аттрактора Ресслера

Алгоритм проведения анализа и установления прогноза идентичен рассмотренному выше для уравнений аттрактора Лоренца. Поэтому приведём только графики сравнения, где сплошной линией показан прогноз, полученный с помощью АР-уравнения, а пунктирной – точное поведение соответствующих компонент.

Графики прогноза компоненты $y(t)$

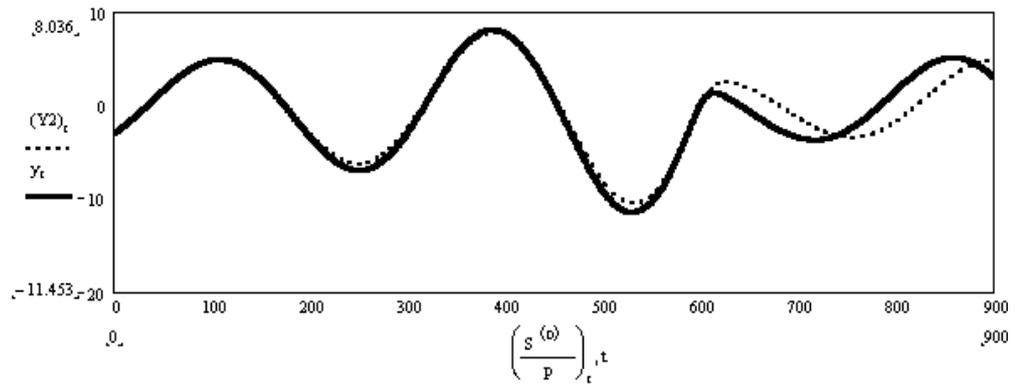


Рис. 3.39. График сравнения для $y(t)$

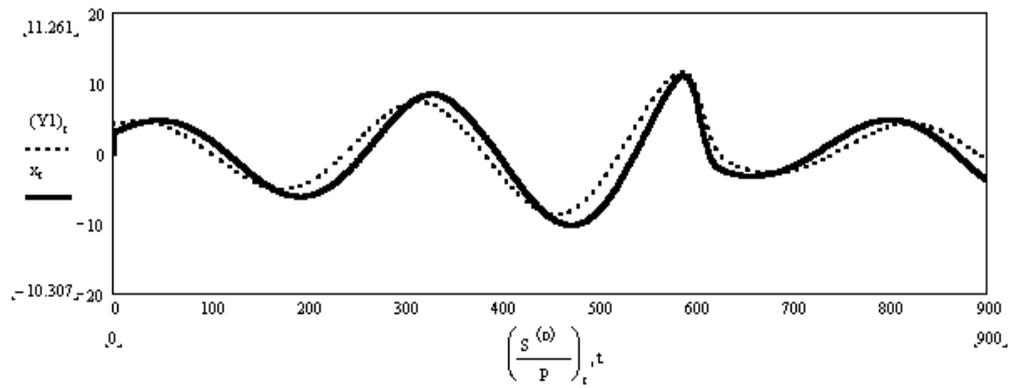


Рис. 3.40. График сравнения для $x(t)$

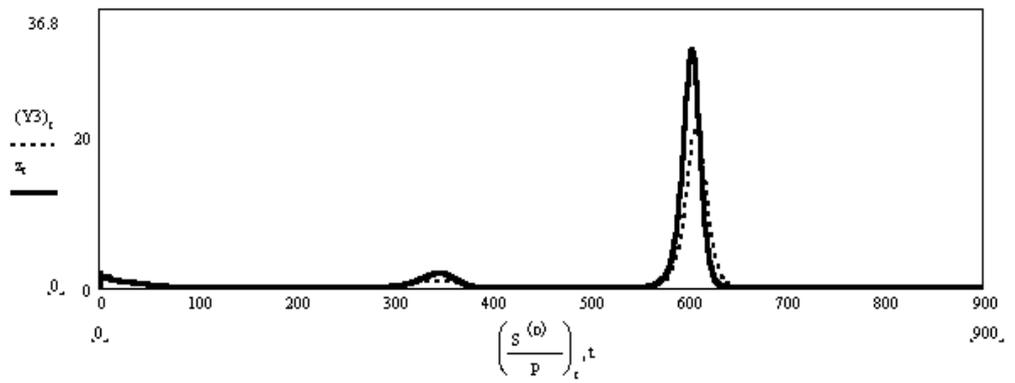
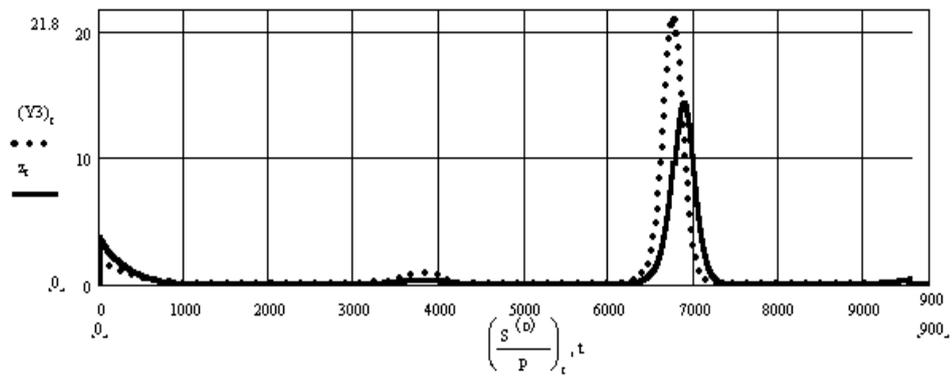
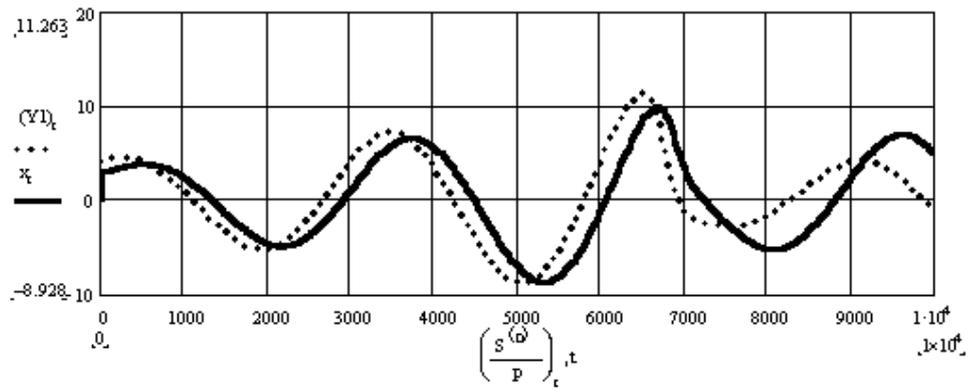
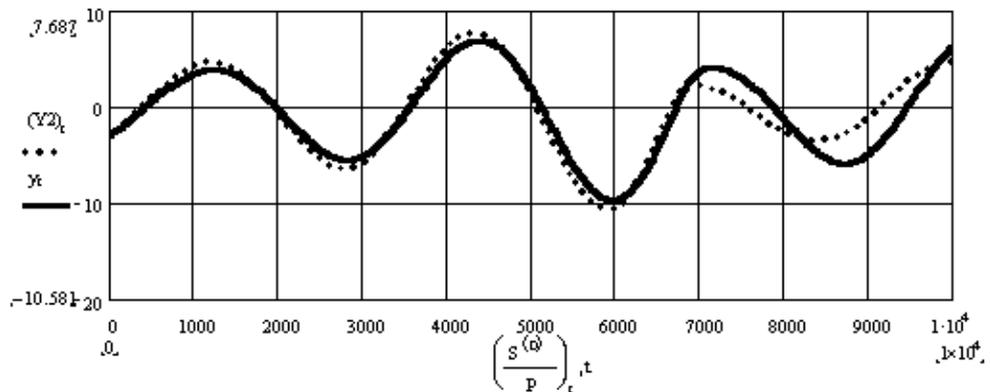


Рис. 3.41. График сравнения для $z(t)$

Графики прогноза компоненты $z(t)$ Рис. 3.42. График сравнения для $z(t)$ Рис. 3.43. График сравнения для $x(t)$ Рис. 3.44. График сравнения для $y(t)$

Особенностью графика для компоненты $z(t)$ в аттракторе Росслера (рис. 3.42), в отличие от многих ДУ, в том числе и аттрактора Лоренца состоит в её импульсном характере. Ясно, что линейные регрессионные АР-модели в этом случае не годятся для получения удовлетворительного прогноза. Нелинейная же регрессионная модель для $z(t)$ позволяет получить удовлетворительный прогноз, по крайней мере, местоположение пиков (рис. 3.42).

Таким образом, как показывает анализ, модифицированные АР-модели позволяют аппроксимировать довольно широкий класс технологических процессов и, следовательно, использованы не только для целей их прогнозирования, но и установления значений других параметров, характеризующих состояние технического или технологического объекта, особенно в случае, когда не обеспечена его контролепригодность на этапе разработки и проектирования.

3.3.2 Ансамблевые технологии машинного обучения

Эффективной альтернативой использованию единственного метода прогнозирования является объединение прогнозов из нескольких разных моделей, что определяет суть ансамблевых технологий машинного обучения. Ансамблевые методы позволяют объединить несколько алгоритмов в одну прогностическую модель для повышения точности прогноза, уменьшения дисперсии или смещения, позволяя строить более стабильные модели.

В задачах управления состояниями технических и технологических объектов ключевым моментом является классификация их состояний. С этой целью создаются ансамблевые модели машинного обучения.

В качестве подобной модели машинного обучения предлагается рассмотреть зависимость $a: X \rightarrow y$, где для каждого набора входных признаков X соответствует выходное значение y . Используем ансамблевые методы машинного обучения для аппроксимации этой зависимости на основе обучающей выборки $\{X_i, y_i\}_{i=1}^m$.

Методы ансамблевого машинного обучения состоят из нескольких независимых прогностических моделей, созданных для решения одной задачи. Эти

базовые модели обучаются на одних и тех же обучающих данных, а затем их прогнозы или результаты объединяются. Такой подход способствует повышению прогностической эффективности, поскольку комбинация нескольких моделей обычно обеспечивает более точные решения, чем отдельные модели.

Основная цель создания ансамблевых моделей заключается не столько в достижении высокой точности каждой отдельной базовой модели, сколько в обеспечении возможности компенсации ошибок различных моделей друг другом. При использовании ансамблевых методов прогнозирования различные базовые модели могут допускать разные виды ошибок на обучающих данных. Тем не менее, за счет объединения результатов этих моделей можно достичь высокой общей точности прогнозирования, даже если точность каждой отдельной базовой модели не очень высока.

Для задач прогнозирования широко применяются три основных метода ансамблевого машинного обучения, которые доминируют в этой области: Stacking, Boosting и Bagging [172].

Method Boosting

В методе Boosting в ансамблевом обучении базовая модель используется для пошагового создания серии более сложных моделей. Каждая последующая модель в ансамбле обучается на ошибках, допущенных предыдущей моделью: сначала первый классификатор обрабатывает весь набор данных, затем его прогнозы анализируются для передачи на второй классификатор. Работа всех последующих базовых моделей организуется таким образом, чтобы каждая следующая модель исправляла ошибки, допущенные предыдущими. В итоге получается окончательная модель, которая представляет собой комбинацию всей последовательности моделей.

Алгоритм Boosting [173] выглядит следующим образом:

- *Шаг 1.* Создается классификатор, которой предоставляется подмножество исходного набора обучающих данных, таким образом модель обучается на этих данных;

- *Шаг 2.* Предсказанные данные добавляются в подмножество данных для обучения и используются для тренировки новой слабой модели;
- *Шаг 3.* Значения ошибок, полученных на обученной модели, добавляются в набор данных для обучения следующей модели;
- *Шаг 4.* Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность базовой модели.

В процессе Boosting алгоритм сосредотачивается на подмножествах данных, где предыдущие модели допускали ошибки, и улучшает границу решения в этих подмножествах. Экземпляры данных, на которых классификатор на первой итерации не дает правильных прогнозов, передаются классификатору на следующую итерацию. После нескольких итераций вычисляется окончательный прогноз, объединяя результаты всех базовых моделей, что обеспечивает более точные прогнозы, чем у каждой отдельной модели.

Алгоритм метода Boosting изображен пошагово на рис. 3.45. Основная цель метода Boosting состоит в уменьшении систематической ошибки при построении ансамбля моделей.

Алгоритм Boosting имеет ряд гиперпараметров, таких как скорость обучения, размер ансамбля, максимальная глубина деревьев и критерий ветвления при построении деревьев. Выбор оптимальных значений этих параметров зависит от конкретной задачи и требует серии экспериментов.

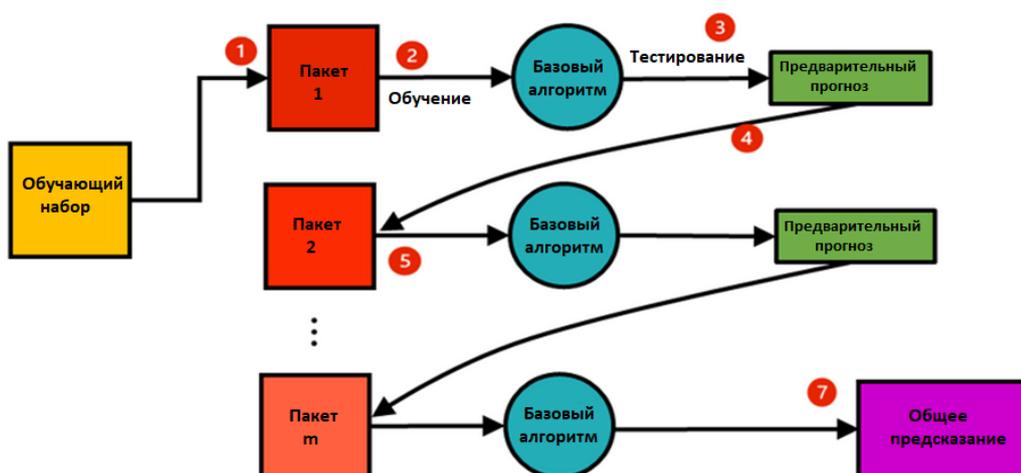


Рис. 3.45. Схема метода ансамбля Boosting

Рассматриваемый метод ансамблевого обучения обеспечивает высокую точность результатов, сопоставимую с другими методами. Однако его недостатком является отсутствие возможности параллелизации вычислений, так как модели обучаются последовательно, и каждая следующая модель зависит от предыдущей, что не позволяет обеспечить оперативность установления модели прогноза состояний технических и технологических объектов, при этом важно найти баланс между точностью и временем работы алгоритма, а увеличение точности не должно существенно увеличивать время обучения модели.

Method Stacking

Метод Stacking [172] представляет собой более сложный подход к созданию ансамблей, который иллюстрируется на схеме, представленной на рис. 3.46. Для каждого образца входных данных создается несколько прогнозов, количество которых соответствует числу базовых моделей в ансамбле. Затем результаты всех этих базовых моделей используются в качестве входных данных для другого классификатора, называемого мета-классификатором. Мета-классификатор обучается на этих данных для выполнения прогнозов на основе нового набора данных.

Представленная схема на рис. 3.46 отображает один уровень ансамбля стекирования, а также существуют многоуровневые методы стекирования, в которых вводятся дополнительные слои классификаторов между входными данными и мета-классификатором. Такие методы могут стать очень ресурсозатратными с вычислительной точки зрения для достижения относительно небольшого увеличения производительности модели.

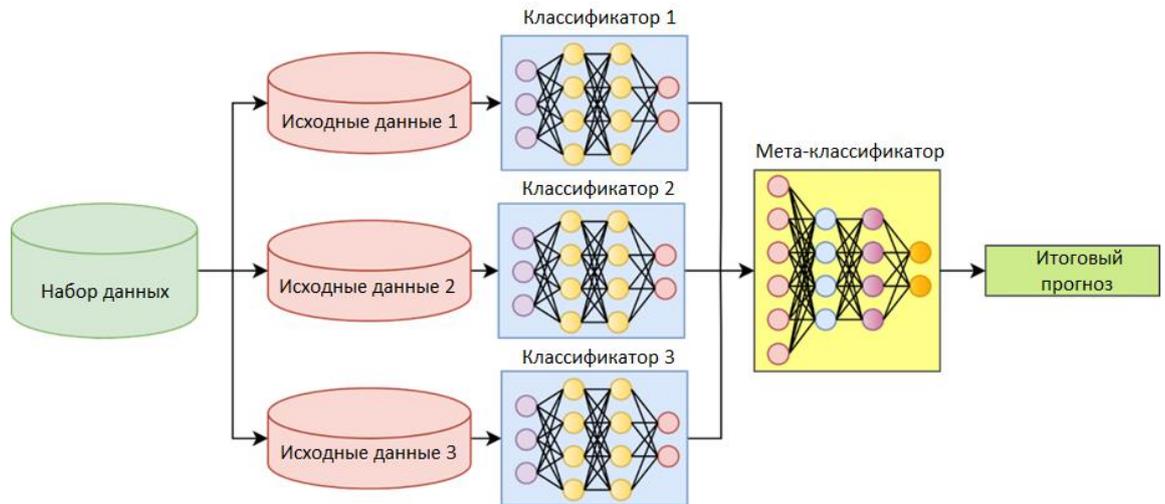


Рис. 3.46. Схема метода ансамблирования Stacking

Несмотря на то, что метод Stacking предполагает возможность параллельных вычислений, однако он основан на использовании базовых моделей, которые обучаются на одних и тех же выборках данных. Результаты, полученные от базовых моделей, затем передаются в мета-классификатор для окончательного принятия решения, но из-за многоуровневого обучения метод требует значительно больше времени и вычислительных ресурсов. Цель заключается в повышении точности конкретной модели ИНС без значительных временных затрат.

Method Bagging (Bootstrap Aggregation)

Метод Bagging (Bootstrap Aggregation) [172] представляет собой инновационный подход к построению ансамбля моделей, обучаемых на различных подвыборках из одного обучающего набора данных, при этом в процессе создания ансамбля формируются несколько вариантов одной и той же модели. Термин "bagging" был введен профессором Лео Брейманом из Калифорнийского университета в Беркли, являясь оригинальным методом, который объединяет результаты при различных загрузках данных.

Метод Bagging, изображенный на рис. 3.47, представляет модель, обеспечивающую высокую эффективность за счет использования ансамбля моделей, каждая из которых обучается на нескольких наборах исходных данных. Этот подход позволяет моделям оказаться достаточно разнообразными, что способствует компенсации ошибок друг друга и в итоге, повышает качество прогнозов. Благодаря гибкости этого метода, легко можно экспериментировать с различными модификациями, внося изменения как в обучающие наборы данных, так и в механизм объединения прогнозов, для достижения еще более точных результатов.

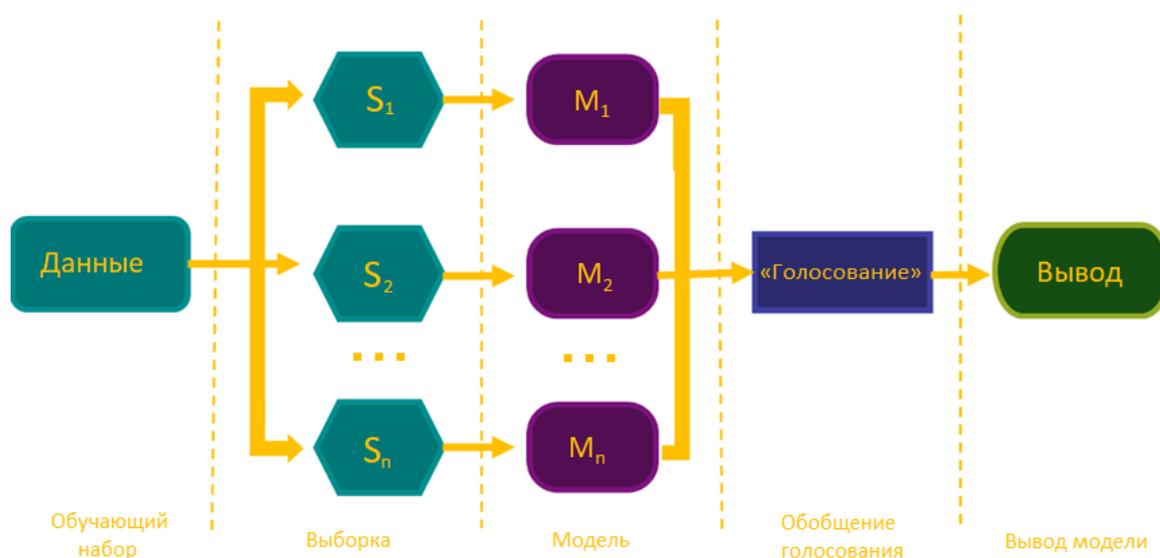


Рис. 3.47. Схема метода ансамбля Bagging

$$B_T(x) = \sum_{t=1}^T b_t(x), \quad (3.20)$$

где T – это число моделей в ансамбле,

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

Алгоритм Bootstrap, используемый для формирования выборок, основан на случайном создании подвыборок для обучения из одного и того же исходного набора обучающих данных. Размер каждой подвыборки для базовой модели равен размеру исходной выборки, если она достаточно велика; в противном случае размер подвыборки выбирается меньше исходного размера. При формировании новой подвыборки для каждой модели в ансамбле один и тот же экземпляр класса может встречаться несколько раз в пределах одной выборки.

Исходя из описанной структуры модели Bagging, обучение ансамбля моделей может быть реализовано параллельно, что значительно ускоряет процесс. Еще одной значимой особенностью этого метода является его способность снижать дисперсию модели. Модели с высокой дисперсией могут возникать из-за излишне интенсивного обучения на тренировочном наборе данных, в то время как модели с высоким смещением обычно возникают из-за недостаточного обучения модели. Важно находить баланс между смещением и дисперсией модели. Например, увеличение числа скрытых единиц в ИНС может привести к увеличению дисперсии, при этом смещение модели уменьшается. В данном исследовании базовая модель в ансамбле представлена ИНС. Это в сочетании с возможностью параллельной реализации алгоритма ансамбля, не приводящей к потере времени, делает метод Bagging оптимальным выбором для ансамблевого обучения в контексте классификации состояний технических и технологических объектов (см. рис. 3.48).

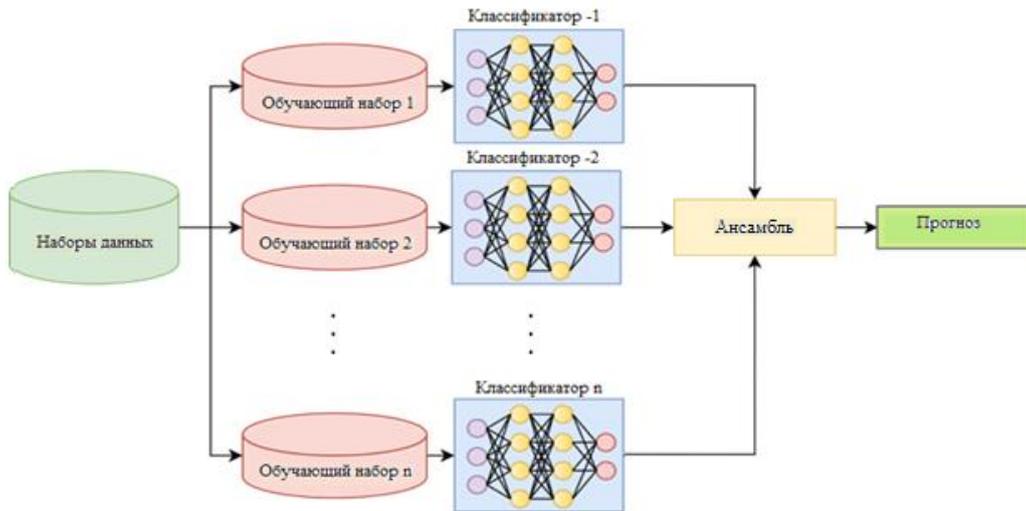


Рис. 3.48. Модель параллельного ансамблевого обучения метода Bagging

Сложные ансамблевые методы, такие как Stacking, Bagging и Boosting, предоставляют возможность значительного повышения производительности [174] за счет их более сложной структуры и высокой потребности в вычислительных ресурсах. Тем не менее, для задач классификации состояний технических и технологических объектов даже незначительное улучшение точности алгоритмов машинного обучения [175] может играть ключевую роль в обеспечении эффективности и точности прогнозирования состояний объектов.

Согласно существующим исследованиям, для выбора оптимального количества классификаторов рекомендуется использовать число независимых классификаторов, равное числу меток класса, что позволяет добиться наивысшей точности в прогнозах модели [176].

Таким образом, выполненный анализ методов ансамблевого машинного обучения, позволил сделать выводы о преимуществах и недостатках каждого алгоритма для решения поставленной задачи. В результате исследований была выбрана модель ансамблевого обучения Bagging Ensemble, которая представляет собой ансамбль моделей, обучаемых параллельно на различных подвыборках из одного обучающего набора данных.

3.4 Схема открытой системы адаптивных моделей вычислений для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов

В результате предлагается открытая система адаптивных моделей вычислений (рис. 3.49), свойство открытости которой, обеспечивает возможность дальнейшего включения других наукоёмких моделей вычислений, с учётом уже имеющихся в составе «мягких», биоинспирированных и прогностических моделей вычислений и осуществляется непрерывное взаимодействие с внешней средой.

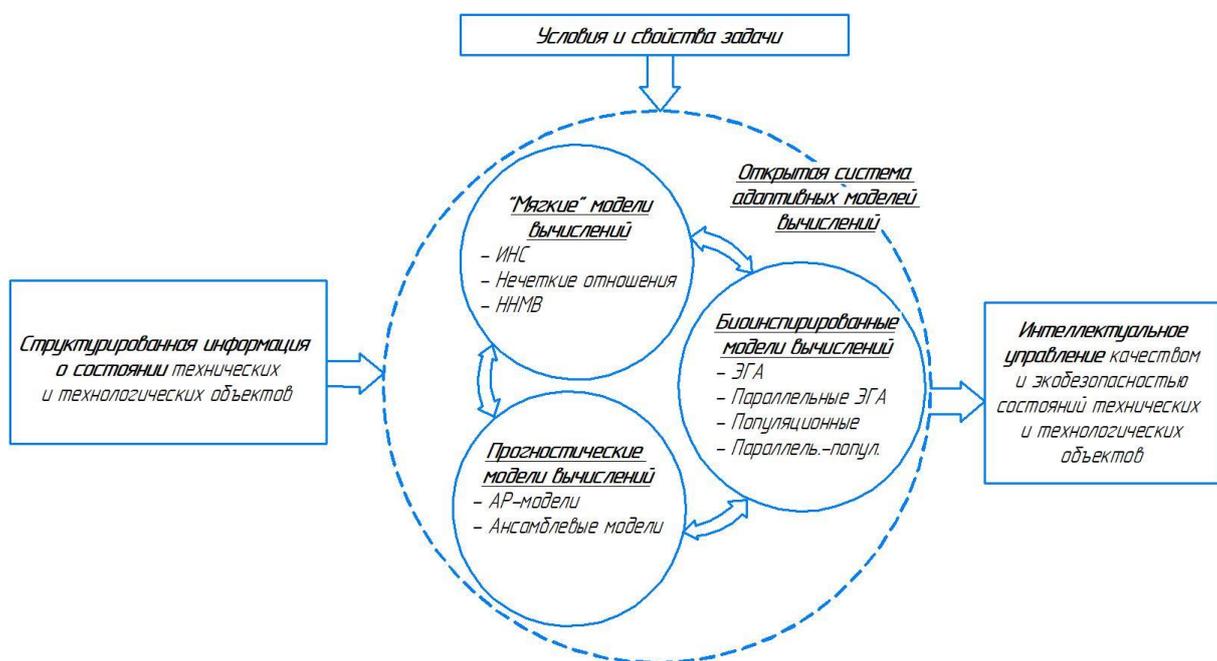


Рис. 3.49. Схема открытой системы адаптивных моделей вычислений

3.5 Выводы по главе 3

1. Рассмотрены адаптивные модели «мягких» вычислений:

- нейросетевые, включающие базовые типы архитектур искусственных нейронных сетей;
- нечёткие, включающие различные функции активации, в том числе интервальные нечёткие множества 2-го типа;

- нейро-нечёткие, включающие адаптивную нейро-нечёткую интерференционную сеть (ANFIS) и нейро-нечёткий классификатор, отличающийся применением в качестве нечеткой логической системы, интервальных нечётких множеств 2-го типа.
2. Рассмотрены биоинспирированные (оптимизационные) модели вычислений, включающие:
- модифицированные эволюционно-генетические;
 - параллельные модифицированные эволюционно-генетические;
 - параллельные– популяционные модели вычислений.
3. Предложены прогностические модели вычислений, включающие:
- модифицированные авторегрессионные;
 - ансамблевые технологии машинного обучения, в результате исследований была выбрана модель ансамблевого обучения Bagging Ensemble, которая представляет собой ансамбль моделей, обучаемых параллельно на различных подвыборках из одного обучающего набора данных.
4. Предложена схема открытой системы адаптивных моделей вычислений для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, включающая «мягкие», биоинспирированные и прогностические модели вычислений.

4 МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА КОНТРОЛЕПРИГОДНЫХ, ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ И ЭКОБЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Для эффективного обеспечения качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов, необходимо уже на стадии разработки и проектирования предусмотреть реализацию задач обеспечения контролепригодности, отказоустойчивости и экобезопасности на основе использования таких подходов, которые позволят осуществить переход к интеллектуальному управлению качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

В данной главе предлагаются модели оптимального синтеза контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасных технических и технологических объектов:

- модель информационного синтеза контролепригодных технических и технологических объектов на основе информационного критерия;
- модель структурного синтеза отказоустойчивых технических и технологических объектов на основе алгебраических и графовых структур;
- модель функционального синтеза экобезопасных технических и технологических объектов на основе комплексного индекса экобезопасности и модифицированной функциональной систематики.

4.1 Модель информационного синтеза контролепригодных объектов

В процессе решения задачи оптимального синтеза контролепригодных технических и технологических объектов [178], в качестве критерия, предлагается использовать информационный критерий глубины диагностирования [179, 180] для определения состояний сложных технических и технологических объектов, позволяющий решить следующие задачи:

1. Определение минимального количества контрольных точек состояний объекта, для достижения заданного уровня глубины диагностирования.

2. Оценка глубины диагностирования при известном числе контрольных точек.

Определим всё пространство состояний технического или технологического объекта в следующем виде: каждый блок пронумеруем от 1 до n , поставим ему в соответствие значение ноль, если исправен блок или единицу в противном случае; таким образом, получим 2^n последовательностей из 0 и 1. Обозначим данное множество состояний как S и рассмотрим его как пространство элементарных событий $S_k \in S, (k = \overline{1, 2^n})$, каждое из которых может наступить с вероятностью, равной

$$p(S_k) = \prod_{i \in I} p_i \prod_{j \in J} (1 - p_j), \quad (4.1)$$

где p_j - вероятность отказа j -го блока; J - множество номеров исправных блоков, I - множество номеров неисправных блоков.

В результате получим вектор y_i , который характеризует состояние всего объекта с точностью до определенного подмножества, при условии, что отказ одного блока не влияет на отказы остальных блоков [181].

Для определения количественной меры глубины поиска дефектов (ГПД) вводится следующий коэффициент:

$$K = \frac{I(S, Y)}{H(S)} \quad (4.2)$$

$$H(S) = - \sum_{k=1}^{2^n} p(S_k) \log p(S_k) \quad (4.3)$$

где $H(S)$ - неопределённость состояния объекта, равная количеству информации, которое необходимо получить, чтобы определить, в каком из состояний находится технический или технологический объект;

$$I(S, Y) = H(Y) - H(Y/S) \quad (4.4)$$

и определяется как количество информации $I(S, Y)$ к количеству информации $H(S)$,

которое необходимо получить, чтобы определить в каком состоянии находится объект

$$H(Y) = - \sum_{y_i \in Y} p(y_i) \log p(y_i) \quad (4.5)$$

Неопределённость исхода диагностического эксперимента $H(Y/S)=0$, т.к. неопределённость y_i является нулевой, при определенном состоянии системы $S_k \in S$

Следовательно, $I(S, Y) = H(Y)$ и

$$K = \frac{H(Y)}{H(S)} \quad (4.6)$$

Энтропия системы равна сумме всех энтропий отдельных блоков:

$$H(S) = - \sum_{j=1}^n H(X_j) \quad (4.7)$$

где X_j - множество состояний j -го блока, при этом энтропия j -го блока

$$H(X_j) = -p_j \log p_j - (1-p_j) \log(1-p_j) \quad (4.8)$$

При условии $I(S, Y)=H(S)$, коэффициент K равен единице, в случае если, вообще невозможно получить сведения о состоянии объектов, $I(S, Y)$ и коэффициент K равны нулю.

Глубина диагностирования дефекта прямо пропорциональна количеству информации $I(S, Y)$ и коэффициенту K . Решение задачи диагностирования технических и технологических объектов, с построением модели объекта исследования приведено в п. 5.2 «Примеры технических и технологических объектов. Промышленные применения».

Вектор $y_i \in Y$, характеризующий состояние объектов, определяется в результате тестирования (рис. 4.1) [180].

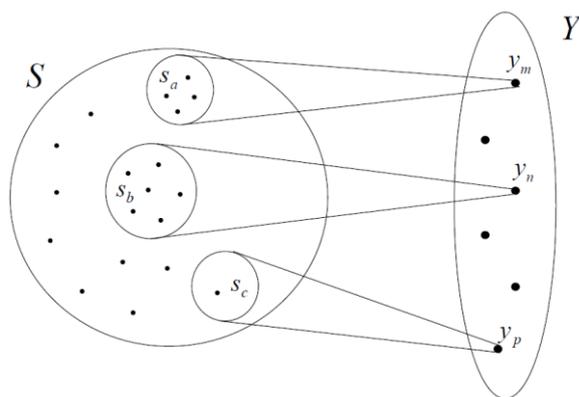


Рис. 4.1. Взаимосвязь множества состояний объекта S с множеством результатов диагностирования Y

В качестве информационного критерия качества диагностирования примем глубину диагностирования, под которой будем понимать среднее количество состояний объекта, с точностью до которых можно локализовать дефект на основании количества информации. При условии $I(S, Y) = H(S)$, коэффициент K равен единице, в случае если, вообще невозможно получить сведения о состоянии системы, $I(S, Y)$ и коэффициент K равны нулю.

$$I(\hat{S}, Y) = H(Y) - H(Y/\hat{S}), \quad (4.9)$$

где $H(Y) = -\sum_{y_i \in Y} p(y_i) \log p(y_i)$ – неопределенность проведения диагностирования, при

этом условная неопределенность $H(Y/\hat{S}) = 0$, поскольку неопределённость появления y_i при заданном состоянии системы $s \in \hat{S}$ равна нулю. Следовательно $I(\hat{S}, Y) = H(Y)$.

Таким образом, задача максимизации глубины локализации дефектов сводится к выбору из допустимого множества контрольных точек такого подмножества заданного размера, которое обеспечивает максимальное количество информации о системе, и каждая контрольная точка в данном случае локализует определённое подмножество состояний технических и технологических объектов.

Алгоритм работы условного поиска дефектов (УПД) заключается в выборе последовательности контрольных точек. На рис. 4.2 представлена блок-схема работы алгоритма УПД [181].

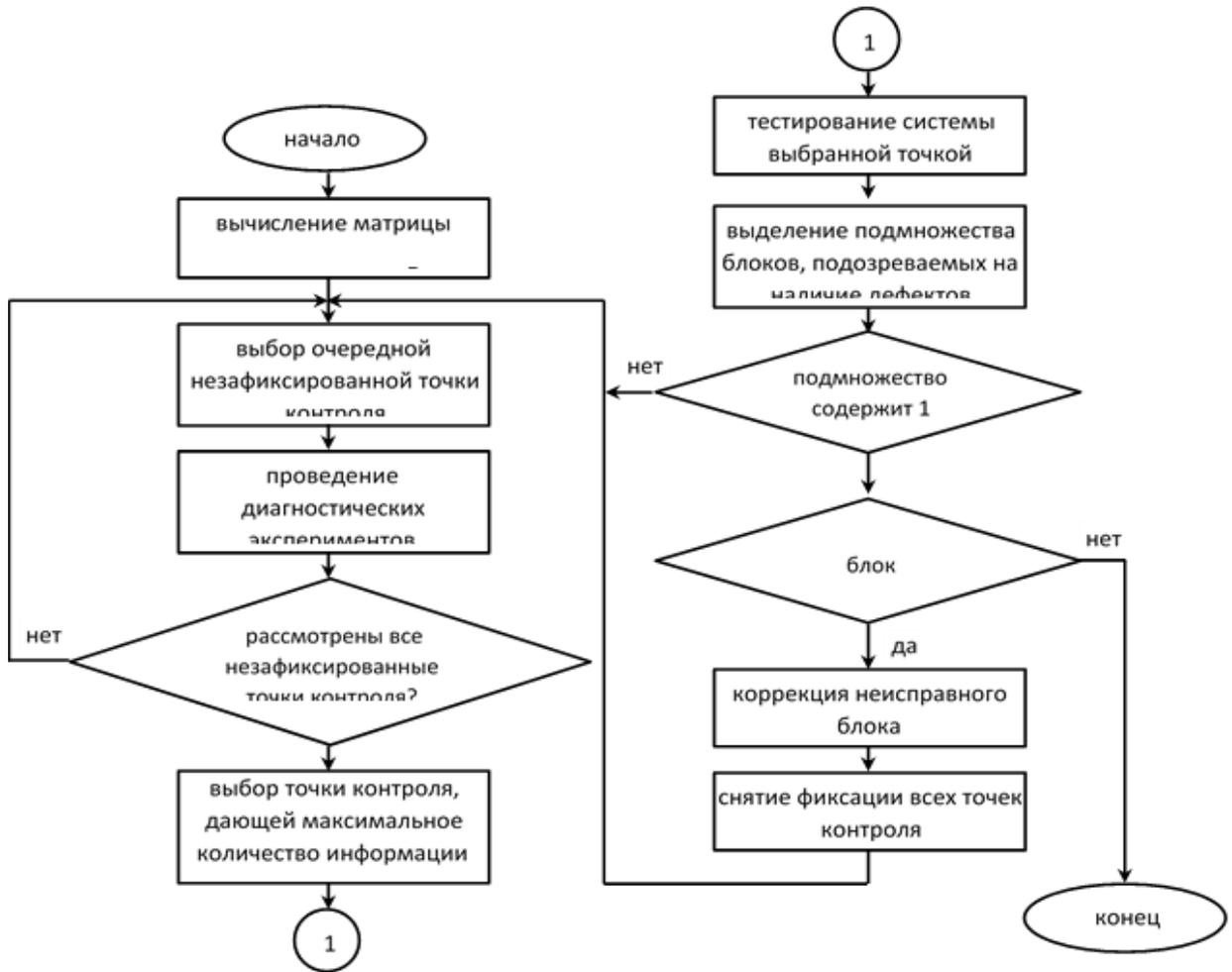


Рис. 4.2. Блок-схема работы алгоритма УПД

Последовательность контрольных точек определяет максимальное количество информации о состоянии объекта, и эти результаты влияют на выбор следующей точки. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут рассмотрены все контрольных точки состояния объекта, и данный процесс требует значительных временных и вычислительных ресурсов [93].

Предлагается усовершенствовать данный алгоритм в предположении, что вероятности состояний технического или технологического объекта существенно уменьшаются при увеличении кратности и при этом для их определения не требуется высокая точность. С другой стороны, вычисление энтропии требует большого объема затрат вычислительных ресурсов. На рис. 4.3 представлен модифицированный алгоритм поиска дефекта (МАПД).

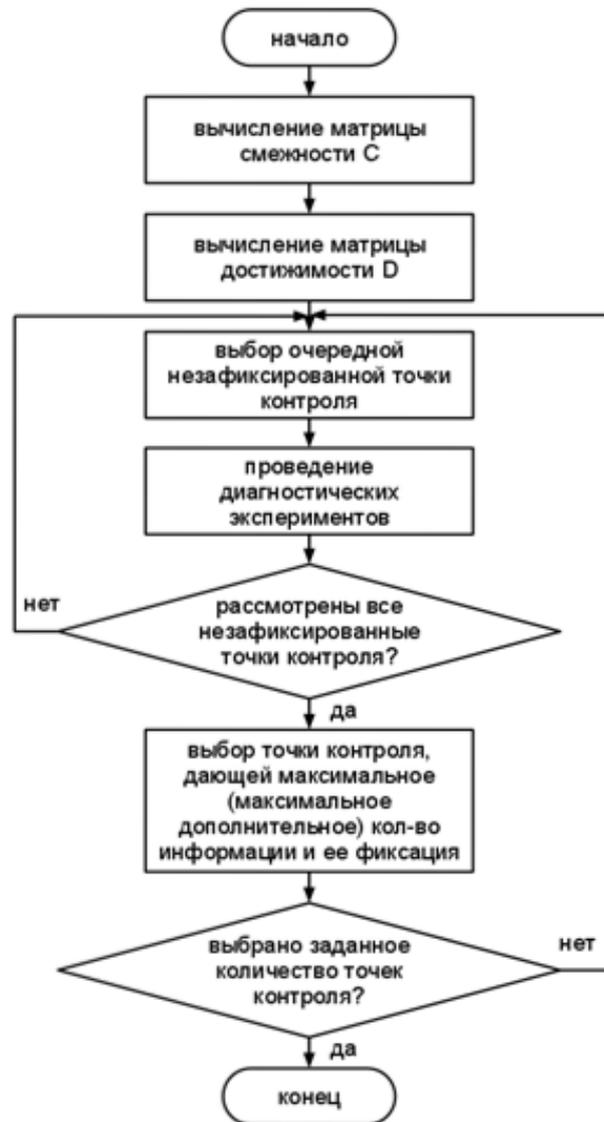


Рис. 4.3. Блок-схема работы МАИД

При условии генерации всех состояний системы, а потом удаления работоспособных, будет затрачено много вычислительных ресурсов при их небольших вероятностях отказов блоков p_1, \dots, p_n . Чтобы провести моделирование только неисправных состояний системы, требуется перейти от пространства всех состояний объекта S к пространству неисправных состояний объекта Q . (рис. 4.4) [180].

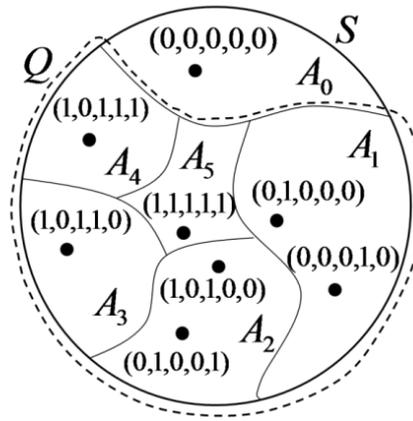


Рис. 4.4. Пространство состояний объекта S и пространство неисправных состояний объекта Q

Данный переход к пространству неисправных состояний Q , обеспечивает сокращение множества всех обрабатываемых событий [93], что ведёт к ускорению трудоёмких вычислений. В связи с этим, предлагается алгоритм статистического генерирования (АСГ) неисправного состояния объекта принимает следующий вид (рис. 4.5).

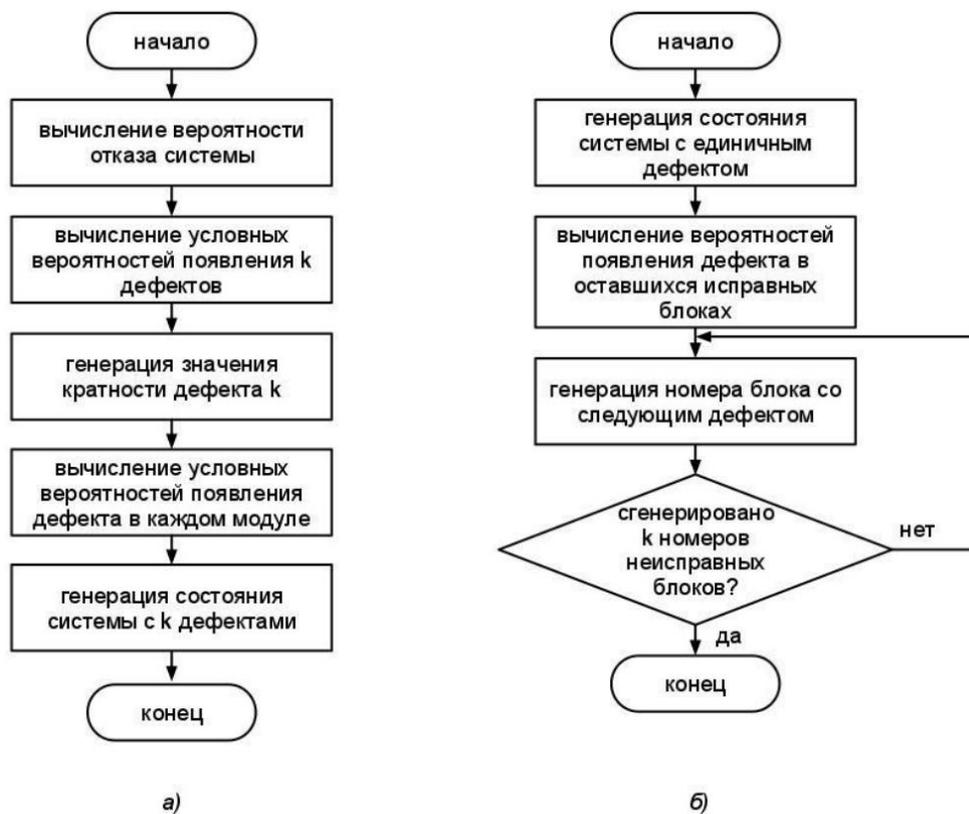


Рис. 4.5. Блок-схемы работы АСГ:

a – генерация неисправного состояния объекта;

б – генерация состояния объекта с дефектом кратности k .

Исходя из информационного критерия глубины диагностирования, можно разработать обобщенную вероятностно-структурную модель и определить стратегию определения состояний технических и технологических объектов [184].

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 объекта, $I(S, Y) = 0$ и коэффициент $K = 0$. Таким образом, становится очевидным, что с увеличением количества информации $I(S, Y)$ или с увеличением коэффициента K , глубина диагностирования возрастает.

Для получения структурных решений предлагается следующий алгоритм последовательного выбора контрольных точек:

на первом этапе выбирается точка, способная предоставить максимальное количество информации об объекте;

на последующих этапах выбирается такая точка, которая определяет максимальное количество информации из множества оставшихся, и как только будет выбрано заданное число контрольных точек, процедура выбора завершается и выбирается точка, которая из оставшихся максимально увеличит информацию, и далее продолжается выбор, пока не будет достигнуто заданное количество контрольных точек.

Методика расчета коэффициента K существенно влияет на эффективность работы алгоритма, при этом точный метод расчета для состояний технических и технологических объектов, является крайне трудоёмким. Можно рассматривать только наиболее вероятные состояния из подмножеств S_k , отбросив те состояния, которые вносят незначительное влияние на соответствующую вероятность $p(y_i)$. Это позволяет сократить вычислительные затраты на вычисление коэффициента K при незначительной потере точности.

Таким образом, основная задача, заключающаяся в максимизации глубины диагностирования, сводится к отбору определенного подмножества контрольных точек из допустимого множества так, чтобы результаты измерений приносили максимальное количество информации о состоянии объекта.

Для решения указанной выше задачи предлагается использовать метод динамического программирования [185].

Алгоритм решения задачи методом динамического программирования заключается в следующем. Сначала подсчитывается коэффициент глубины диагностирования для всех предварительно запланированных контрольных точек. Далее процесс решения разбивается на этапы, каждый из которых соответствует количеству используемых контрольных точек в процессе диагностирования:

- **На первом этапе** происходит отбор точки с наибольшим значением коэффициента глубины диагностики, то есть остаются только те точки, которые в совокупности обеспечивают максимальное количество информации в результате диагностирования.
- **На втором этапе** отбрасываются две контрольные точки такие, чтобы оставшиеся точки в общем обеспечивали максимальное количество информации и так далее, пока не останется одна точка [185].

В табл. 4.1 представлен пример таблицы функций неисправности [20] для оптимального выбора контрольных точек технического объекта импульсный блок питания (БП), пример которого приведён в главе 5 «Практическая реализация интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов».

Таблица 4.1

Таблица функций неисправностей

П	Y								C(x)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0	0	0	1	1	1	1	11
2	0	0	1	1	0	0	1	1	6
3	0	1	0	0	0	0	1	1	5
4	0	0	1	0	1	0	0	1	3
5	1	0	0	1	0	0	1	1	6
P(y)	0,2	0,15	0,2	0,14	0,16	0,09	0,04	0,02	

Однако, при организации контрольных точек (на этапе проектирования и разработки нового объекта), крайне остро встаёт проблема определения стоимости внедрения данных точек в структуру технического или технологического объекта.

Стоимость организации контрольной точки определяется затратами на её организацию (внедрение) в структуру технического и технологического объекта. Поэтому, представляет практический интерес связать стоимость организации контрольной точки с количеством информации, которое она определяет. Введём коэффициент стоимости единицы диагностической информации K , который определяется как

$$K = \frac{C(x)}{I(x)} \quad (4.10)$$

где $C(x)$ – показатель стоимости организации контрольной точки x_i ; $I(x)$ – количество информации, которое определяет контрольная точка x_i в результате проведения диагностирования технических и технологических объектов.

Таким образом, ставится задача минимизации данного коэффициента K , как функции двух переменных, которую можно выполнить с помощью понятия производной функции, которая определяет экстремум.

$$K = F(C(x_i), I(x_i)) \rightarrow \min$$

$$F'(C(x_i), I(x_i)) = 0$$

Частным случаем определения коэффициента стоимости единицы диагностической информации K для технического или технологического объекта, является задача расчёта глубины поиска дефекта, которая решалась ранее. В этом случае, если стоимость организации всех контрольных точек состояния объекта будет одинакова, то алгоритм сводится к задаче расчёта глубины поиска дефекта.

В другой ситуации, когда все контрольные точки состояния объекта определяют одинаковое количество информации, то задача сводится к определению наименее затратных (по стоимости) точек.

Таким образом, рассмотрены задачи оптимального синтеза контролепригодных технических или технологических объектов по информационному критерию - глубине поиска дефекта.

4.2 Модель структурного синтеза отказоустойчивых объектов

Проектирование современных технических и технологических объектов предъявляет высокие требования к отказоустойчивости, т.е. обеспечения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких функциональных блоков, элементов и других компонентов. Также необходимо отметить важный частный случай отказоустойчивости – отказобезопасность технических и технологических объектов, под которой подразумевается способность не оказывать негативного воздействия на окружающую среду и людей, при отказе объекта, или его составляющих. Традиционные подходы не гарантируют создание систем, сохраняющих работоспособность при неисправностях. Применительно к техническим и технологическим объектам, активная отказоустойчивость реализуется в большинстве ситуаций комбинированием средств диагностирования с управлением, восстанавливающим работоспособность системы путём применения реконфигурационных алгоритмов топологии связей между функциональными элементами (блоками, агрегатами и т.д.). Минимизации *рисков возникновения отказов*, т.е. потери работоспособности объекта, возможна также за счёт добавления избыточности или резервирования функциональных элементов, а также подходом, набирающим популярность в последнее время - внедрением механизмов внутренней самодиагностики состояний структурных компонентов объектов [187].

Отказоустойчивым техническим или технологическим объектом, является такой объект, который обеспечивает постоянную работоспособность, после отказа одной или нескольких функциональных подсистем объекта. При этом, отказоустойчивость может быть достигнута с помощью средств диагностирования и восстановления, посредством реконфигурирования топологии информационных

связей, т.е. автоматической или ручной процедуры изменения связей между элементами системы, а также резервирования и дублирования функциональных подсистем объекта.

Необходимым аспектом свойства отказоустойчивости технического или технологического объекта, является обеспечение его контролепригодности, обеспечивающей обнаружение, поиск и идентификацию дефектов, приводящих к отказу объекта. В свою очередь, задачей обеспечения отказоустойчивости технических и технологических объектов является нахождение структур, для которых возможен оптимальный синтез отказоустойчивых объектов [188]. Объединение свойств *контролепригодности* и *отказоустойчивости* объекта путем внедрения механизмов внутренней самодиагностики объектов, позволяет производить обнаружение, поиск, идентификацию и дальнейшие процедуры по устранению отказа. Причем выполнить данные процедуры система может в полностью автоматизированном режиме работы (без внешнего управления и воздействий).

Представим технический или технологический объект в виде графа, вершины которого соответствуют ресурсам, либо функциональным компонентам объекта сложной структуры, которые являются заменяемыми при возникновении отказа, а его дуги – логическим (информационным) связям объекта между ними (рис. 4.6) [189].

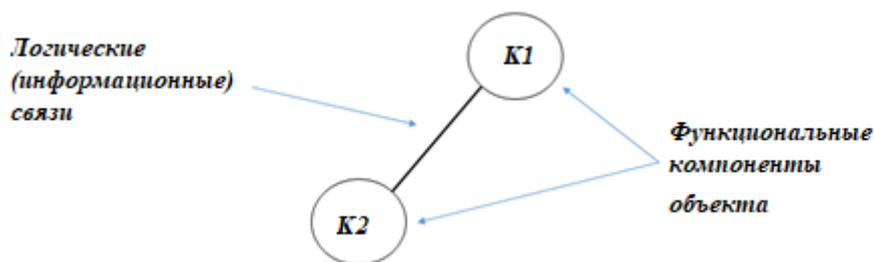


Рис. 4.6. Структура объекта, в виде графа

Рассмотрим оптимальный синтез отказоустойчивых объектов обладающих минимально возможной избыточностью k (k - отказоустойчивых), на основе алгебраических структур [29].

Предположим, что технический или технологический объект, состоящий из n -подсистем, являющимися вершинами графа, и для любой из C_n^t комбинаций возможных отказов, где $1 \leq t \leq k$, после отказа и дальнейшей реконфигурации технический или технологический объект (граф) сохраняет свою логическую структуру.

Пусть неориентированный граф G – это упорядоченная пара $G := (K, E)$, где K – это множество вершин графа, а E – множество пар неупорядоченных вершин, называемых рёбрами.

Абстрактной группой G называется множество, конечное или бесконечное, для которого выполняются условия [29]:

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 $g_i^{-1} * g_i = e$

$|G|$ - порядок группы – количество в ней элементов.

Отказы в подсистемах технического или технологического объекта рассматриваются как изменение его структуры. Данная модель предполагает, что отказам подвержены вершины графа, а дуги графа не изменяются.

При проектировании отказоустойчивых объектов главная цель – сведение к минимуму его избыточности [93], для минимизации которой необходимо, чтобы любой k -отказоустойчивый объект имел по меньшей мере k единиц избыточного ресурса .

Группа симметрии некоторого объекта — это совокупность всех преобразований, при которых объект остается неизменным, с операцией композиции как групповой операцией [187]. Группа автоморфизмов, которые сохраняют структуру объекта, формирует группу симметрии. Рассматриваются такие группы симметрии, как циклическая, диэдральная и тетраэдральная. Наличие функции реконфигурации системы в случае отказа дает ей свойство самовосстановления.

При возникновении отказа можно осуществить реконфигурацию системы в соответствии с рис. 4.7 путём реконфигурации и замены отказавшей функциональной компоненты на резервную.

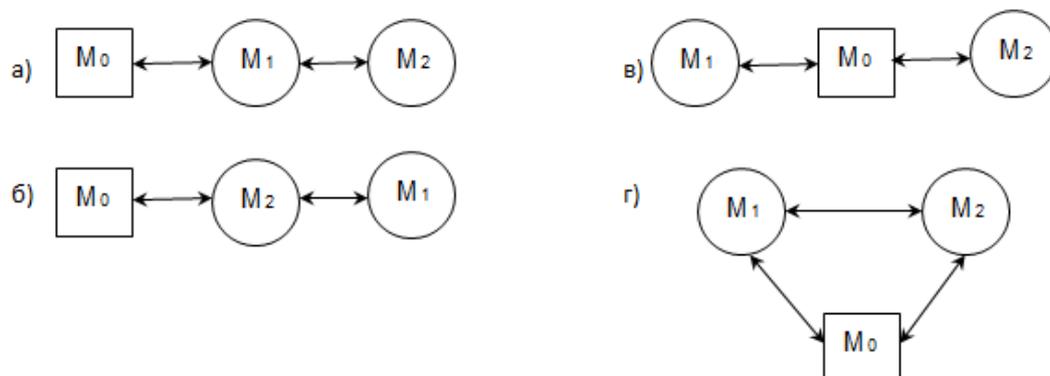


Рис. 4.7. Варианты избыточных структур с тремя блоками

Для системы, показанной на рис. 4.7, 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* графа, 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 диэдральной группы симметрии графа в виде таблиц реконфигурации (табл. 4.2-4.4).

Таблица 4.2

Реконфигурация при отказе M_1

Вариант реконфигурации	1				2			
Логическое имя до	M_0	M_1	M_2	M_3	M_0	M_1	M_2	M_3
Логическое имя после	M_1	M_0	M_2	M_3	M_1	M_0	M_3	M_2

Таблица 4.3

Реконфигурация при отказе M_2

<i>Вариант реконфигурации</i>	1				2			
Логические имена вершин перед реконфигурацией	M_0	M_1	M_2	M_3	M_0	M_1	M_2	M_3
Логические имена вершин после реконфигурации	M_2	M_3	M_0	M_1	M_3	M_2	M_0	M_1

Таблица 4.4

Реконфигурация при отказе M_3

<i>Вариант реконфигурации</i>	1				2			
Логические имена вершин перед реконфигурацией	M_0	M_1	M_2	M_3	M_0	M_1	M_2	M_3
Логические имена вершин после реконфигурации	M_2	M_3	M_1	M_0	M_3	M_2	M_1	M_0

Алгоритм поиска автоморфизмов графа для диэдральной группы симметрии приведён на рис. 4.8 (Блок-схема алгоритма поиска автоморфизмов графа для диэдральных групп симметрии) [190].

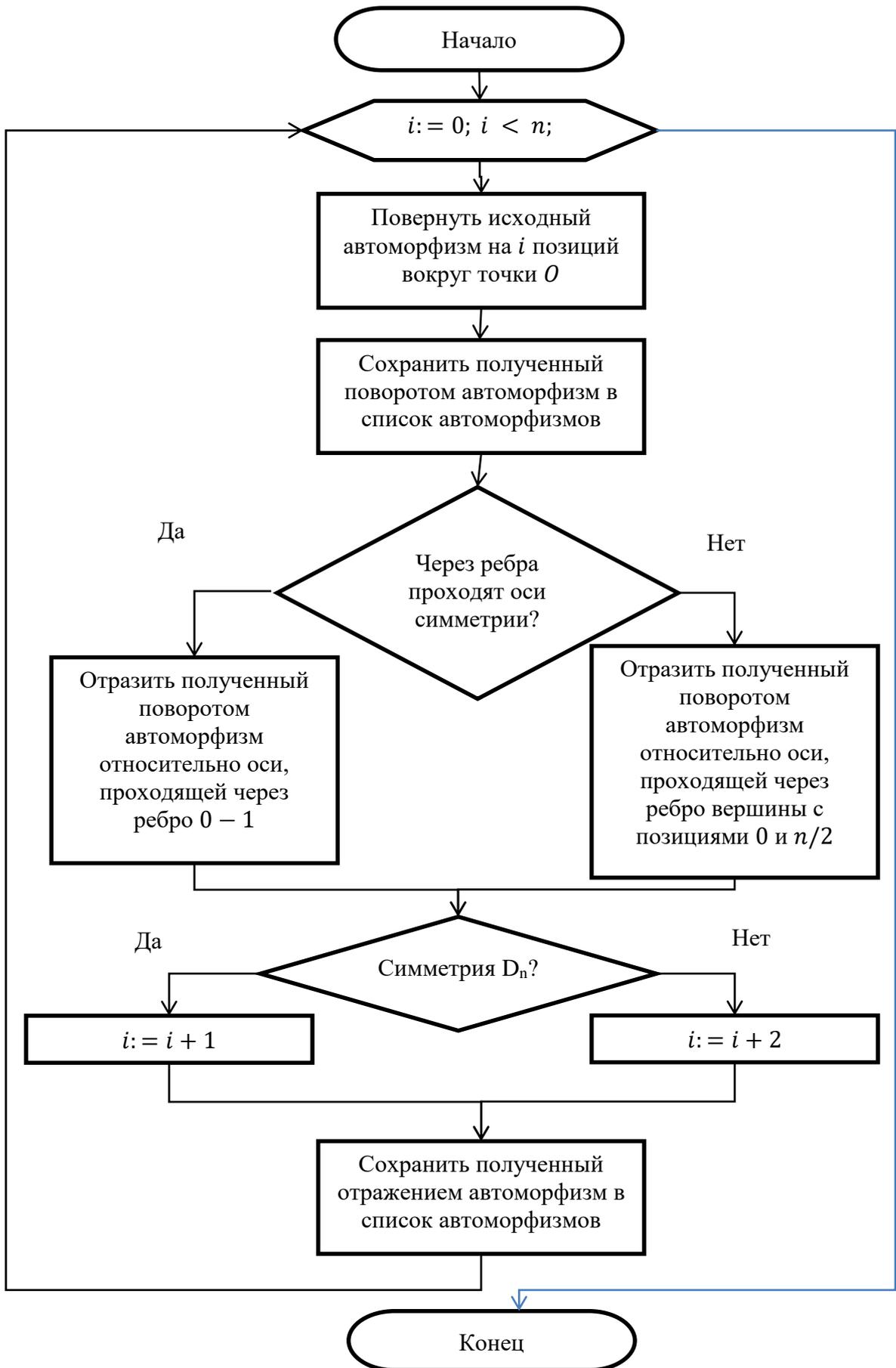


Рис. 4.8. Блок-схема алгоритма поиска автоморфизмов графа

Другой способ оптимального синтеза отказоустойчивых систем основан на графовых структурах. Предлагаются алгоритмы построения отказоустойчивой системы с использованием структуры обобщенного гиперкуба[29]. Основное преимущество этого подхода заключается в использовании "квазиполных" графов, которые позволяют создать отказоустойчивую и масштабируемую архитектуру, сохраняя информационные взаимосвязи в ней. Алгоритм построения расширенного обобщенного гиперкуба [35] позволяет проектировать технические и технологические объекты сложной структуры с увеличивающимся количеством вершин и увеличивающимся числом независимых связей между любыми парами вершин при сохранении числа соединений, что позволяет обеспечить масштабируемость структуры объектов.

Реализация отказоустойчивости требует значительных финансовых и ресурсных затрат. В современных условиях это свойство технических и технологических объектов является особенно важным для тех технических и технологических объектов, которые подвергаются повышенным требованиям во время эксплуатации.

4.3 Модель функционального синтеза экобезопасных объектов

С учетом ускоренного технологического развития и увеличения сложности научно-технического оборудования, что приводит к более коротким периодам обновления технических и технологических объектов, современные подходы к решению проблемы экобезопасности зачастую требуют кардинальных изменений. Вместо простого реагирования на негативные последствия, мы должны сосредоточиться на их предотвращении и оптимальный синтез экобезопасных технических и технологических объектов может стать решением данной проблемы. Ключевая особенность предлагаемой модели функционального синтеза экобезопасных технических и технологических объектов, заключается в том, что позволяет количественно оценить и оптимизировать степень использования ресурсов на ранних этапах проектирования и разработки объекта. Таким образом,

анализ воздействия на окружающую среду позволяет оценивать и управлять экобезопасностью технических и технологических объектов.

Предлагается следующий алгоритм функционального синтеза экобезопасных технических и технологических объектов на основе модифицированной ФС (рис. 4.9):

Первый этап заключается в анализе и оценке технического или технологического объекта как объекта утилизации. Проводится структурная декомпозиция объекта на основе методологии структурного моделирования SADT [79], в результате проведения которой выделяются элементы сложного объекта (блоки, агрегаты, узлы, детали и др.) более высокой детализации.

На **втором этапе**, с использованием методов модифицированной ФС (описанных в главе 2) осуществляется кодификация и поиск объектов-аналогов. Эти объекты могут быть как объектами-функционалами, так и объектами, подвергающиеся воздействию и факторов внешних воздействий. Это позволяет организовать эффективный поиск эквивалентов для последующего анализа.

Безусловно, данный алгоритм действенен при наличии базы систематизированных объектов. Важно отметить, что один и тот же объект может быть внесен в базу модифицированной ФС несколько раз. Основным критерием при выборе субъекта или материала является значение комплексного индекса экобезопасности объекта в расширенной таксономической формуле [104] состояния технического или технологического объекта.

Третий этап обеспечивает выбор и определение отдельных показателей утилизации на основе ранее проведенного анализа объекта утилизации, его структуры и материалов. Эти показатели могут включать в себя различные аспекты, такие как:

1. Степень применимости составляющих материалов и компонентов объекта;
2. Степень опасности и влияния объекта на окружающую среду после завершения его эксплуатации;

3. Оценка показателя углеродный след при утилизации, который охватывает все выбросы парниковых газов (ПГ), выделяемые в процессе утилизации объекта;

4. Другие сопоставимые показатели.

Эти параметры позволяют более точно оценить влияние объекта на окружающую среду и эффективность его утилизации в рамках стратегии обеспечения экобезопасности.

На **четвертом этапе** проводится экспертная оценка полученных показателей утилизации с использованием методов статистики [49]. После этого производится выбор базовых показателей утилизации технического или технологического объекта на основе нормированных коэффициентов. Затем определяется комплексный индекс экобезопасности объекта (*IEB*), который рассматривается как аддитивная функция. Этот индекс зависит от значений полученных показателей и их весовых коэффициентов, которые определяются для конкретного типа технического или технологического объекта.

$$IEB(N) = \sum_{i=1}^m F_i B_i \quad (4.11)$$

где N – номер варианта технического или технологического объекта;

m – количество единичных показателей утилизации;

B_i – значение оцениваемого показателя утилизации;

F_i – весовой коэффициент показателя утилизации.

Далее при проведении оптимального синтеза экобезопасных объектов производится выбор объектов-аналогов, определяемых на основе методов модифицированной ФС, с максимальными значениями комплексного индекса экобезопасности для каждого составного элемента объекта или объекта в целом [120].

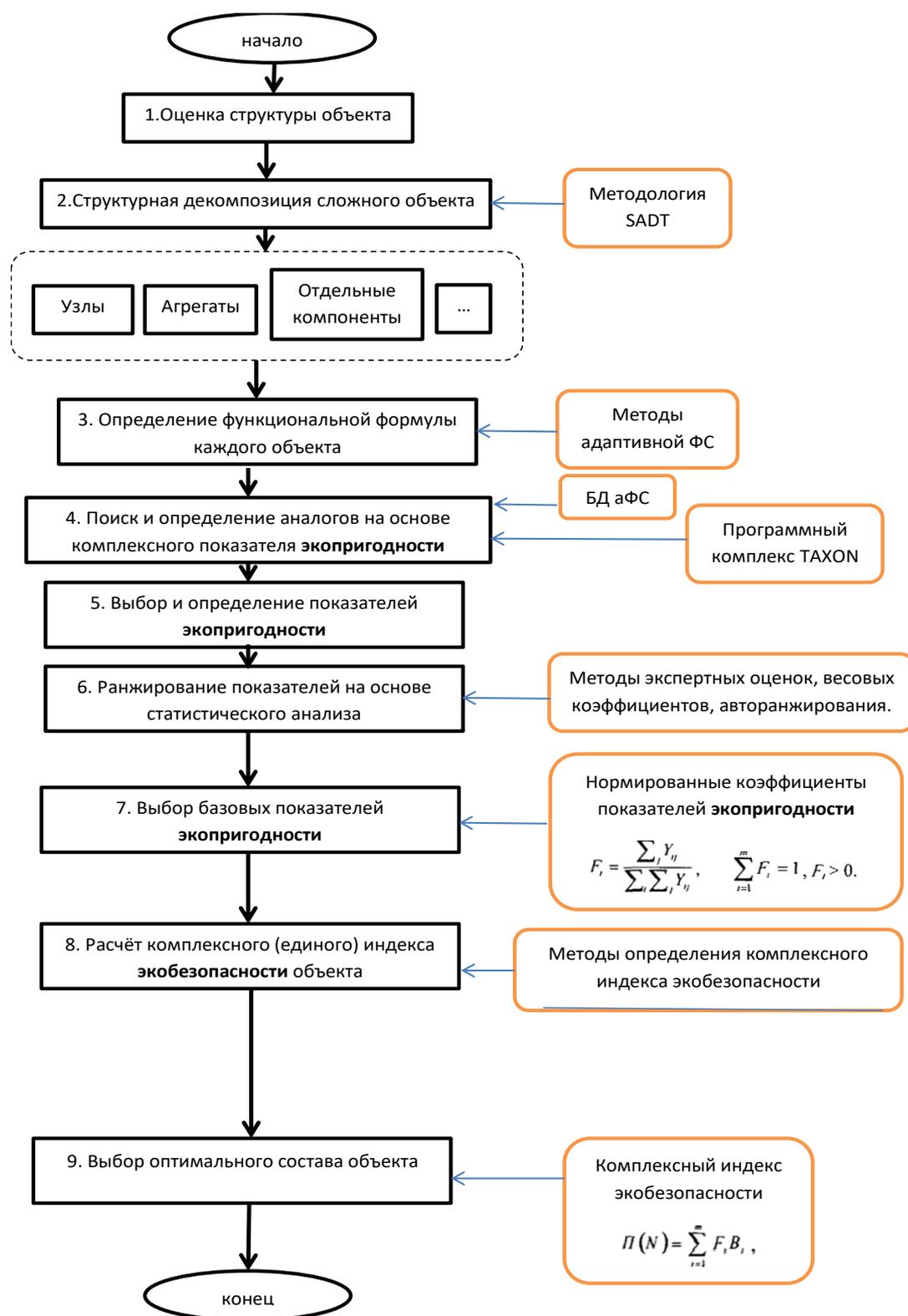


Рис. 4.9. Блок-схема алгоритма функционального синтеза экобезопасных объектов

$$IEB(N^*) = \max_{Si} (IEB(N)) \quad (4.12)$$

На **заключительном этапе** анализа, на основе комплексного индекса экобезопасности, делаются выводы о способности оцениваемого технического или технологического объекта к утилизации [93].

Предложенный алгоритм функционального синтеза экобезопасных объектов включает анализ объекта, который будет утилизирован, и его компонентов. На основе этого анализа формируются отдельные показатели утилизации, чьи количественные значения определяются с использованием статистических методов и принципов теории системного анализа. В дополнение к этому проводится экспертная оценка значимости этих показателей.

Основными преимуществами предложенного функционального синтеза экобезопасных объектов являются:

- возможность проведения оценки способности технических и технологических объектов к утилизации на этапах предпроектных и проектных работ;
- возможность представления утилизационной способности в форме общего количественного показателя (индекса экобезопасности);
- возможность сравнения различных вариантов проектируемых объектов, что позволяет разработчику выбирать оптимальный вариант, исходя из показателя индекса экобезопасности;
- применение модифицированной ФС позволяет обеспечить подбор аналога декомпозиционных функциональных и конструкционных материалов с максимальными значениями комплексного индекса экобезопасности для проектируемых технических и технологических объектов.

Модифицированная ФС (описанной в гл. 2) и разработанных БД на её основе, позволяет обеспечить подбор аналогов (агрегатов, комплектующих, компонентов), с наилучшими значениями комплексного индекса экобезопасности, что продемонстрировано на примере фрезерного станка «Корвет 82» в главе 5 «Практическая реализация интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов».

4.4 Выводы по главе 4

1. Выполнен оптимальный синтез контролепригодных технических и технологических объектов, на основе информационного критерия - коэффициента глубины диагностирования, который позволяет получить такое подмножество контрольных точек, которое определяют максимальное количество информации об объекте.

2. Предложена модель информационного синтеза контролепригодных объектов на основе метода динамического программирования, что позволило сократить объём необходимых вычислений по сравнению с обычным перебором состояний системы.

3. Разработана модель структурного синтеза отказоустойчивых объектов на основе алгебраических и графовых структур, позволяющая обеспечить работоспособное состояние технического и технологического объекта при отказе одного или нескольких функциональных блоков, элементов и других компонентов.

4. Предложена модель функционального синтеза экобезопасных технических и технологических объектов, на основе модифицированной функциональной систематики и комплексного индекса экобезопасности.

5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И ЭКОБЕЗОПАСНОСТЬЮ СОСТОЯНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

5.1 Обобщенная структурно-функциональная схема интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов

Представленная в главе 3 открытая система адаптивных моделей вычислений, включающая «мягкие», бионспирированные и прогностические, а также представленные в главе 4 модели оптимального синтеза контролепригодности, отказоустойчивости и экобезопасности, позволила разработать на основе методологии функционального моделирования IDEF0, обобщенную структурно-функциональную схему интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов (рис. 5.1 - 5.2).

Целью представленной обобщенной структурно-функциональной схемы является практическая реализация интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, что позволяет выстроить связи между подсистемами и этапами осуществления проектирования технических и технологических объектов. Точка зрения в представленной схеме (в соответствии с требованиями нотации IDEF0) – инженер-проектировщик технического и технологического объекта.

Новизна предложенной обобщенной схемы структурно-функциональной схемы интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов состоит в использовании открытой системы адаптивных моделей вычислений и аппаратно-программного комплекса интеллектуального управления в соответствии с условиями и свойствами решаемых задач, что показано далее на примерах промышленного применения технических и технологических объектов.

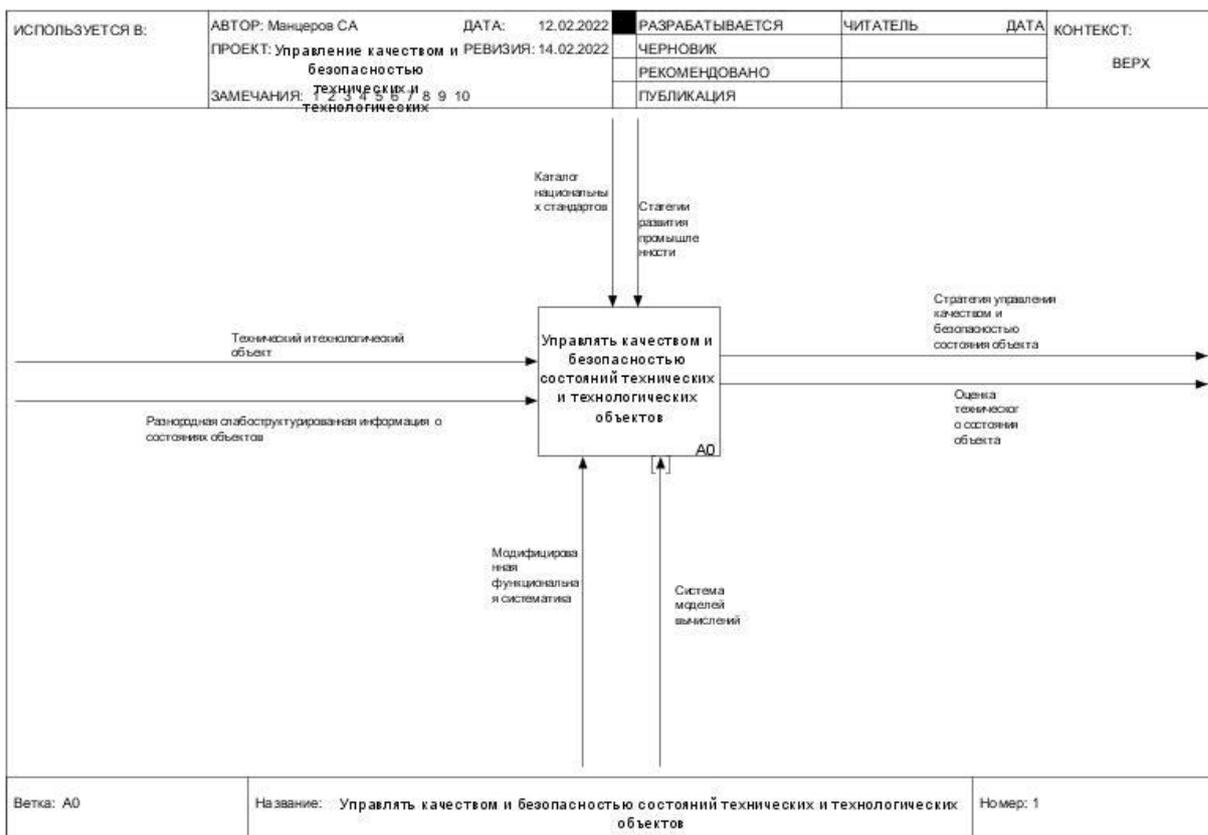


Рис. 5.1. Контекстная диаграмма обобщенной структурно-функциональной схемы интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов

Для дальнейшего исследования требуется учитывать на этапе проектирования такие характеристики объектов, как производительность, габариты и другие, что сейчас находится в стадии разработки.

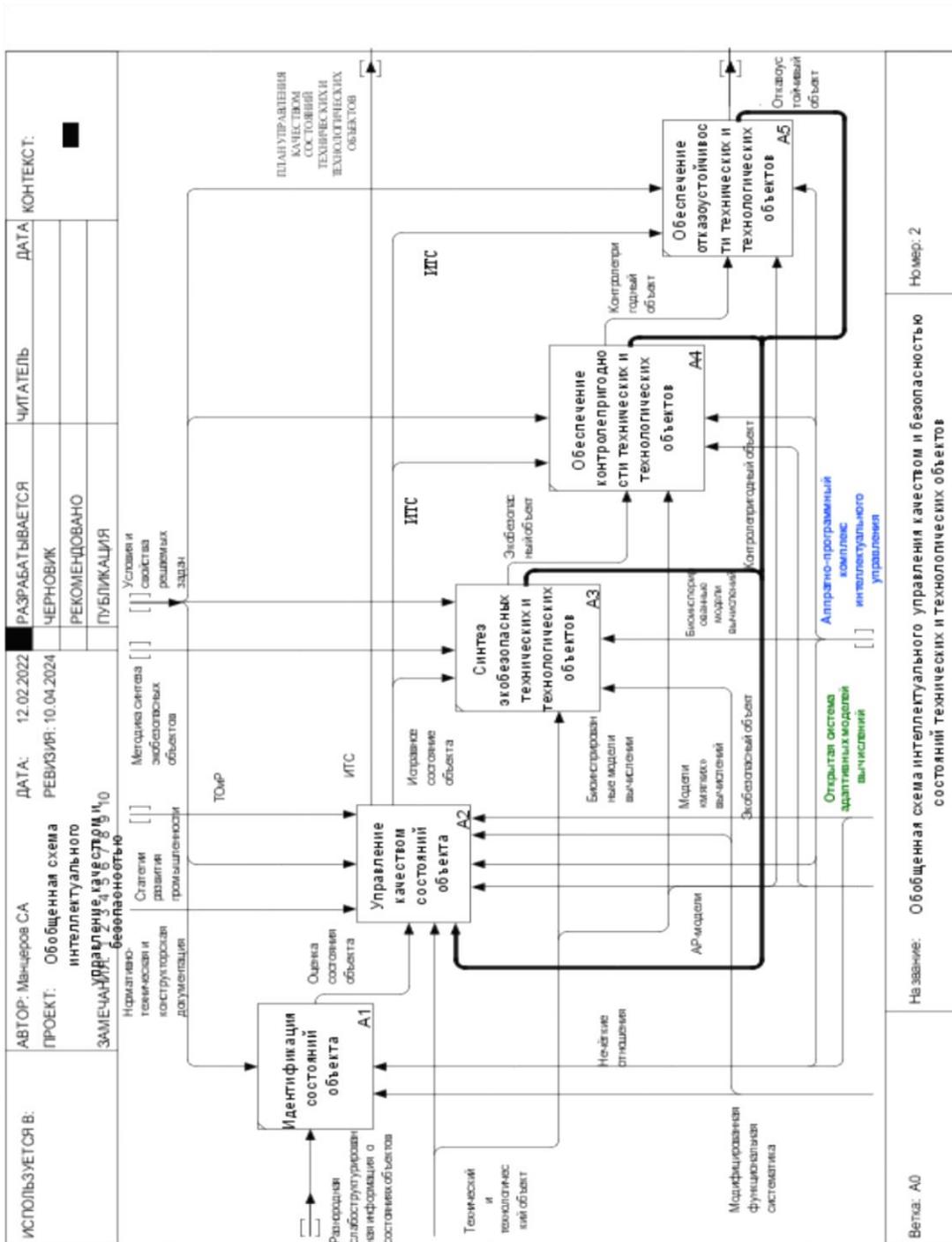


Рис. 5.2. Фрагмент обобщенной структурно-функциональной схемы интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов

5.2 Примеры технических и технологических объектов. Промышленные применения

5.2.1 Оборудование газотранспортного предприятия

Решена поставленная задача разработки и внедрения *интеллектуальной системы управления качеством состояний* (ИСУКС) промышленного оборудования в ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород». Представлены результаты, полученные с использованием разработанной и внедренной в опытную эксплуатацию ИСУКС [194].

ИСУКС промышленного оборудования позволяет рассмотреть состояние технических и технологических объектов в разрезах территориальных филиалов и подразделений предприятия (рис. 5.3) или групп оборудования (рис. 5.4).

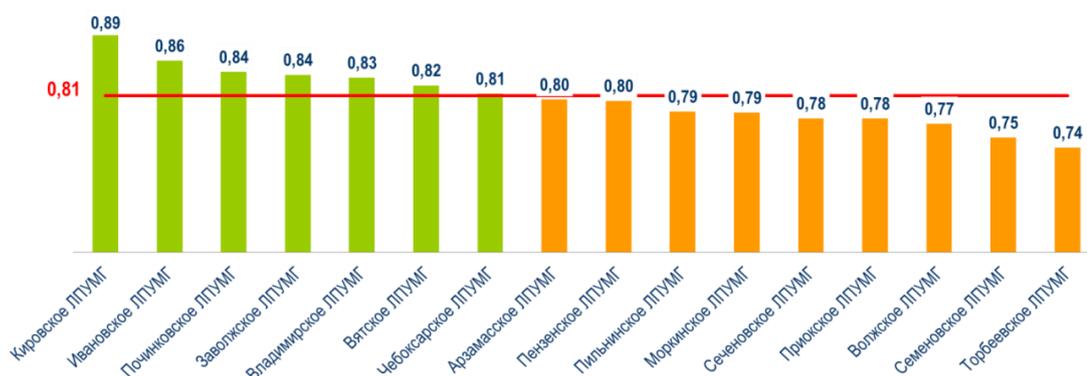


Рис. 5.3. ИТС территориальных филиалов и подразделений ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» в разрезе филиалов

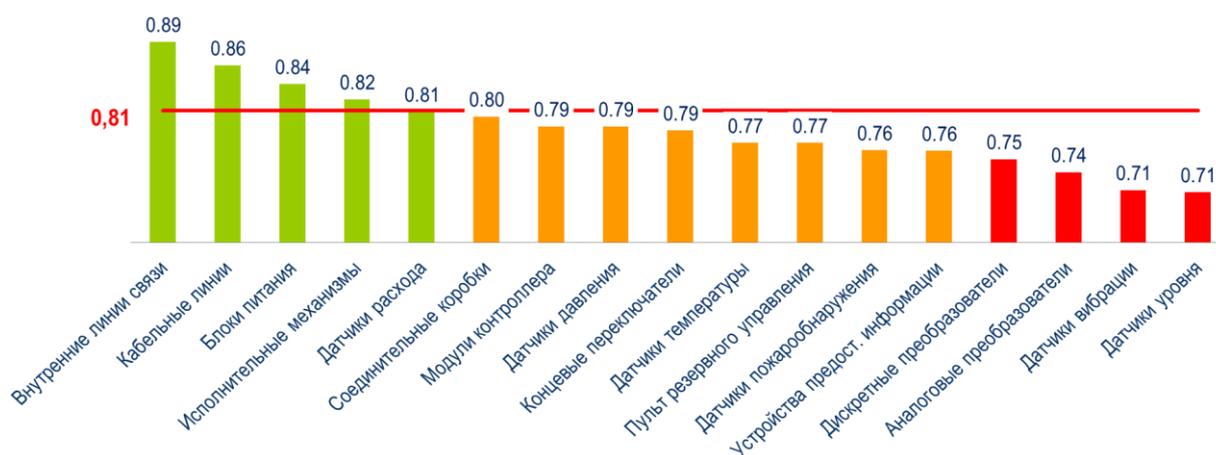


Рис. 5.4. ИТС групп оборудования

Для оценки качества технического состояния [197] конкретного элемента предусмотрена возможность просмотра его подробной диагностической карты. На рис. 5.5 представлена система управления газоперекачивающим агрегатом «А705-15-08М» [198], на которой отражены как общее значение ИТС всего объекта, так и значения ИТС составляющих его агрегатов и подсистем. Использование цветовой индикации для составляющих элементов на основе показателя ИТС, позволяет повысить информативность представленной диагностической карты.

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. 5.5. 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. 5.6. Фрагмент диагностической карты (уровень подсистемы)

На рис. 5.6 представлен фрагмент диагностической карты на общем уровне подсистемы «Блоки питания» [201]. Отражены все типы БП, и состояние (значение ИТС) каждого экземпляра в составе системы. Предусмотрена возможность мониторинга любого элемента данного объекта (конкретный экземпляр), чтобы оценить его текущее качество состояния, а также выполнить статистический анализ и оценку, как отдельного элемента, так и подсистемы, группы и всего объекта в целом.

Таким образом, руководитель подразделения или иное ЛПР, применяя разработанную систему, имеет доступ к полной и достоверной информации о ТС промышленного оборудования предприятия. При этом имеет место возможность составления актуальных планов проведения ТОиР, основанных на текущем состоянии элементов и подсистем, что позволяет существенно снизить затраты на обеспечение и складирование запасных частей, а также трудозатраты.

В результате внедрения ИСУКС в ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» количество инцидентов (отказов) на рассматриваемом оборудовании за год до внедрения ИСУКС и после полного года опытной эксплуатации ИСУКС снизилась примерно на 12% [196].

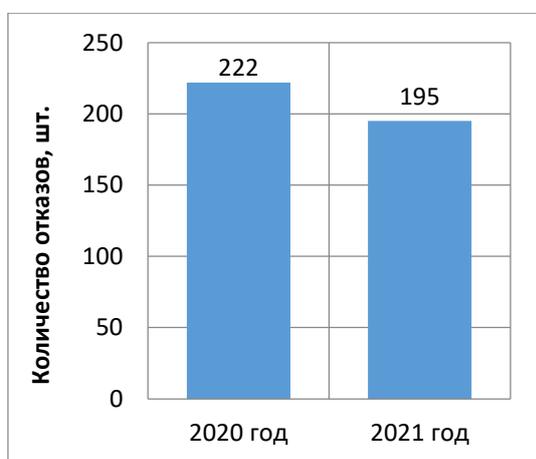


Рис. 5.7. Результаты опытной эксплуатации ИСУКС на основе сравнения отказов оборудования

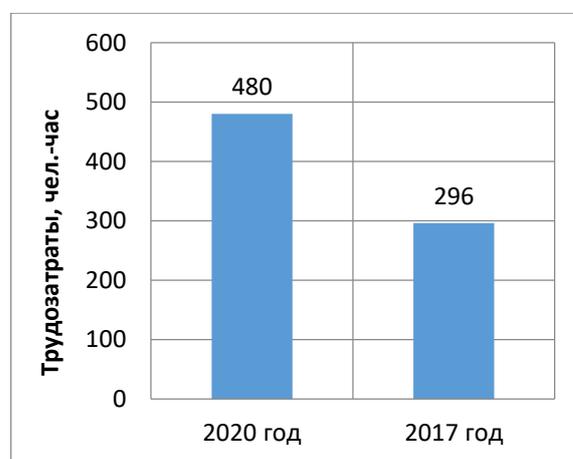


Рис. 5.8. Результаты опытной эксплуатации разработанной ИСУКС на основе сравнения трудозатрат

На рис. 5.8 показано сравнение трудозатрат на анализ и обработку информации при разработке и корректировке планов по ТОиР оборудования за полный год опытной эксплуатации системы, в результате сокращение составило около 38%, при этом необходимо отметить, что существенная часть трудозатрат определяется привлечением высококвалифицированных сотрудников и инженеров.

Таким образом, можно заключить, что ИСУКС демонстрирует свою эффективность путем существенного снижения числа отказов промышленного

оборудования и уменьшения трудозатрат на анализ, обработку информации и принятие решений, что свидетельствует о высокой эффективности управления качеством состояний технических и технологических объектов на промышленном предприятии благодаря интеллектуальному управлению на основе ИТС.

5.2.2 Импульсный блок питания

Решена поставленная задача обеспечения контролепригодности импульсного блока питания (БП) с электронным управлением, как технического объекта, наиболее часто выходящего из строя по статистике опытной эксплуатации ИСУКС.

Для примера оценки технического состояния данного объекта, входящего в перечень промышленного оборудования предприятия ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» (рис 5.5 – 5.6). Рассмотрим импульсный БП, который характеризуется следующим набором основных технических параметров, определенных в соответствии с нормативно-технической документацией [198] и отражающих состояние конкретного экземпляра исходного технического объекта (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Контролируемые параметры импульсного БП

i	Параметр	Текущее значение x_i	Минимальное допустимое значение $x_i^{min \text{ доп.}}$	Максимальное допустимое значение $x_i^{max \text{ доп.}}$
1	Срок эксплуатации, лет	5	0	9
2	Выходное напряжение, В	23,3	23,0	24,5
3	Пульсации выходного напряжения, мВ	360	0	1000
4	Средняя наработка до отказа, тыс. ч.	8,4	12	-

Примеры характеристических функций принадлежности соответствующих физических параметров рассмотренного технического объекта, приведены в табл. 5.2.

Приведен расчет ИТС импульсного БП. Его текущее ТС составляет:

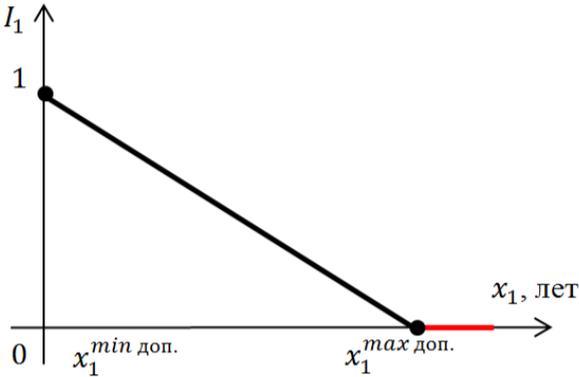
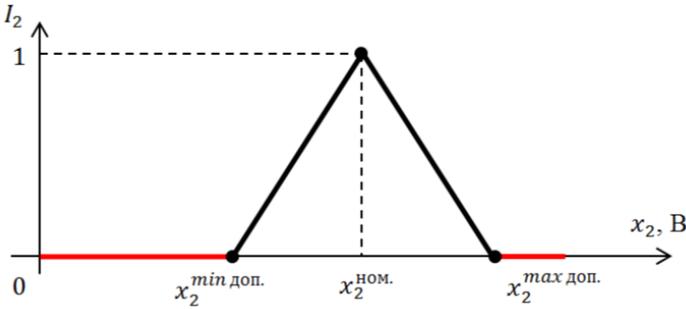
$$C = \{0,40; 1,00; 0,60; 0,46\},$$

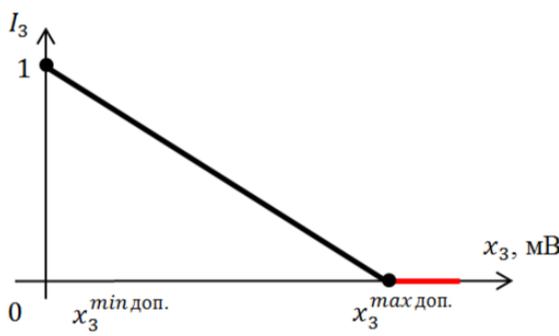
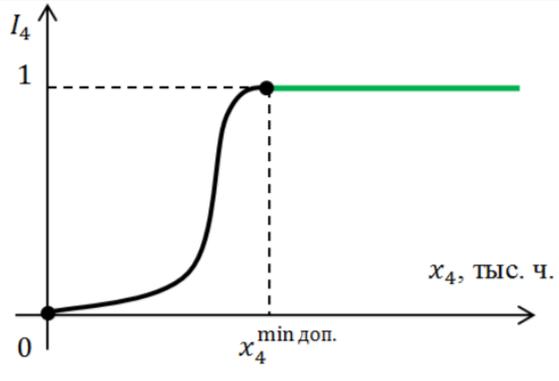
где $I_1 = 0,40$ – ИТС блока питания по параметру «Срок эксплуатации»,

$I_2 = 1,00$ – ИТС блока питания по параметру «Выходное напряжение»,

Таблица 5.2

Функции принадлежности параметров БП

i	Советующая функция принадлежности $I_i(x_i)$	ИТС I_i
1		0,40
2		1,00

3		0,60
4		0,46

$I_3 = 0,60$ – ИТС блока питания по параметру «Пульсации выходного напряжения»,

$I_4 = 0,46$ – ИТС блока питания по параметру «Средняя наработка до отказа»,
 Общий ИТС всего технического объекта (импульсный БП), рассчитанный по формуле (2.18) будет равен $I = 0,62$.

Дополнение приведенных технических параметров соответствующими весовыми значениями коэффициентов, позволяет обеспечить более точную оценку технического состояния импульсного БП в конкретных условиях его эксплуатации. Существует возможность оценки ТС импульсного БП по одному из известных параметров, характеризующих качество состояний объекта. Использование в качестве такого параметра тепловых характеристик объекта представляет большой интерес, так как процесс измерения данного характеристического параметра БП очень легко реализовать, в том числе в производственных условиях. В качестве средства измерения могут быть использованы доступные портативные тепловые измерительные приборы (рис. 5.9).

Для установления текущего ТС импульсного БП и получения прогноза с помощью модифицированных авторегрессионных моделей вычислений, необходимо знать:

- математическую модель, характеризующую состояние объекта, на основании которой будет получено АР-модель для компоненты температуры;
- количество точек, по которым аппроксимируется решение;
- значения параметра температуры, входящей в состав системы ДУ.



Рис. 5.9. Тепловые карты электронного блока во время испытаний

Необходимо отметить, что для технических и технологических объектов сложной структуры, к которым относится и импульсный БП необходимо установить значения параметра температуры для каждой из составляющих компонентов (рис. 5.9).

Осуществление подобной оценки ТС и установление прогноза с помощью АР-модели для компоненты характеризующей показатель температуры, является весьма актуальным для многих технических и технологических объектов, т.к. не требует получения значений для других параметров, характеризующих состояние объекта, получение которых зачастую или невозможно (если изначально разработчики не предусмотрели, на этапе проектирования подобную возможность обеспечения контролепригодности), или является трудоёмким и дорогостоящим процессом.

Проведение исследований в данной области является дальнейшей задачей.

Для проведения технической диагностики импульсного БП необходимо обеспечить его контролепригодность. В соответствии с методами обеспечения контролепригодности, изложенными в п. 4.1, предлагается использовать информационный критерий глубины поиска дефекта импульсного БП, на основе его структурной схемы (рис. 5.10).

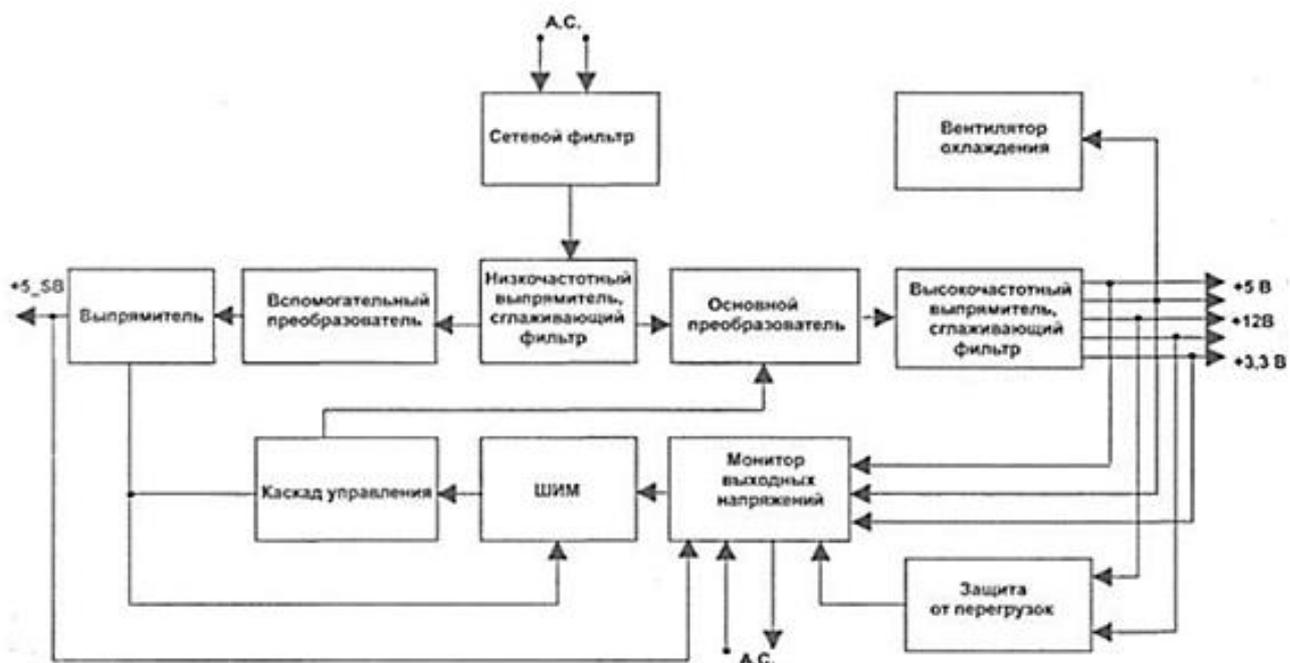


Рис. 5.10. Структурная схема импульсного БП

На основании рассмотренного ранее алгоритма УПД (гл. 4.1), предлагается определить минимальное количество контрольных точек, необходимое для обеспечения заданной глубины поиска дефекта. Это связано с тем, что организация контрольных точек даже на этапе проектирования технического объекта (входные и выходные напряжения, пульсации) является весьма трудоемким и затратным процессом.

В результате предлагается следующая логическая схема БП (рис. 5.11), на основании структурной схемы (рис. 5.10).

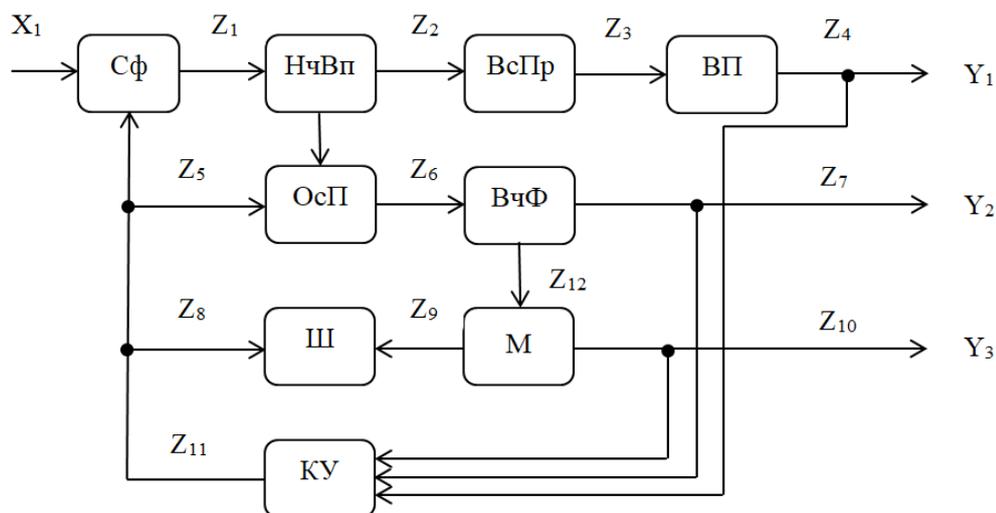


Рис. 5.11. Логическая схема БП,

где Сф - сетевой фильтр; НчВп – низкочастотный выпрямитель, сглаживающий фильтр; ОсП – основной преобразователь; ВсПр - вспомогательный преобразователь; ВчФ - высокочастотный выпрямитель, сглаживающий фильтр; ВП – выпрямитель; Ш – широтно-импульсный модулятор; М – монитор выходных напряжений; КУ – каскад управления по обратной связи.

Далее сформируем ТФН [185], на основании имеющейся статистики фиксирования отказов импульсного БП (статистика опытной эксплуатации ИСУКС), описания их причин и нормативно-технической документации, которая приведена в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Таблица функций неисправностей

П	Y								C(П)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0	0	0	1	1	1	1	11
2	0	0	1	1	0	0	1	1	6
3	0	1	0	0	0	0	1	1	5
4	0	0	1	0	1	0	0	1	3
5	1	0	0	1	0	0	1	1	6
P(y)	0,2	0,15	0,2	0,14	0,16	0,09	0,04	0,02	

Данный объект имеет 8 блоков и допустима организация 5 точек контроля (блоком сетевой фильтр можно пренебречь).

Определяем коэффициент глубины поиска дефекта[93] для всего допустимого множества контрольных точек, как соотношение энтропий исходной системы к значению, в результате

$$H(S) = 1,2714; H(Y) = 1,1256; \text{ тогда } K = 0,8853.$$

Далее из множества контрольных точек последовательно отбрасываем по одной точке и для подмножества оставшихся, подсчитываем коэффициент глубины поиска дефекта. Результаты вычислений приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Результаты вычислений

Номер отбрасываемой контрольной точки	Совокупность оставшихся контрольных точек	Значение коэффициента глубины поиска дефекта (K)
1	2, 3, 4, 5	0,722
2	1, 3, 4, 5	0,734
3	1, 2, 4, 5	0,672
4	1, 2, 3, 5	0,702
5	1, 2, 3, 4	0,652

Из подмножеств, полученных контрольных точек, которые остаются, убираем ещё одну точку, и тогда для подмножеств, состоящих из 3-х точек контроля, подсчитываем коэффициент глубины поиска дефекта. Фиксируем точки, несущие минимум информации в результате проведения процесса диагностирования. Результаты полученных вычислений приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Результаты вычислений

Номер первой отбрасываемой контрольной точки	Номер второй отбрасываемой контрольной точки	Совокупность оставшихся контрольных точек	K	Максимальное значение K	Оптимальные пары отбрасываемых контрольных точек
1	2	3 4 5	0,549	0,549	1, 2
	3	2 4 5	0,515		
	4	2 3 5	0,527		
	5	2 3 4	0,519		
2	1	3 4 5	0,553	0,559	2, 3
	3	1 4 5	0,559		
	4	1 3 5	0,523		
	5	1 3 4	0,516		
3	1	2 4 5	0,528	0,571	3, 4
	2	1 4 5	0,524		
	4	1 2 5	0,571		
	5	1 2 4	0,481		
4	1	2 3 5	0,536	0,576	3, 4
	2	1 3 5	0,517		
	3	1 2 5	0,576		
	5	1 2 3	0,539		
5	1	2 3 4	0,521	0,539	4, 5
	2	1 3 4	0,505		
	3	1, 2, 4	0,494		
	4	1, 2, 3	0,539		

Из каждого подмножества, состоящего из 3-х контрольных точек, отбрасываем ещё одну точку и для подмножеств, состоящих из 2-х точек,

подсчитываем коэффициент глубины поиска дефекта. Закрепляем тройки отброшенных контрольных точек так, чтобы оставшиеся точки в совокупности доставляли максимальное количество информации. Результаты вычислений приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Результаты вычислений

Пары точек контроля, отброшенных на предыдущих шагах	Номер точки контроля, отбрасываемой на данном шаге	Совокупность оставшихся контрольных точек	K	Максимальное значение K	Оптимальные тройки отбрасываемых контрольных точек
1, 2	3	4, 5	0,41	0,41	1, 2, 3
	4	3, 5	0,347		
	5	3, 4	0,365		
2, 3	1	4, 5	0,41	0,41	1, 2, 3
	4	1, 5	0,383		
	5	1, 4	0,368		
3, 4	1	2, 5	0,388	0,393	3, 4, 5
	2	1, 5	0,383		
	5	1, 2	0,393		
4, 5	1	2, 3	0,357	0,393	3, 4, 5
	2	1, 3	0,337		
	3	1, 2	0,393		

Наконец из подмножества, состоящего из последних контрольных точек, отбрасываем ещё одну точку и для оставшейся точки подсчитываем коэффициент глубины поиска дефекта. Закрепляем отброшенные точки так, чтобы оставшаяся доставляла максимальное количество информации. Результаты вычислений приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Результаты вычислений

Контрольные точки, отброшенные на предыдущих шагах	Номер точки, отбрасываемой на данном шаге	Номер оставшейся точки	K	Максимальное значение K	Оптимальные наборы отбрасываемых точек
1, 2, 3	4	5	0,197	0,213	1, 2, 3, 5
	5	4	0,213		
3, 4, 5	1	2	0,207	0,207	1, 3, 4, 5
	2	1	0,188		

По результатам строится вычислительная схема. Для рассматриваемого примера алгоритмическая вычислительная схема представлена на рис. 5.12.

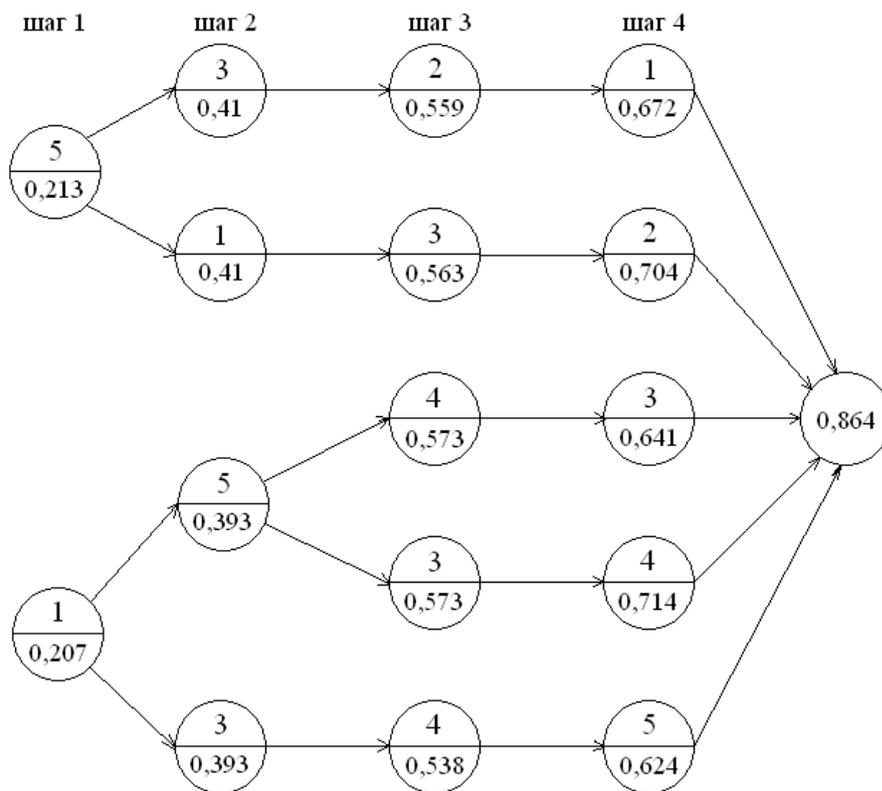


Рис. 5.12. Пример вычислительной схемы для импульсного БП методом динамического программирования

Задав количество контрольных точек, можно по вычислительной схеме определить максимальное значение коэффициента глубины поиска дефекта K и

соответствующее этому значению подмножество контрольных точек. Например, мы хотим использовать только две точки. Для этого обращаемся ко второму шагу и находим кружок с максимальным значением глубины поиска дефекта K . Начиная с этого кружка, двигаясь по стрелкам, находим номера контрольных точек, которые нужно отбросить. Для рассмотренного примера имеем, что максимально возможное значение глубины поиска дефекта при использовании двух точек равно $K=0,619$, при этом нужно отбросить 2, 3 и 4 точки контроля, т.е. будем использовать 1 и 5 точки контроля. Аналогично, задав значение глубины поиска дефекта K , по вычислительной схеме можно определить минимальное множество точек.

Таким образом, определяется решение задачи оптимального синтеза контролепригодного импульсного БП для обеспечения заданной глубины поиска дефекта при минимальном множестве контрольных точек.

5.2.3 Технологический процесс гидрирования этан-этиленовой фракции

Рассматривается поставленная задача *интеллектуального управления технологическим объектом* – технологическим процессом гидрирования этан-этиленовой фракции.

Комплекс гидрирования этан-этиленовой фракции (ЭЭФ) предназначен для выделения из смеси углеводородов $C_2:C_9$ методом ректификации, очистки ее от ацетиленовых соединений гидрированием и осушки на цеолитах в осушителях (рис. 5.15) [205].

Изотермические реакторы (Р-2) и адиабатические реакторы (Р-4) предназначены для очистки ЭЭФ от ацетиленовых соединений методом гидрирования и показаны на рис. 5.15.

В результате нарушений норм технологического режима реакции гидрирования ЭЭФ проходят некорректно, что приводит к появлению брака на выходе из узла гидрирования, что в свою очередь приводит к существенным

экономическим потерям. В ходе процесса гидрирования ЭЭФ есть вероятность «сверхгидрирования» этилена, и превращения в этан, что отрицательно сказывается на его качественных характеристиках и влечет за собой необходимость корректировок в работе технологического оборудования после узла гидрирования.

Для решения этой проблемы предлагается интегрировать в систему управления реакторами модуль интеллектуального управления, разработанный с использованием "мягких" моделей вычислений. Этот модуль будет анализировать данные о входящем сырье и предупреждать о возможном браке на выходе из узла гидрирования, а также снижать риск перегидрирования этилена в этан. Интеллектуальный модуль будет служить дополнением к основной системе управления, что позволит автоматизировать управление узлом гидрирования ЭЭФ.

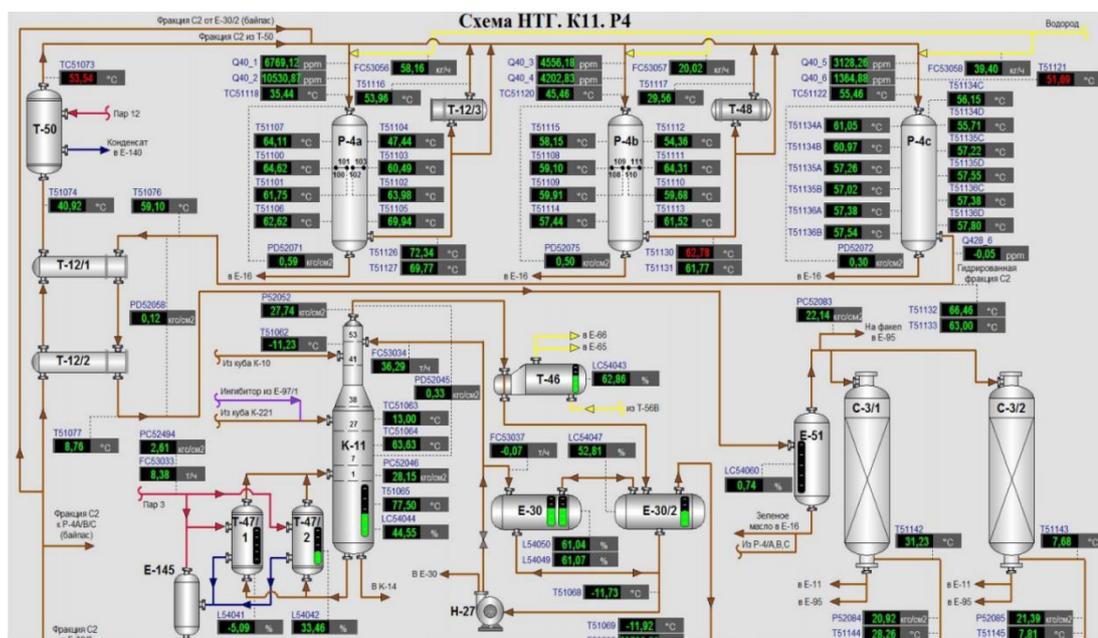


Рис. 5.13. Принципиальная мнемосхема узла гидрирования ЭЭФ в реакторе Р-4/А,В,С

Реакция гидрирования проходит в трех последовательных секциях реактора Р-4/А,В,С (рис. 5.13). Для снижения эффекта «перегидрирования», снижения общего перепада (разницу) температуры по реакторам (ТD), реализована система интеллектуального управления технологическим процессом.

Контроль за режимом работы реакторов осуществляется путем изменения верхних/нижних границ манипулируемых параметров в пределах установленных норм технологического режима, что определяется нормативно-технологической

документацией (табл. 5.8 и 5.9).

Таблица 5.8

MV-Манипулируемые параметры

№ п/п	Номер позиции	Описание позиции
1	FC53056.SV	Расход водорода в Р-4а
2	TC51118.SV	Температура на входе в Р-4а
3	FC53057.SV	Расход водорода в Р-4б
4	TC51120.SV	Температура на входе в Р-4б
5	FC53058.SV	Расход водорода в Р-4с
6	TC51122.SV	Температура на входе в Р-4с

Таблица 5.9

CV-Контролируемые параметры

№ п/п	Номер позиции	Описание позиции
1	Виртуальный анализатор	Ацетилен после Р-4а
2	T51126^	Температура на выходе из Р-4а
3	TD 1STAGE.PV	Разница температур на входе и выходе из Р-4а(расчетный тег)
4	T51130^	Температура на выходе из Р-4б
5	TD 2STAGE.PV	Разница температур на входе и выходе из Р-4б(расчетный тег)
6	T51130^	Температура на выходе из Р-4с
7	FC53056. SV	Расход водорода в Р-4а МИНИМИЗАЦИЯ

Схемой предусмотрено в период пуска установки часть ЭЭФ после Р-2/1,2, Р-4/а,в,с после сепаратора Е-51 подавать в виде рецикла на вход т/а М-1, что способствует быстрому накоплению углеводородов в системах низкотемпературного газоразделения, при этом сбросы ЭЭФ которые выводятся во внешнюю среду, существенно уменьшаются.

Предусмотрена световая и звуковая сигнализация при закрытии (открытии) клапанов-отсекателей UV 56046, UV 56030, UV 56044, при открытии (закрытии) отсекаателя UV 56031 (рис. 5.14).

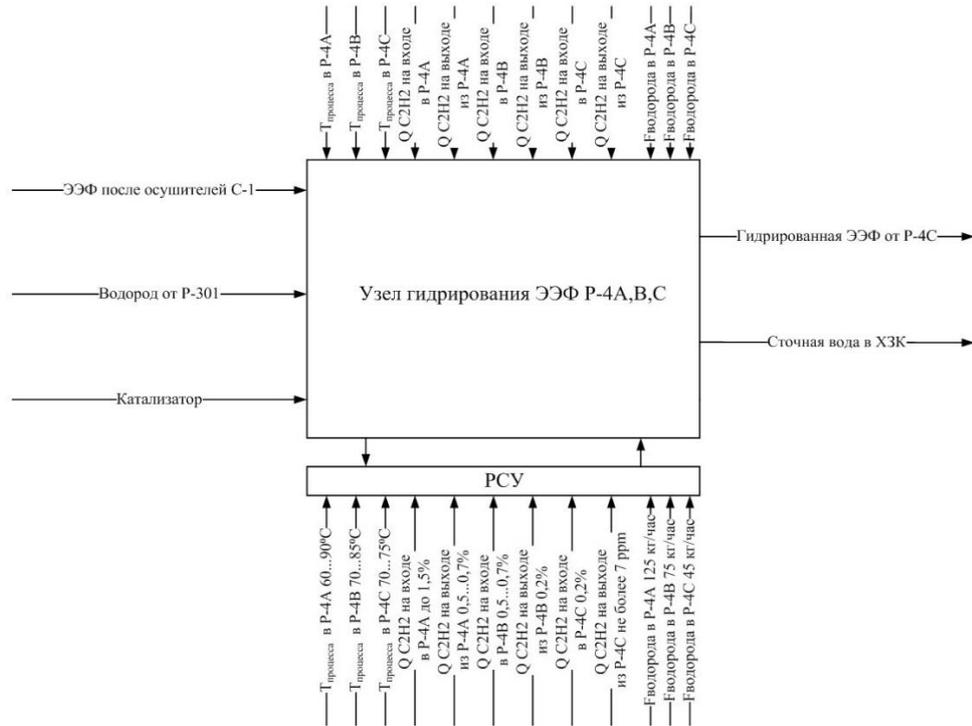


Рис. 5.14. Структурная схема технологического объекта управления

Технологический процесс в реакторах Р-4А и Р-4В основывается на технологическом регламенте установки низкотемпературного гидрирования. Для управления реакторами гидрирования было предложено использовать нейросетевые модели вычислений. Ниже приведены фрагменты исходных данных, используемых для обучения нейронной сети, представленные в таблицах 5.10 – 5.11.

Таблица 5.10

Фрагмент входных параметров системы для ИНС по реактору Р-4А

	Содержание CO ₂ в пирогазе	H ₂ на входящий.Р-4а	Концентрация C ₂ H ₂ на вх. Р-4а	Расход ВСГ в Р- 4а	Температура в слое катализатора в Р- 4а	Температура в слое катализатора в Р- 4а	Температура в слое катализатора в Р- 4а
Тех.	Q440	QT40_	QT40_2	FT53	TE51107	TE51100	TE51101
Ед.	ppm	ppm	ppm	кг/ч	°С	°С	°С
1	227,37	15634,	11167,38	82,78	95,22	96,56	97,95
2	253,26	17586,	11020,60	83,16	94,26	95,51	96,94
3	275,75	13108,	11155,49	81,76	93,28	94,57	96,00
4	264,98	14474,	11313,35	82,57	93,46	94,71	96,16

Таблица 5.11

Пример выходных параметров системы для ИНС по реактору Р-4А

	Н ₂ на выходе Р-4А	Концентрация С ₂ Н ₂ на выходе Р-4А	Этилен на входе в Р-4а	Этилен на входе в Р-4б
Тех. позиция	QT40_3	QT40_4		
Ед. измерения	ppm	ppm	%	%
1	16166,55	6711,71	77,50	76,50
2	16115,30	6906,16	77,50	76,50
3	16225,60	6175,40	77,50	77,00
4	15608,74	6597,85	77,50	77,00
5	15392,99	6698,02	77,50	77,00

Таблица 5.12

Описание параметров системы

№	Входные параметры	Описание
1	СО ₂ QT440	При превышении норм значительно снижается срок службы катализатора в реакторах – экономические потери
2	Содержание Н ₂ на входе в Р-4А	Контроль величины для ведения режима в реакторе Р-4А
3	Содержание С ₂ Н ₂ на входе в Р-4А	Контроль параметра для ведения режима в Р-4А: дозировки Н ₂ , регулирования температуры ЭЭФ на входе в Р-4А
4	Расход Н ₂ в Р-4А	Контроль и регулирование процесса в реакторе Р-4А
5	Температура в слое катализатора Р-4А	Контроль правильности протекания реакции, в случае отклонения от норм – перегидрирование этилена в этан - брак
Выходные параметры		
1	Содержание Н ₂ на выходе из Р-4А	Контроль параметра для дозировки Н ₂ в Р-4В, показатель правильности реакции в Р-4А, превышение норм – риск экономических потерь
2	Содержание С ₂ Н ₂ на выходе из Р-4А	Контроль параметра для дозировки Н ₂ в Р-4В, показатель правильности реакции в Р-4А, превышение норм – риск брака
3	Перепад температур вход/выход Р-4А	Контроль параметра, перепад более 35 градусов – нарушение норм технологического режима, показатель плохого катализатора
4	Перегидрирование этилена в этан в Р-4А	Показатель перегидрирования этилена в этан в Р-4А – экономические потери, образование зеленого масла

Всего было обучено 2 варианта архитектур ИНС [209]. Вариант с двумя слоями представлен на рис. 5.15.

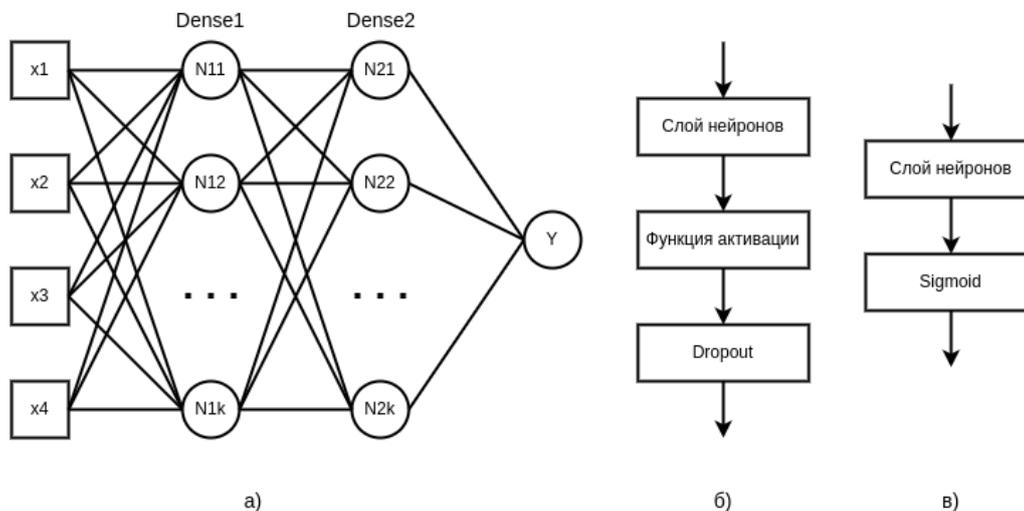


Рис. 5.15. Вариант архитектуры ИНС с двумя слоями:

a – схема архитектуры нейронной сети, *б* – схема скрытого слоя,

в – схема выходного слоя нейронов

Использовался многослойный персептрон с двумя открытыми полносвязными слоями. В табл. 5.13 приведены итоговые параметры ИНС с показателем точности.

Таблица 5.13

Параметры нейронной сети точности

Характеристика	Значение
Число нейронов в скрытом слое	32
Используемая ФА скрытых слоев	tanh
Число нейронов слоя Dropout	0.1
Скорость обучения	0.00004
Применяемый алгоритм	SGD
Функция ошибки	Focal Loss
Значение коэффициента скорости обучения на эпоху	1.0
Эпоха применения коэффициента скорости обучения	2
Точность	87.9%

Проведенное моделирование работы, представленной ИНС позволяет сделать вывод о необходимости применения сети с двумя (и, возможно, более) слоями.

Предполагается, что недостаточно высокие показатели точности обусловлены ограниченным количеством примеров в обучающей и тестовой выборках, а также недостаточным покрытием различных вариантов примеров в наборе данных.

Затем были задействованы нейро-нечёткие модели вычислений, а именно модуль ННК [127], использующий в качестве ФА функцию гиперболического тангенса, описанный в разделе 3.1.3. На рис. 5.16, 5.17 приведены итоговые графики обучения для обыкновенной ИНС и для ННК соответственно:

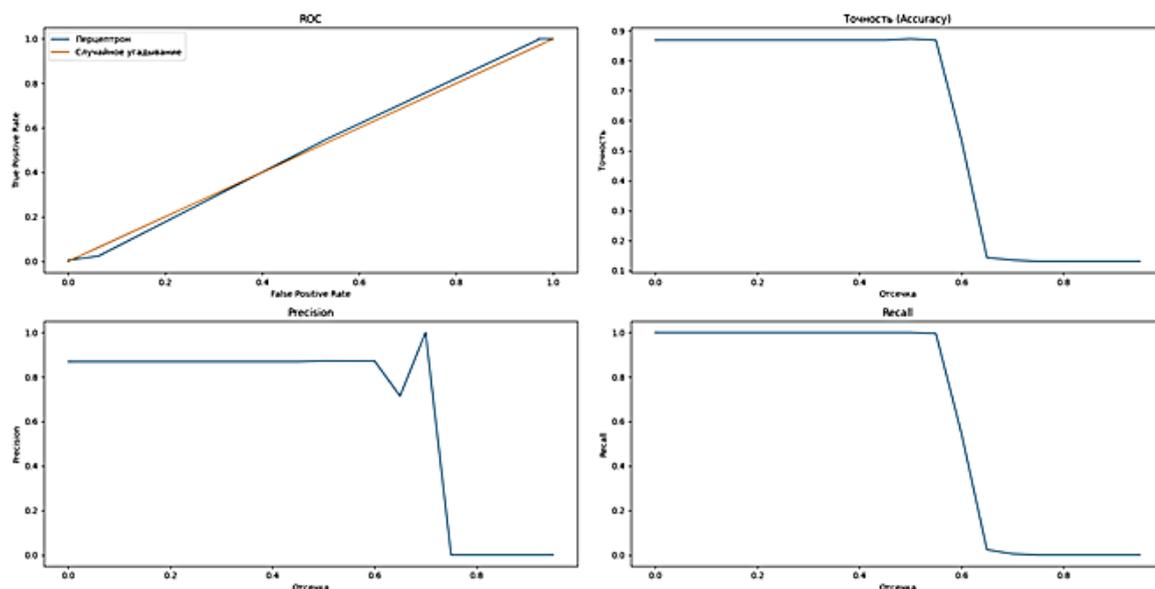


Рис. 5.16. Графики ROC (Receiver Operating Characteristic), точности(accuracy), Precision и Recall

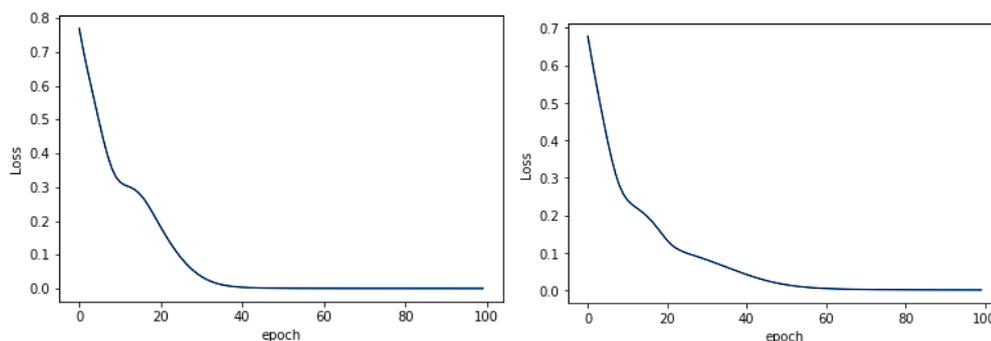


Рис. 5.17. Графики обучения для обыкновенной ИНС и для ННК

В результате итоговая ошибка обучения составила 0.00055866 для ИНС и 0.00048431 для модуля ННК. Это означает, что модуль ННК обеспечивает требуемую точность быстрее и с меньшей ошибкой. Интеграция интеллектуального модуля на основе ННК в систему управления реакторами позволила анализировать данные по входящему сырью, предотвращать появление брака на выходе из узла гидрирования и снижать риск перегидрирования этилена в этан. Модуль ННК интегрируется в виде отдельного модуля основной системы управления, что позволяет обеспечить интеллектуальное управление узлом гидрирования ЭЭФ.

5.2.4 Технологический процесс наплавки металла

Рассматривается задача *интеллектуального управления* технологическим процессом наплавки металла на гибридном обрабатывающем комплексе, решающем задачи аддитивного выращивания и последующей механической обработки.

Наплавка металла применяется для восстановления геометрии изношенных деталей машин и механизмов, формирования упрочняющих слоев металла на поверхности изделий и создания биметаллических структур [211]. Технологический процесс наплавки металла представляет собой особый вид сварочных работ, и к нему применимы основные требования, предъявляемые к проведению сварочных работ.

Технология наплавки металла должна обеспечивать минимальное воздействие на базовый слой металла, чтобы не испортить заготовку или деталь, и в тоже время контролировать качество нового слоя. Суть данного технологического процесса состоит в равномерном наплавлении валиков металла определенной длины [212]. Из которых в дальнейшем формируется единый металлический слой требуемой толщины.

Данная технология используется как для нанесения защитных или износостойких покрытий, так и для ремонтно-восстановительных работ для технических объектов из металлов. Толщина слоёв наносимого металла может варьироваться от долей миллиметра до нескольких сантиметров.

Была рассмотрена задача бинарной классификации, т.е. определение проблемного состояния выполняемого технологического процесса. Процесс наплавки с указанием параметров технологического процесса показан на рис. 5.18.

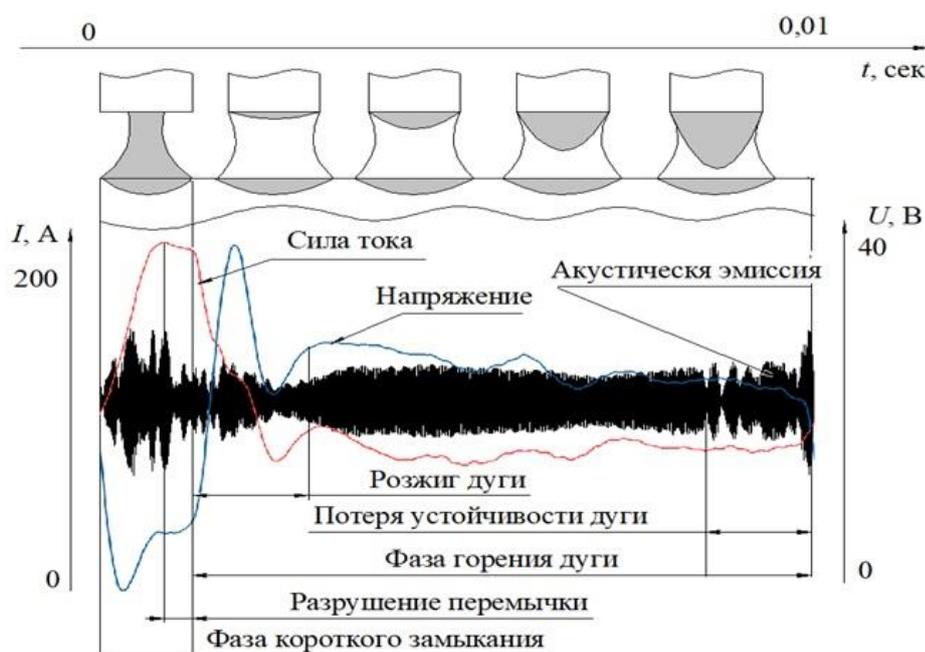


Рис. 5.18. Технология наплавки

Таблица 5.14

Пример данных технологического процесса наплавки материалов для обучения нейро-нечеткой сети (ANFIS)

V	I	Z	S	H	B	Stab	SN
25	150	10	400	2,87	8,25	Yes	SN
25	150	10	400	2,64	8,2	Yes	SN
25	150	10	400	2,69	8,15	Yes	SN
25	150	10	400	2,46	7,8	Yes	SN
25	150	10	400	2,69	8	Yes	SN
25	150	10	800	2,64	6,25	Yes	SN
25	150	10	800	2,57	5	Yes	SN
25	150	10	600	2,46	7,5	Yes	SN

Окончание табл. 5.14

25	150	10	600	2,72	6,8	Yes	SN
25	150	10	600	2,1	6,8	Yes	SN
25	150	10	600	2,59	5,75	Yes	SN
19	150	10	600	3,62	7	No	B
19	150	10	600	3,06	0	No	B
19	150	10	600	2,7	4	No	B
19	150	10	600	3,44	2	No	B
19	150	10	600	4,07	0	No	B

Анализ параметров (табл. 5.14) процесса наплавки металла с использованием нейро-нечетких систем (ANFIS) [93] позволяет идентифицировать возникновение дефекта в области наплавляемого слоя.

Результат обучения для нейро-нечеткой модели вычислений представлен на рис. 5.19.

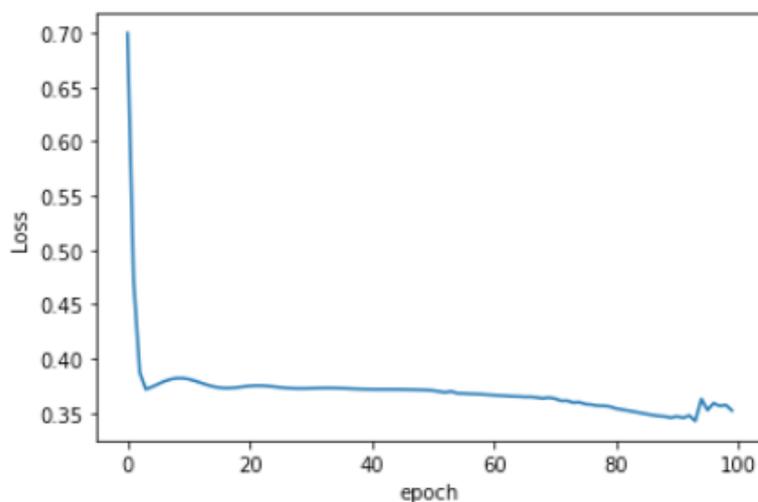


Рис. 5.19. График потерь: train loss = 0.3521

Использование моделей «мягких» вычислений позволило эффективно идентифицировать появление дефектов в наплавляемых слоях металла [213, 214].

5.2.5 Фрезерный станок Корвет-82

Рассматривается поставленная задача *обеспечения экобезопасности* технического объекта - фрезерный станок Корвет-82.

Исследуем экобезопасность фрезерного станка Корвет-82 (рис. 5.20), в соответствии с методикой оценки экобезопасности состояний технических и технологических объектов, приведенной в п. 2.2.



Рис. 5.20. Фрезерный станок Корвет-82

Первоначально проведём анализ фрезерного станка Корвет-82, как технического объекта для утилизации (рис. 5.21).

В результате проведенного анализа были выделены элементы изделия более высокой детализации и занесены в структурную таблицу, где зафиксировано их количество и вес (табл. 5.15).

В табл. 5.15 приведён фрагмент компонентного состава рассматриваемого технического объекта (всего 107 составных объектов), выделены элементы (курсивом) содержащие в своём составе 2 и более видов утилизируемых компонентов.

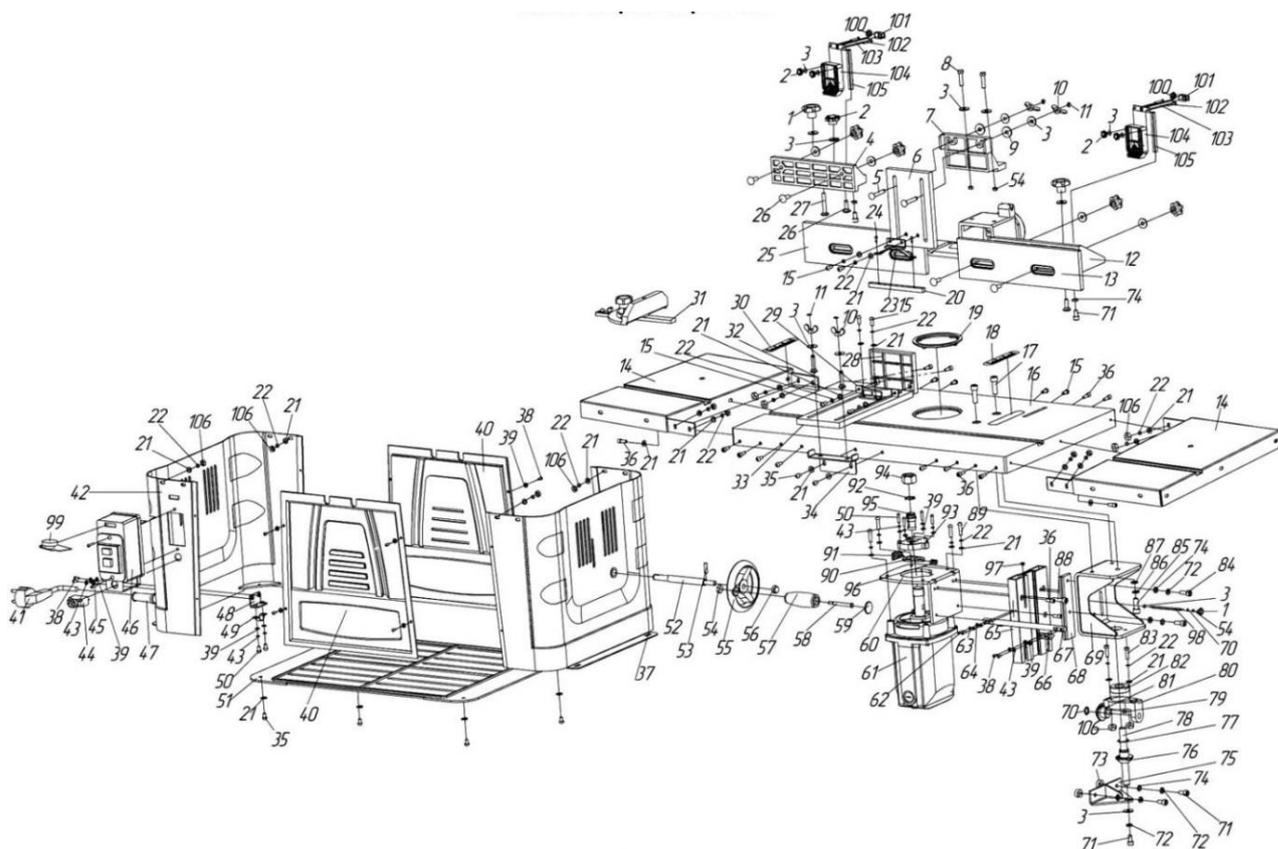


Рис. 5.21. Детальная схема состава фрезерного станка Корвет-82

Таблица 5.15

Элементный состав фрезерного станка Корвет-82

№	Наименование сборочной единицы или детали	Технологический классификатор деталей машиностроения (ТКД)	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
...
105	Шток	152594	45	1
106	Гайка	152595	7	1
107	Щетка угольная	152575	30	2

В результате проведенного анализа структуры и элементного состава фрезерного станка (107 составных частей), были определены следующие показатели утилизации:

C_1 – степень сборки (разборки) объекта, в соответствии с картами технологического процесса;

C_2 – степень повторного использования составных частей объекта;

C_3 – степень рециклинга материалов объекта;

C_4 – степень потенциальной опасности для окружающей среды после окончания эксплуатации объекта и его составных компонентов;

C_5 – уровень выбросов ПГ.

Далее проводилась экспертная оценка показателей утилизации при помощи методов ранжирования:

$C_1=C_2, C_1<C_3, C_1<C_4$

$C_2<C_3, C_2<C_4, C_2<C_5$

$C_3=C_4$

По результатам была построена таблица матрицы рангов (табл. 5.16) и определены нормированные весовые коэффициенты (F_i)

Таблица 5.16

Матрица рангов

	C_1	C_2	C_3	C_4	$\sum Y_{ij}$	Нормированный весовой коэффициент (F_i)
C_1	1	1	0	0	2	0,167
C_2	1	1	0	0	2	0,167
C_3	1	1	1	0	3	0,248
C_4	1	1	0	1	3	0,248
C_5	1	1	0	0	2	0,167
$\sum \sum$	-	-	-	-	12	1

Далее была проведена оценка количественных значений коэффициентов в соответствии с формулами (2.1-2.3):

1. Коэффициент разборности фрезерного станка Корвет-82 составляет:

$$K_p = 1 - N_i / N_{\text{общ}} = 1 - 13 / 107 = 0,8785,$$

где N_i – количество элементов технического или технологического объекта, состоящих из нескольких компонентов;

$N_{\text{общ}}$ – общее количество составных частей объекта (табл. 5.16).

2. Коэффициент повторного использования материалов и компонентов в составе объекта.

Из всех используемых во фрезерном станке Корвет-82 компонентов, подлежат утилизации следующие металлы: алюминий, медь, латунь, сталь углеродистая (общая масса которых равна 26537 гр.).

$$K_{\text{рец}} = M_{\text{рец}} / M_{\text{общ}} = 26537 / 31942 = 0,8308,$$

где $M_{\text{рец}}$ – масса рециклируемых материалов;

$M_{\text{общ}}$ – общая масса технического объекта;

3. Коэффициент рециклинга видов применяемых материалов, в результате утилизационных мероприятий:

$$C3 = n / P = 8 / 15 = 0,53,$$

где n – количество видов рециклируемых материалов;

P – общее число видов материалов в составе технического объекта;

4. Степень потенциальной опасности для окружающей среды.

В соответствии с табл. 5.16 и общероссийским классификатором промышленных отходов, в составе фрезерного станка Корвет-82 отсутствуют токсичных и опасные для окружающей среды элементы. В связи с этим, значение степени потенциальной опасности для окружающей среды приравнивается к единице.

$$C4 = 1.$$

5. Коэффициент углеродного следа, характеризующий выбросы ПГ, привязанные к приобретению сырьевого материала и к операциям в конце ЖЦ продукции

$$K_{\text{угс}} = C_{\text{пр}} + C_{\text{пов}} + П * C_{\text{кр}} = 0,72 + 0,65 + 0,84 * 0,07 = 1,43$$

$C_{пр}$ - выбросы ПГ, привязанные к извлечению или производству сырьевого материала, необходимого для производства продукции, из природных ресурсов, как если бы они все были первичным материалом;

$C_{пов}$ - выбросы ПГ, привязанные к операциям в конце ЖЦ продукции (являющимся частью производственной системы, которая поставляет повторно используемый материал);

Π - доля повторно использованного материала;

$C_{кр}$ - кредит повторного использования материалов, т.е. потенциальные выбросы ПГ при использовании повторно материала, с учётом его переработки в новый исходный материал или вещество.

Таким образом, комплексный индекс экобезопасности определяемый по формуле (3.3) для фрезерного станка Корвет-82 составляет:

$$IEB(N) = \sum C_i = 0,8785 + 0,8308 + 0,53 + 1 + 1,42 = 4,67$$

При этом значение округляется до 0.01, для цели унификации записи мерона в таксономической модели. Аналогично проводится оценка для всех предлагаемых вариантов проектируемого изделия, на основе формул модифицированной ФС и предпочтение отдаётся тому, где величина комплексного индекса экобезопасности выше. Далее, добавляем полученное значение комплексного индекса экобезопасности в формулу объекта-функционала фрезерного станка Корвет-82:

$$M6[Q1.12.4.1(B5.11.1)C1.5(A)](S324(L6.1)), \quad (5.1)$$

где (S324(L6.1)) – таксон состояния объекта, значение которого, характеризует комплексный индекс экобезопасности объекта L6.1. Показатель мерона S, указывается без запятой и всегда представлен трёхзначным числом.

Задача функционального синтеза экобезопасного объекта решается путем поиска объекта с аналогичным функционалом [193], но с более высоким значением таксона состояния объекта, который характеризует комплексный индекс экобезопасности. Безусловно, на этапе проектирования, возникают и другие требования: производительность, габариты и т.д., которые являются ограничениями при поиске аналогов и требуют дополнительного исследования, что является предметом будущего рассмотрения.

5.2.6 Трубы малого диаметра

Рассматривается задача *обеспечения качества состояний* труб малого диаметра.

Неразрушающий контроль изделий оптическими методами играет большую роль на этапе проверки качества продукции и находит свое применения в самых разных производственных задачах. Одним из примеров такого применения является обеспечение качества состояний труб в процессе производства изделий для энергетической отрасли [215].

На предприятиях, специализирующихся на производстве труб и их заказчиках, осуществляется осмотр внутренней поверхности труб. Этот процесс включает в себя процедуры тщательного входного контроля, особенно на промышленных предприятиях, занимающихся изготовлением парогенераторов. Требования к контролю определяются в технических условиях для соответствующих типов труб и включают обязательное отсутствие дефектов, таких как вмятины, трещины, риски и другие. На первом этапе решения поставленной задачи обеспечения качества состояний труб в процессе производства изделий был разработан аппаратно-программный комплекс для автоматизированного получения изображений внутренней поверхности труб малого диаметра, его структурная схема показана на рис 5.22.

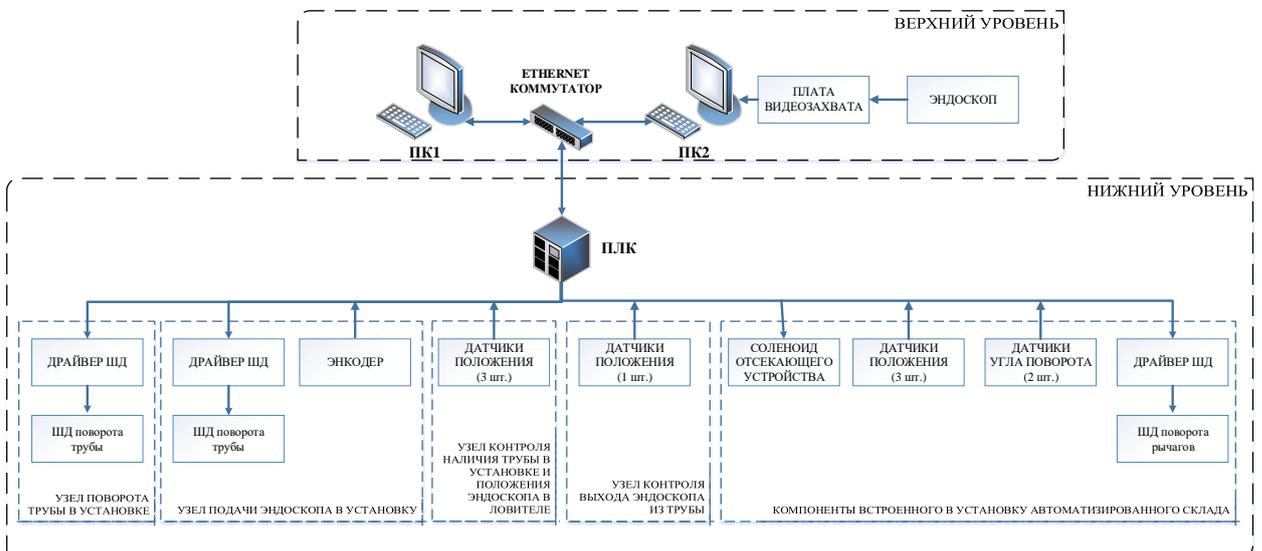


Рис. 5.22. Структурная схема системы управления установкой

Однако одной из существенных сложностей при реализации поставленной задачи, являлась проблема формирования достаточной обучающей выборки с дефектами, и, если собирать данные с дефектами при опытной эксплуатации аппаратно-программного комплекса, то это потребует двух-трёх лет работы с учётом объёмов производства данного предприятия. Одним из подходов к решению поставленной задачи является применение 3-х мерных моделей (3D модели) технических объектов с нанесенными на них параметризованными дефектами. С помощью данных моделей можно создавать выборки размеченных изображений поверхности очень больших объемов [216. 217], необходимых для обучения нейронных сетей. Кроме того, четкая взаимосвязь размеров и характеристик дефектов с их изображениями позволяет получить доказательную базу, подтверждающую качество работы систем технического зрения [219].

Укрупнённо процесс формирования выборок изображений можно разделить на следующие этапы:

1 этап – создание трехмерной модели трубы с дефектами в среде Autodesk Inventor;

2 этап – автоматическая генерация выборки изображений для нейронной сети на основе трехмерной модели трубы;

3 этап – подготовка данных для нейронной сети с использованием специализированного модуля;

4 этап – обучение нейронной сети на сгенерированной синтетической выборке изображений;

5 этап – тестирование и оценка результатов обучения нейронной сети.

После генерации синтетических изображений на третьем этапе происходит их постобработка, а именно осуществляется бинаризация масок, и наносятся дополнительные шумы на изображение трубы с дефектом. Затем формируется обучающая выборка изображений, по которой будет производиться настройка нейронной сети и валидационная выборка, по которой будет осуществляться выбор

наилучших параметров настройки ИНС, определяемые по завершении процесса обучения.

Результаты работы ИНС (8056332 – количество обучаемых параметров, коэффициент пересечения, деленного на объединение (IoU) равен 0,8) на тестовые выборки синтетических изображений, созданных из 3-х мерных моделей поверхности трубы, показаны на рис. 5.23-5.24.

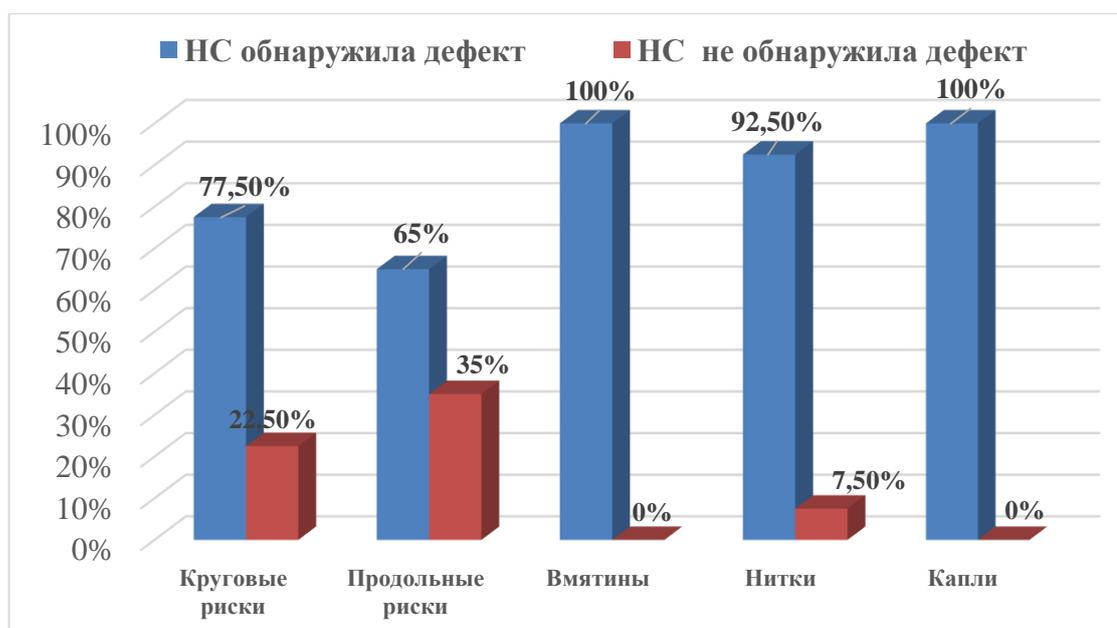
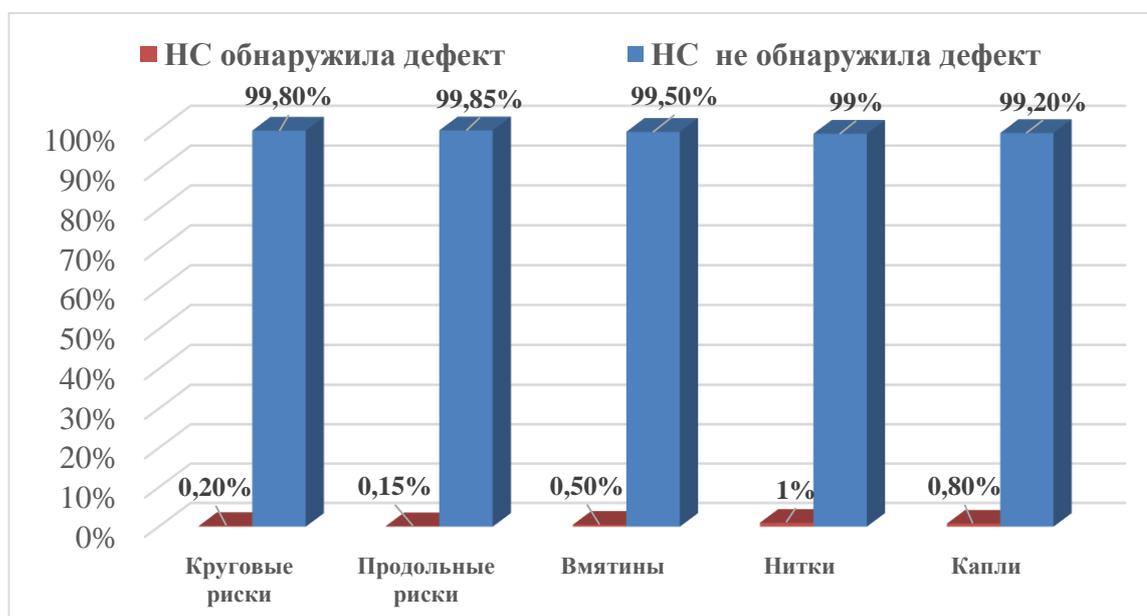


Рис. 5.23. Результаты проведения тестирования ИНС на изображениях с дефектами



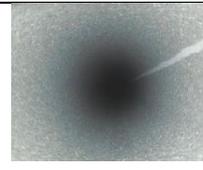
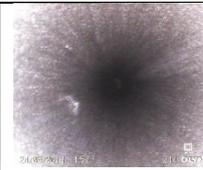
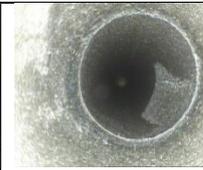
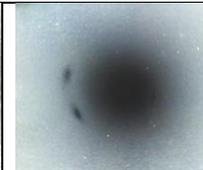
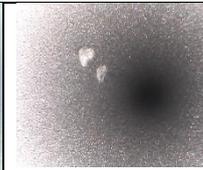
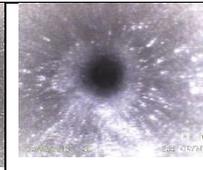
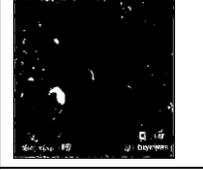
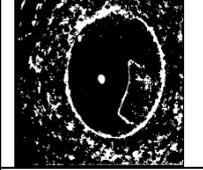
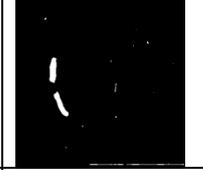
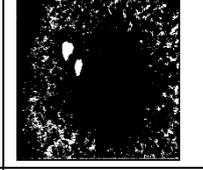
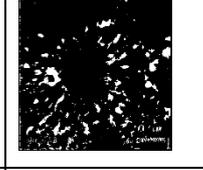
**Рис. 5.24. Результаты проведения тестирования ИНС
на изображениях без дефектов**

Следующим этапом разработки являлось анализ обученных на синтетических изображениях ИНС на изображениях исследуемого объекта (табл. 5.16). Для проведения сравнительного тестирования различных алгоритмов определения дефектов поверхности трубы, были разработаны две модели сверточных ИНС, основанные на архитектурах U-Net и LinkNet [127]. В ходе процесса детектирования дефектов нейронными сетями были успешно обнаружены все дефекты, присутствующие на реальных фотографиях. Однако, точность распознавания оказалась недостаточной. Для улучшения точности распознавания было принято решение о генерации более качественных искусственных изображений.

В результате экспериментов, проведенных с использованием метода обучения нейронных сетей U-NET и LinkNET, адаптированных для задачи обнаружения дефектов на синтетических изображениях, были получены обнадеживающие результаты. Обе модели продемонстрировали высокую точность обнаружения дефектов типов "Вмятины", "Капли" и "Риски", превышающую 91%. В то же время, уровень ложного обнаружения дефектов оказался на удовлетворительно низком уровне - менее 1%.

Таблица 5.17

**Примеры детектирования дефектов на реальных изображениях
нейронной сетью**

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

В дополнение, следует отметить, что использование метода обучения ННК на искусственных изображениях технических объектов, созданных на основе трёхмерных моделей, облегчает процесс сбора и разметки реальных данных, которые потом могут быть использованы в алгоритмах машинного обучения. Это особенно важно в случаях, когда сбор реальных данных затруднен и наблюдается недостаток данных для эффективного обучения моделей [123].

Так, ННК применены были применены как в задачах бинарной классификации дефектов труб (то есть определение наличия или отсутствия дефекта), так и в задачах многоклассовой классификации типов дефектов труб (таких как царапины, вмятины, ржавчина, продольные и кольцевые риски). Обучение ННК проходило на наборе синтетических изображений, состоящем из 3156 изображений в обучающей выборке (по 526 экземпляров каждого класса) и 300 изображений в проверочной выборке.

Результат обучения ННК и ИНС для решения задачи многоклассовой классификации дефектов труб представлен на рис. 5.25 [24].

На рис. 5.26 приведены графики сравнения результатов ИНС и ННК. Применение ННК позволило увеличить общий процент распознавания дефектов внутренней поверхности труб малого диаметра на 11,2%.

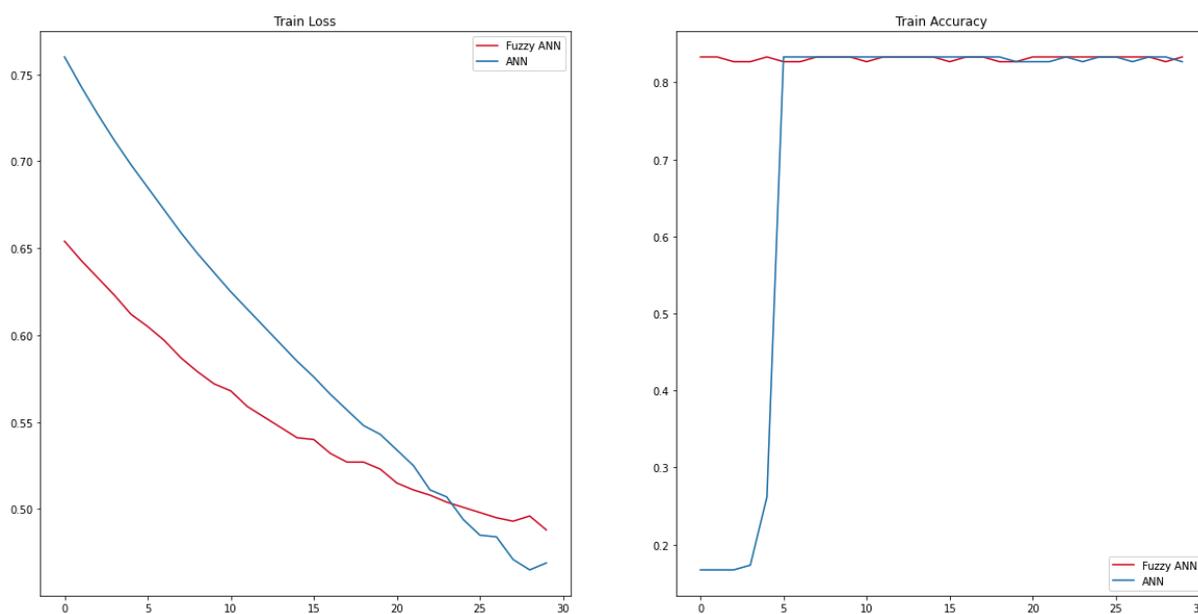


Рис. 5.25. ННК: train acc = 0.8329, ИНС: train acc = 0.8267

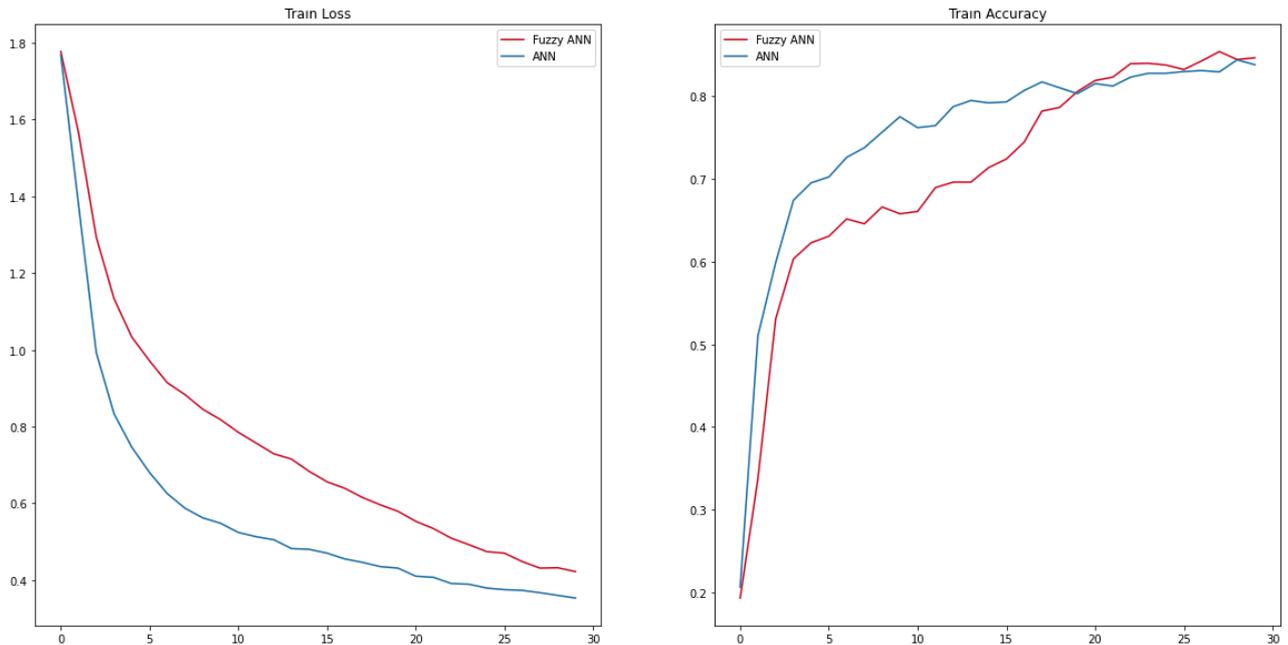


Рис. 5.26. ННК: train acc = 0.8467, ИНС: train acc = 0.8383

В дополнение, следует отметить, что использование ННК, определяет более высокую скорость обучения, что снижает требования к размеру обучающей выборки и объему реальных данных для определения дефектов поверхности труб малого диаметра, по сравнению с ИНС, что крайне актуально в условиях, когда получение реальных данных для технического или технологического объекта затруднено и существует проблема нехватки данных для тестирования и настройки «мягких» моделей вычислений.

5.2.7 Металлорежущее оборудование

Рассматривается задача *прогнозирования качества состояний* технического объекта (металлорежущий станок) с помощью модифицированных АР-моделей.

Металлорежущий станок можно рассматривать как колебательную механическую систему, состоящую из нескольких подсистем: несущей конструкции, приводов главного движения и приводов подач. При колебаниях или вибрациях станка эти подсистемы взаимодействуют друг с другом через динамику процесса резания.

Для того чтобы общее представление о замкнутой динамической системе станка и анализа линейных механизмов самовозбуждения колебаний в процессе

резания были ясны, рассмотрим общую схему эквивалентной динамической системы станка [221] представленную на рис. 5.27.

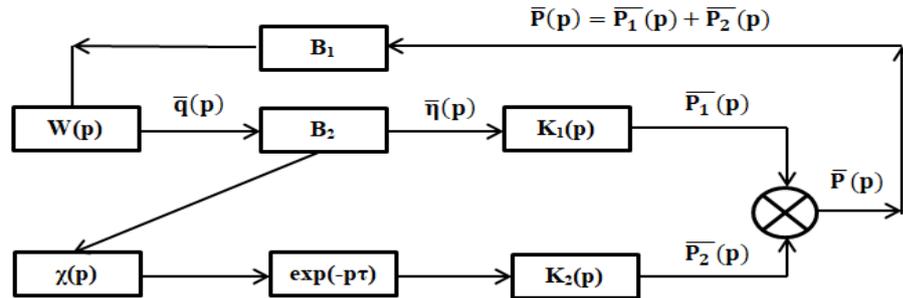


Рис. 5.27. Эквивалентная динамическая система металлорежущего станка

На схеме представлены передаточные функции основных подсистем: $W(p)$ – упругой системы станка и приводов движения, $K_1(p)$ – динамики процесса резания при относительных колебаниях резца и детали ($l=1$) и резании переменного припуска ($l=2$), $\bar{P}^{(1)}(p), \bar{P}^{(2)}(p)$ – динамические силы резания. Кроме того, на схеме указаны матрицы B_1 и B_2 , где первая выражает обобщенные силы резания через динамические силы резания $\bar{P}(p)$, а вторая – относительные колебания резца и детали p через обобщенные координаты $\bar{q}(p)$. Матрица $\chi(p)$ трансформирует относительные колебания $\bar{\eta}(p)$ в след, оставленный на обработанной поверхности детали. Такое представление указывает на наличие двух подсистем – упругой системы станка и динамики процесса резания.

Взаимосвязь этих подсистем скрывает большое количество механизмов, приводящих к самовозбуждению автоколебаний. Один из таких механизмов связан с динамическими силами резания, которые возникают не только из-за относительных колебаний инструмента (Динамические силы первого рода) $\bar{P}^{(1)}(p)$ и детали, но также из-за гармонических изменений следа от инструмента (динамические силы второго рода) $\bar{P}^{(2)}(p)$. След $\eta(t-\tau)$ является запаздывающей функцией и определяется относительными колебаниями, которые совершались $\tau(c)$ ранее, где $\tau=1/n$ – время полного оборота детали.

$$[K]^{(1)} = \begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} & k_{13}^{(1)} \\ k_{21}^{(1)} & k_{22}^{(1)} & k_{23}^{(1)} \\ k_{31}^{(1)} & k_{32}^{(1)} & k_{33}^{(1)} \end{bmatrix} \quad [K]^{(2)} = \begin{bmatrix} k_{11}^{(2)} & k_{12}^{(2)} & k_{13}^{(2)} \\ k_{21}^{(2)} & k_{22}^{(2)} & k_{23}^{(2)} \\ k_{31}^{(2)} & k_{32}^{(2)} & k_{33}^{(2)} \end{bmatrix}$$

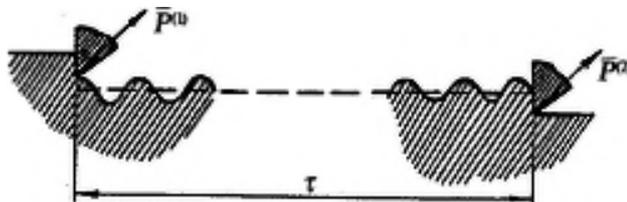


Рис. 5.28. Схемы "вибрационного" резания

На рис. 5.28 приведены различные схемы "вибрационного" резания, которые экспериментально позволяют получить два типа динамических характеристик резания $K^{(1)}(p)$ и $K^{(2)}(p)$. Из этого следует, что в замкнутой динамической системе станка (рис. 5.29) присутствуют два контура обратной связи, один из которых определяется динамическими силами резания в данный момент времени t , другой — динамическими силами последствия, связанными с колебаниями на предыдущем обороте детали. Запаздывающие силы при резании по следу представляют собой один из наиболее важных механизмов возбуждения и поддержания автоколебаний, который обычно называют эффектом регенерации колебаний. Теоретическое и экспериментальное обоснование необходимости учета этого эффекта в динамической системе станка приведено в [222].

ММ-модель замкнутой динамической системы станка для рассматриваемого типа обработки должна описывать взаимосвязь между колебаниями упругой системы станка и динамическими силами резания. При относительных колебаниях детали и режущего инструмента меняются глубина и другие технологические параметры процесса резания, что приводит к изменению динамических сил резания. Эти силы воздействуют на упругую систему станка. Вся эта динамика должна быть учтена в ММ-модели. Для создания общей модели сначала необходимо разработать ММ-модель, описывающую колебания упругой системы

и длинного вала. Затем следует идентифицировать ММ-модели динамики процесса резания и, после этого, объединить их в единую модель.

Согласно блок-схеме замкнутой динамической системы станка, изображенной на рис. 5.28, для написания общей ММ-модели и характеристического уравнения необходимо найти передаточные функции $W(p)$ и $K(p)$, описывающие колебательные свойства упругой системы станка и динамику процесса резания. Для построения передаточной функции $W(p)$ в рассматриваемом случае течения нежесткого длинного вала требуется решение краевой задачи с привлечением методов математической физики [222].

ДУ, описывающие колебание вала, относятся к базовым моделям. При больших угловых скоростях вращения учтем гироскопический момент, действующий на каждый элемент вала.

В результате решения вопроса об устойчивости периодической системы сводится к анализу устойчивости линейной системы с постоянными коэффициентами, что существенно упрощает решение задачи.

Запишем уравнения системы в нормальной форме Коши

$$\{\dot{q}\} = [A]\{q\},$$

где $\{q\} = (x, x_0, \omega)$ - вектор-столбец фазовых переменных,

$[A]$ – матрица размера 3×3 .

Для определения устойчивости системы воспользуемся методом, основанным на численном определении собственных значений матрицы $[A]$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}' = A + B \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix},$$

где коэффициенты A и B определяются, как

$$A = \begin{pmatrix} m_3 \\ b_3 \\ c_3 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} m_1 \bar{v}(0,t) & b_1 \dot{v}(0,t) & c_1 v(0,t) \\ m_1 \bar{\omega}(0,t) & b_1 \dot{\omega}(0,t) & c_1 \omega(0,t) \\ m_2 \bar{v}(l,t) & b_2 \dot{v}(l,t) & c_2 v(l,t) \end{pmatrix}$$

а переменные

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \{q\} = \begin{pmatrix} x \\ x_0 \\ \omega \end{pmatrix},$$

где x – конечное положение резца, x_0 – начальное положение и ω – угловая скорость. И тогда имеет место возможность построения графиков прогноза для всех компонент [167] (рис.5.29-5.31)

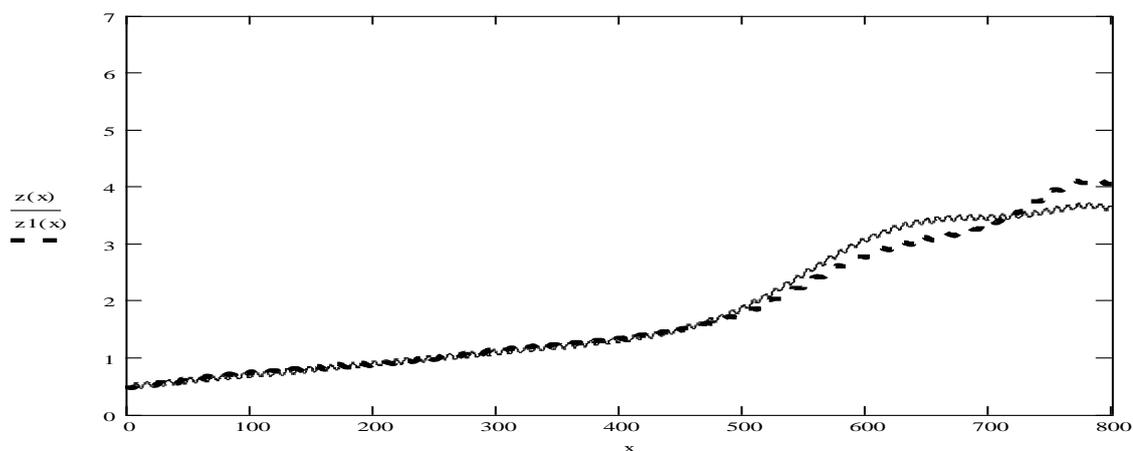


Рис. 5.29. Графики сравнения прогноза и реального поведения системы металлорежущий станок для компоненты $x(t)$

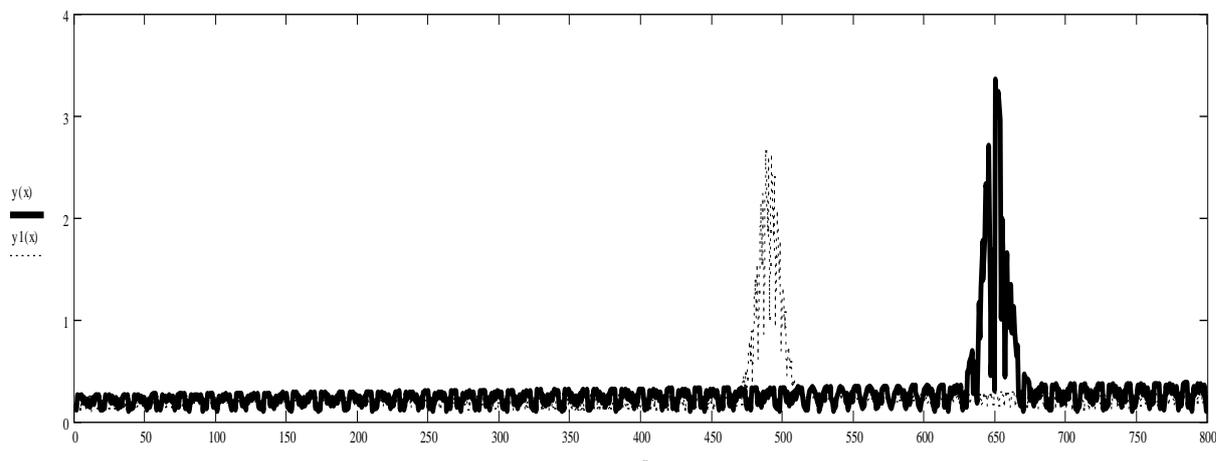


Рис. 5.30. Графики сравнения прогноза и реального поведения системы металлорежущий станок для компоненты $y(t)$

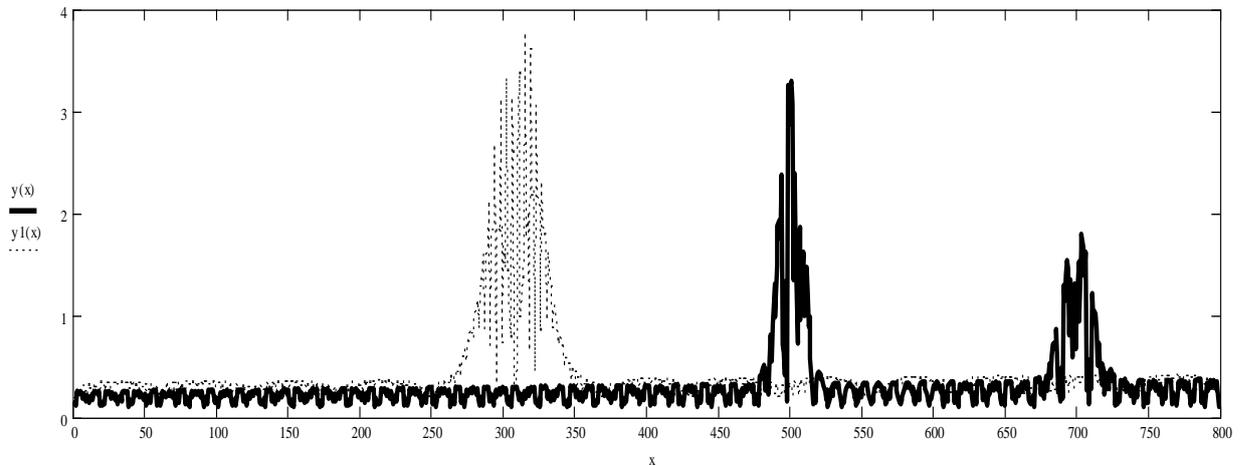


Рис. 5.31. Графики сравнения прогноза и реального поведения системы металлорежущий станок для компоненты $z(t)$

5.2.8 Структурная поврежденность материалов

Рассматривается задача *прогнозирования качества состояний* технического объекта (металлы) с помощью прогностических моделей вычислений.

Для задачи оценки и прогнозирования показателей микроструктуры и структурной поврежденности материалов (металлы) были применены ансамблевые методы машинного обучения. Оценка и прогнозирование структурной поврежденности материалов проводилось при испытаниях на пластическое и упругопластическое циклическое деформирование. Для оценки параметров структурных повреждений использовался ряд количественных показателей (фрактальная размерность изображения D_f , концентрация полос скольжения и дефектов в материале n , относительная площадь дефектов микроструктуры и полос скольжения $F_{отн.}$), которые определялись в автоматизированном режиме на основе предварительной обработки и расчетов по изображению микроструктуры сплава. Для оценки структурной поврежденности материала использована модель ансамблевого обучения Bagging Ensemble[224]. Эта модель реализует ансамбль моделей, обучение которых происходит параллельно на различных подвыборках из

общего обучающего набора данных. Затем анализируются рассчитанные показатели для принятия решений.

На основе прогностической модели вычислений был реализован ансамбль на основе базовых моделей ИНС для оценки качества состояний технических и технологических объектов. Для этой цели использовался набор данных, состоящий из изображений микроструктуры металла, признаков дефектов в структуре, которые являются основными для созданной модели (рис. 5.33).

В наборе данных содержится пять классов, каждый из которых представляет изображения микроструктуры образца металла с разной степенью износа или усталости. Исходный набор состоит из 1000 изображений, каждое размером 1600 на 1200 пикселей. После дискретизации на 9 частей общее количество изображений в новом наборе вырастет до 9000. Тестовая выборка после обучения модели в каждом из нижеперечисленных экспериментов будет составлять приблизительно 10% от общего числа изображений. Каждый класс содержит изображения с различной степенью износа или усталости металла, представленной численными коэффициентами вероятности скорого разрушения материала. Значения каждого класса изменяются в диапазоне от нуля до единицы, где ноль указывает на исправное состояние объекта, а единица представляет разрушение образца. Примеры изображений для каждого класса показаны на рис. 5.32

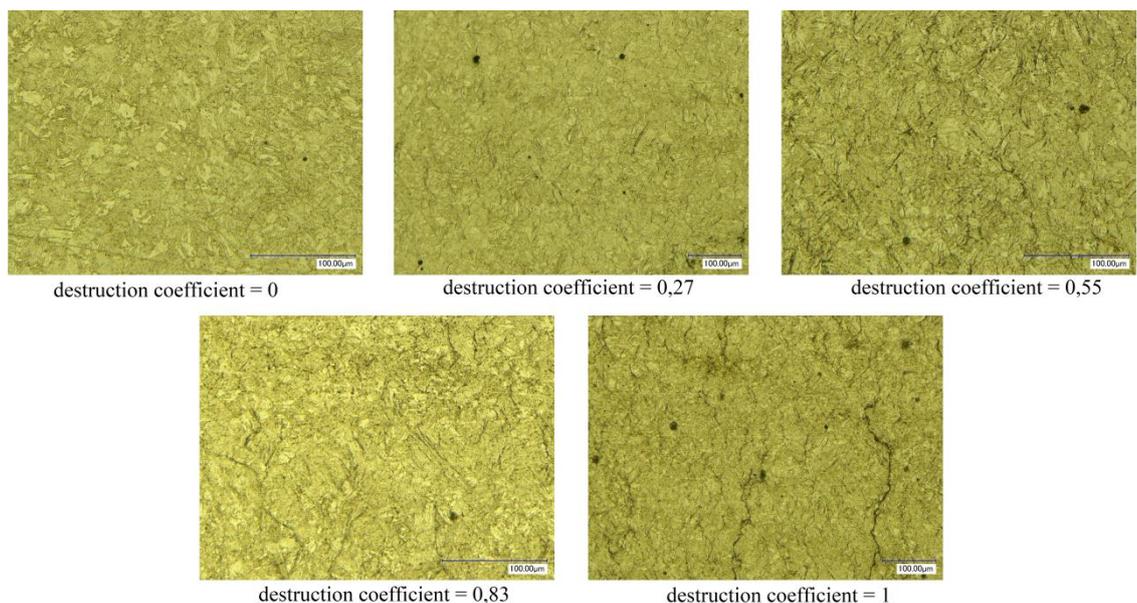


Рис. 5.32. Образцы изображений микроструктуры металла с различной степенью разрушения (поврежденности)

В рамках исследования был создан ансамбль из 6 моделей для прогнозирования степени усталости материала в пяти классах. Эти классы соответствуют разным уровням усталости: первый класс (0), второй класс (0.27) и третий класс (0.55) и т.д.. Общий размер тестовой выборки составил 540 изображений, а обучающей - 4860. Обучение моделей проводилось в течение 20 эпох, и дальнейшее увеличение числа эпох не привело к улучшению точности результатов.

Обучение ансамбля моделей заняло около 48 минут (процессор Intel Core i9-10850k, 3,6 ГГц, 10 ядер и объеме ОЗУ – 32 Гб). Результаты представлены на рис. 5.33 и рис. 5.34. Отмечается невысокий уровень точности базовых моделей. Однако использование ансамбля в среднем увеличивает точность на 12.7%, что позволяет достичь точности в диапазоне 96-98%.

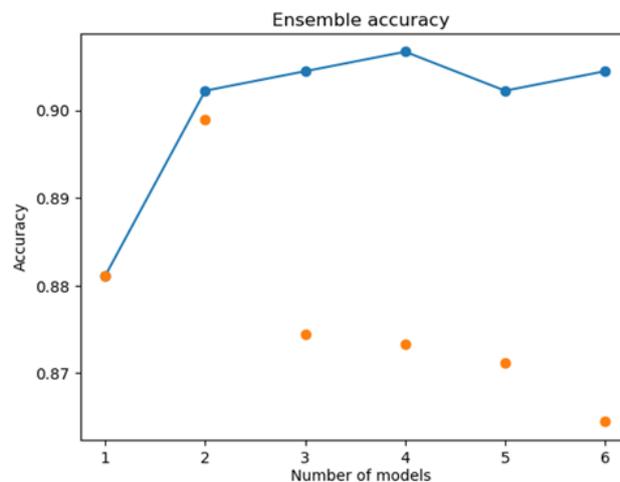


Рис. 5.33. График зависимости точности от количества моделей для 5 классов

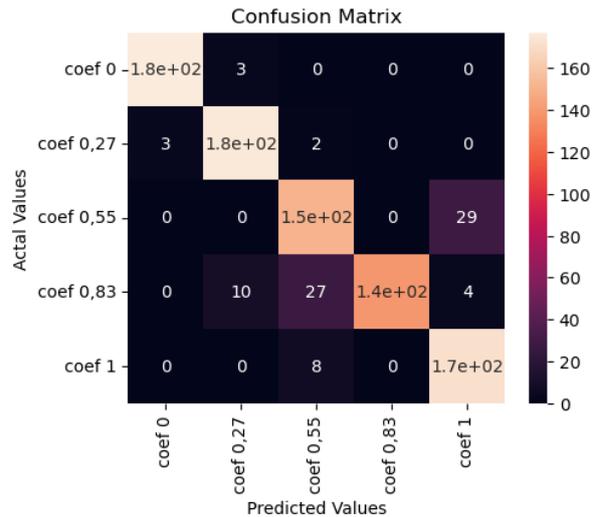


Рис. 5.34. Матрица ошибок

Проанализируем, насколько оптимизация с использованием параллельных вычислений с помощью модуля `multiprocessing` в Python может сократить время обучения моделей. Учитывая аппаратную вычислительную производительность: процессор Intel Core i9-10850k, 16 Гб ОЗУ.

Были проведены эксперименты с параллельным и последовательным обучением моделей в ансамбле. Последовательное обучение 10 моделей заняло примерно 3 часа и 15 минут, где каждая модель обучалась около 19 минут (рис. 5.35). В случае параллельного обучения все модели были обучены примерно за 1 час и 40 минут.

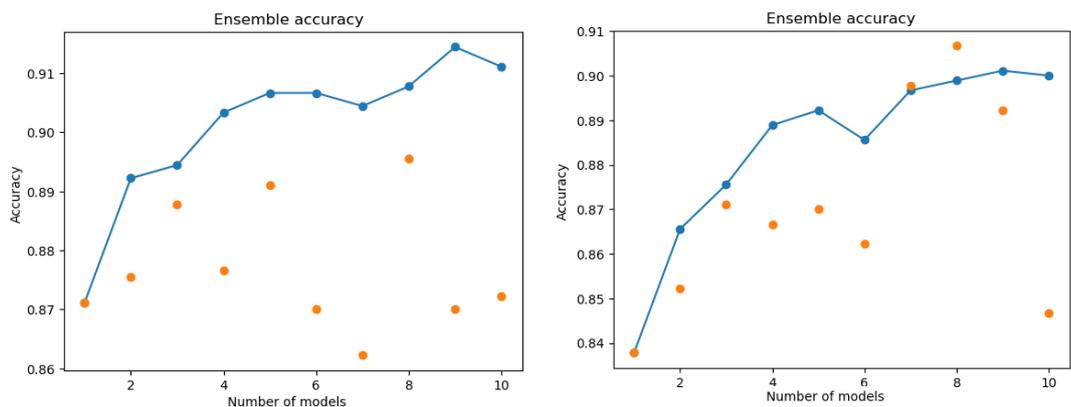


Рис. 5.35. Графики обучения моделей последовательно (слева) и параллельно (справа)

По результатам приведенного сравнения, можно сделать вывод о том, что параллельная реализация значительно сокращает затраты по времени (на 46 % по сравнению с последовательной).

5.2.9 Робототехнический комплекс

Рассматривается задача повышения производительности и оптимизации *робототехнических комплексов (РТК)* с использованием биоинспирированных моделей вычислений.

РТК представляет собой набор технологического оборудования, состоящего из промышленного робота и средств оснащения, обеспечивающего его автономное функционирование для выполнения производственных задач. Средствами оснащения РТК могут быть устройства накопления, ориентации, поштучной выдачи объектов производства (деталей, заготовок) и другие устройства, обеспечивающие функционирование РТК [228].

РТК является частью сложной производственной системы – робототехнической сборочной линии (РТЛ). Решая задачу по повышению производительности РТК необходимо, во-первых, провести анализ РТК как одно из звеньев РТЛ, во-вторых провести оптимизацию технологического процесса по какому-либо критерию. При этом возможны два подхода [221]:

1. Повышение производительности РТК при фиксированном качестве выпускаемой продукции.
2. Оптимизация РТК при обеспечении требуемой производительности и качества.

Оба рассматриваемых подхода, несмотря на разные условия, решаются одинаково, путем повышения эффективности использования основного (технологического) оборудования. Исследуемый РТК предназначен для сборки-сварки автомобильных кузовов. Поэтому, максимальные габариты изделия не превышают 2х5х2 метров, масса – 1 тонны. Рабочая зона роботов имеет радиус 2-3

метра, грузоподъемность транспортных систем – до 1 тонны, точность позиционирования до 0.1 мм.

Выделим три основных параметра [221], которые будем рассматривать:

1. Производительность РТК;
2. *Время цикла*, которое представим в виде функции стремящейся к минимальному значению $F_t \rightarrow \min$;
3. Экономическая эффективность (прибыль) полученная в результате проведения оптимизации.

Производительность РТК увеличивается при увеличении числа технологических единиц (сварочных роботов), входящих в его структуру. Но при этом увеличивается и стоимость РТК.

Исходя из этого:

1. Ставим задачу повышения производительности РТК сборки-сварки при фиксированном количестве технологических единиц.
2. Производительность можем оценить по количеству сварочных точек в единицу времени, но на станции число точек фиксировано, меняться будет число единиц изделия выходящих из станции, то есть количество кузовов в час.

Для повышения производительности сборочно-сварочных и доварочных РТК необходимо определить весовые коэффициенты снижения времени, составляющих время цикла путем анализа циклограмм действующих РТК и предложить пути снижения времени цикла РТК.

Технологический процесс сборки-сварки включает в себя следующую последовательность действий:

- операцию последовательной загрузки свариваемых деталей на конвейер;
- фиксацию свариваемых деталей на конвейере, с помощью специальных приспособлений;
- операцию подачи дополнительных деталей в зону сварки с помощью поворотных столов или выдвижных тележек;
- операцию смены инструмента в процессе сварки если это требуется;

- операция сварки;
- транспортирование узла в следующую сварочную станцию;
- съем готового изделия.

Процесс сварки сварочными роботами включает в себя следующую последовательность:

- Позиционирование клещей робота в заданной точке;
- Выполнение клещами цикла сварки:
 - закрытие клещей;
 - прессовка свариваемых деталей (выдержка усилия на электродах);
 - пропускание импульса сварочного тока;
 - повторная выдержка усилия на электродах;
 - раскрытие клещей.

Для осуществления этих операций РТК должен состоять из следующих элементов (рис. 5.36) [230]:

- Транспортной системы, обеспечивающей загрузку деталей, съем сваренного изделия и межоперационную транспортировку;
- Сварочных клещей, обеспечивающих выполнение самого сварочного процесса;
- Сварочных роботов, обеспечивающих позиционирование сварочных клещей для выполнения процесса точечной сварки.

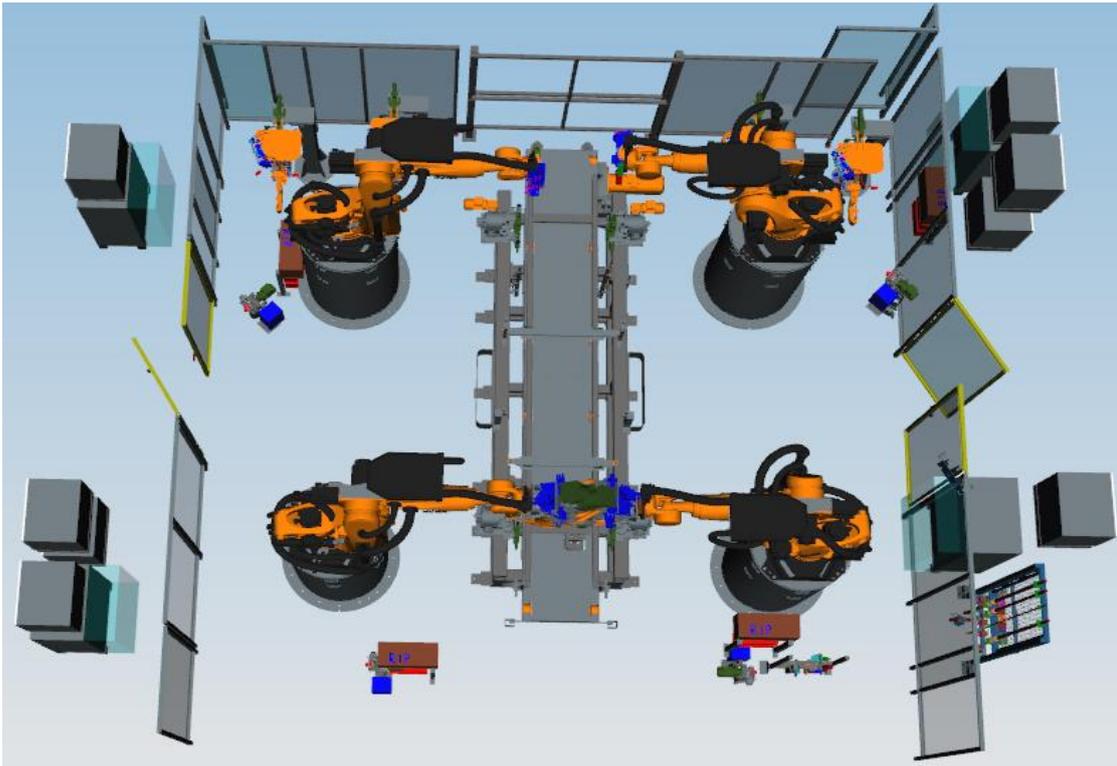


Рис. 5.36. Станция доварки кузовов вид сверху

На рис. 5.36 показана рассматриваемая станция доварки, в которой используется напольное транспортирование между станциями. В станции используются 4 робота, два из которых имеют одни сварочные клещи, а другая пара роботов имеет двое сварочных клещей с автоматической сменой инструмента.

Рассматривались методы оптимизации движения робота и сокращения времени цикла робота:

1. Оптимизация по быстродействию движений промышленных роботов с позиционной системой управления. Задача сводится к поиску промежуточных «опорных» точек траектории в n -мерном рабочем пространстве манипулятора. Решается она методом моделирования процесса движения манипулятора на основе кинематической и динамической модели его механизма. На основе расчетов полного времени перехода для различных точек сетки в рабочей зоне манипулятора из начальной точки траектории в конечную выбирают «опорные» точки траектории, соответствующие минимальному полному времени перехода манипулятора.

Строится ММ, в которой с каждым сварочным пунктом связывается система координат робота. Расположение координат сварочным пунктом относительно робота определяется матрицей четвертого порядка M , имеющая вид [221]:

$$M = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & a \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где α – угол поворота системы координат робота, a, b, c – начало координат системы.

Первоначально необходимо провести планирование перемещений исполнительных устройств РТК в трехмерном рабочем пространстве или пространствах обобщенных координат.

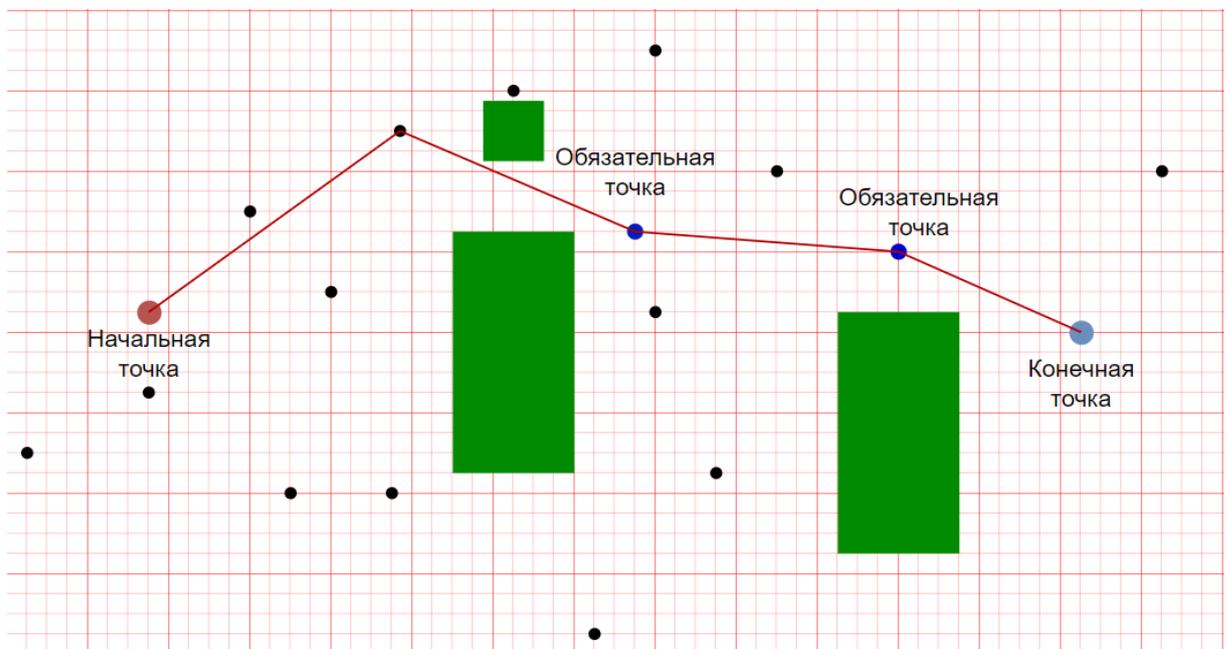


Рис. 5.37. Пример траектории перемещения исполнительного устройства РТК по опорным точкам в двумерной проекции

Поиск траектории перемещения РТК, выполняется управляющим микроконтроллером, в дискретном формате. Для этого каждая дискретная точка на траектории генерируется в течение времени, необходимого для расчета траектории. Частота генерации точек может варьироваться от 10 до 300 Гц в зависимости от возможностей управляющей системы. Основная цель заключается в эффективном перемещении схвата робота из начального кинематического положения $H(0)$ в заданное кинематическое положение $H(t)$ за определенное время t . Для

предотвращения столкновений с объектами в рабочей области требуется более детальное описание движения, чем простое указание начальной и конечной точек (рис. 5.37). Поэтому определяются промежуточные точки, в которых необходимо определить кинематическое положение схвата робота. Для более подробного описания траекторий также необходимо определить значения обобщенной скорости и обобщенного ускорения. Ясно, что для получения, изменяющегося во времени кинематического положения схвата робота $H(t)$, необходимо использовать множество изменяющихся во времени углов в сочленениях, или иначе говоря, зависящий от времени вектор углов в сочленениях $Q(t)$, такой, что

$$Q(t) = (Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n)^T,$$

где $Q(t)$ представляет собой решение обратной задачи кинематики с начальным $H(0)$ и конечным $H(t)$ кинематическими положениями схвата робота.

С помощью параллельно- популяционных моделей вычислений решается задача оптимального перемещения по опорным точкам системы координат робота при заданной функции $F_t \rightarrow \min$, стремящейся к минимальному значению по алгоритму представленному на рис. 5.38.

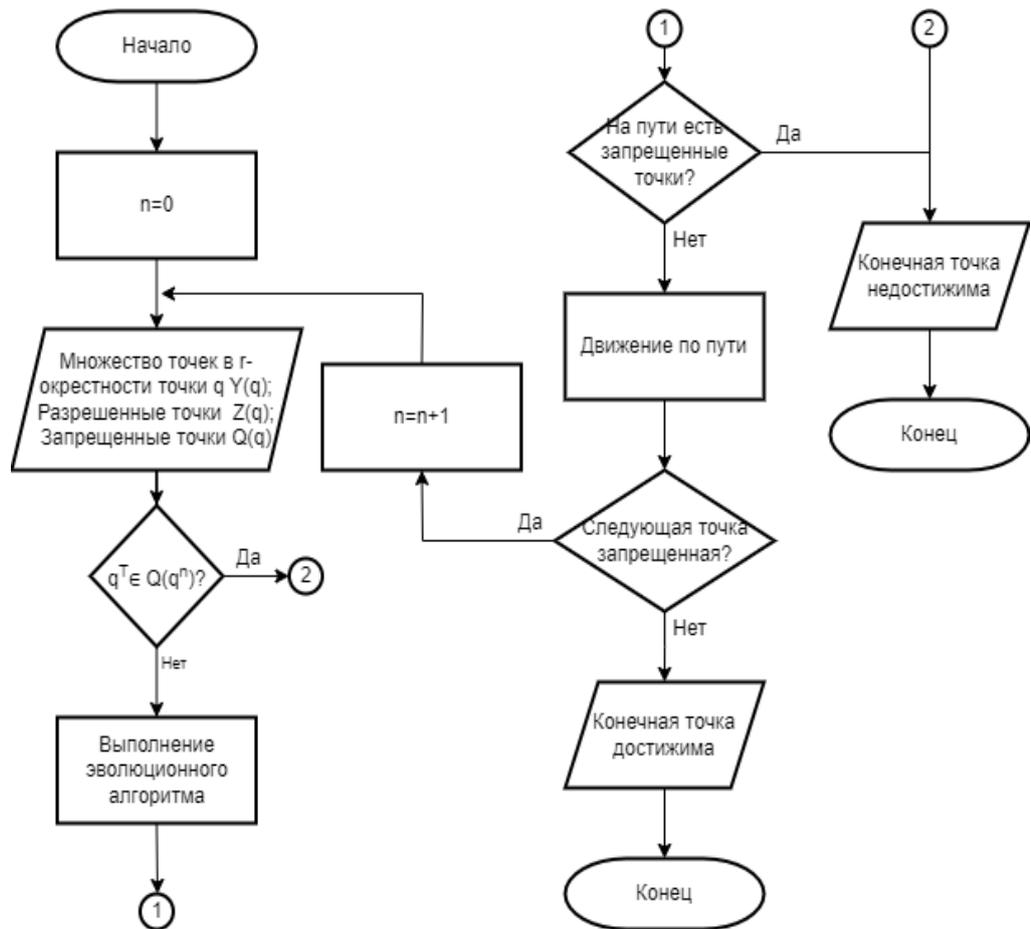


Рис. 5.38. Алгоритм перемещения исполнительного устройства РТК, на основе мЭГА

На рис. 5.39 приведен фрагмент таблицы возможных маршрутов перемещения исполнительных устройств РТК между опорными точками

№	Начало	Конец	Расстояние	На кратчайшем пути
1	1	2	5.92	0
2	1	3	4.47	1
3	2	5	1.41	0
4	2	6	4.36	0
5	3	5	8.06	1
6	3	7	8.77	0
7	4	11	1.41	0
8	4	9	6.16	0
9	5	6	5.39	0
10	5	10	3.00	0
11	5	8	7.00	1
12	6	3	9.17	0
13	6	11	9.00	0
14	7	9	5.48	0
15	8	10	6.00	1
16	8	7	5.20	0
17	9	10	4.58	0
18	10	11	8.06	1

Рис. 5.39. Фрагмент таблицы возможных маршрутов перемещения исполнительных устройств РТК между опорными точками

2. Оптимизация времени при разгоне и торможении промышленного робота. В свете постоянного развития и усложнения технологических процессов, с одной стороны, и доступности современной преобразовательной техники – с другой, ведутся работы по сокращению времени торможения промышленного робота с помощью регулирования частоты двигателя. На сегодняшний день в частотно-регулируемых электроприводах отечественного производства, содержащих преобразователи частоты, используются линейные профили интенсивности, позволяющие изменять (увеличивать при разгоне и уменьшать при торможении) частоту питающего напряжения по линейному закону. По S-образным профилям происходит постепенное изменение выходной частоты в соответствии с ее требуемым уровнем и скоростью изменения.

S-образные профили разгона и торможения характеризуются двумя участками с равноускоренным характером, разделенными участком с прямолинейным характером. Участки равноускоренного движения формируются согласно параболическому закону, а участок прямолинейного движения – согласно линейному закону (рис. 5.40).

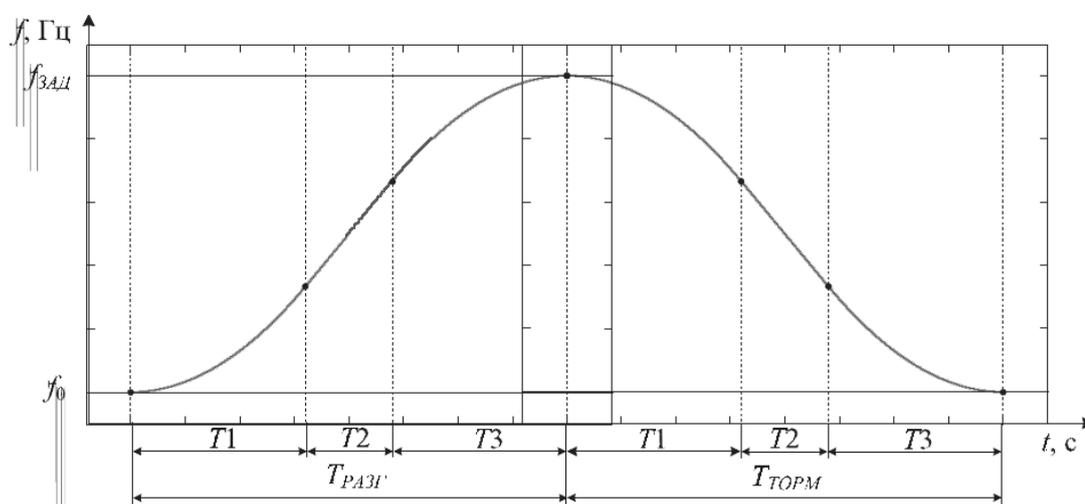


Рис. 5.40. Общий вид профиля разгона и торможения

В частном случае, когда T_1 отличается от T_3 , профиль разгона будет иметь асимметричную форму относительно линейного участка. Длительность линейных участков T_2 разгона и торможения вычисляется автоматически, исходя из общего

времени разгона $T_{раз}$ и торможения $T_{торм}$, а также от времени первого и третьего участков T_1 и T_3 разгона и торможения:

$$T_2 = T_{раз} - (T_1 + T_3) \text{ и } T_2 = T_{торм} - (T_1 + T_3).$$

3. Оптимизация времени цикла сварочными клещами.

При рассмотрении времен, из которых складывается цикл сварки клещами, мы видим, что это:

- Время раскрытия клещей;
- Время сжатия клещей;
- Время пропуска импульса сварочного тока;
- Время раскрытия клещей.

Оптимизируя каждое время сварки клещами, мы сможем снизить общее время сварки, но это будет не значительным снижением. Сварка длится менее 0,5 с и выигрываем доли секунд от каждой сварочной точки. Время раскрытия и закрытия клещей строго ограничено, что не позволяет достичь желаемого результата.

Каждый из рассмотренных трёх методов позволяет повысить эффективность работы как отдельного РТК, так и РТЛ в целом. Использование параллельно-популяционных моделей вычислений, позволяет оптимизировать режимы работы технических и технологических объектов.

5.3 Аппаратно-программный комплекс интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов

Аппаратной реализацией системы интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов является специальный аппаратно-программный комплекс интеллектуального управления техническими и технологическими объектами (далее АПК ИУ).

АПК ИУ предназначен:

- для диагностирования и интеллектуального управления состояниями узлов и агрегатов машин и механизмов;
- для сбора и обработки сигналов информации с возможностью удаленного доступа;
- для дистанционного управления техническими и технологическими объектами;
- для калибровки преобразователей акустической эмиссии (АЭ);
- для работы на открытом пространстве, в тяжелых климатических условиях [231].

Внешний вид АПК ИУ приведен на рис. 5.41.

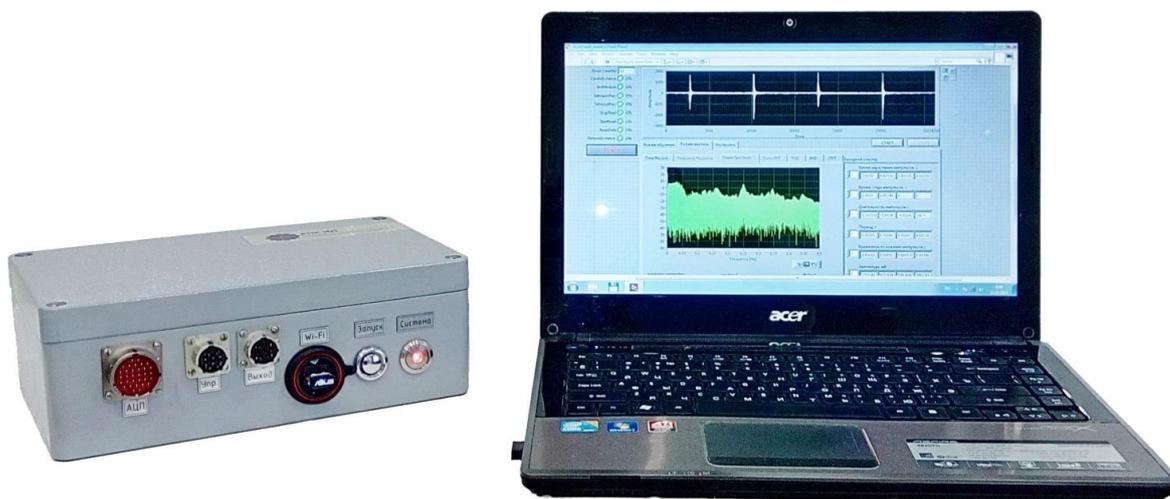


Рис. 5.41. Внешний вид АПК ИУ

Рабочие условия эксплуатации прибора АПК ИУ:

- температура окружающей среды, °С от -40 до 40;
- относительная влажность воздуха, % до 80 при температуре 25 °С
- атмосферное давление, кПа (мм рт.ст.) от 84 до 106 (от 630 до 795);

Основные технические характеристики АПК ИУ приведены в таблице 5.18.

Основные технические характеристики АПК ИУ

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
Вычислительные ресурсы и память		
1	Процессор	Core I7
2	ОЗУ	4Гб
3	Энергонезависимая память	250 Гб
Сбор данных		
4	Количество входных каналов АЦП	8 дифференциальных буферизированных каналов
5	Максимальная частота	
6	дискретизации, МГц	14
7	Разрядность АЦП	± 5
8	Диапазон входного сигнала, В	81
9	Динамический диапазон, дБ	Внутренняя, внешняя (ТТЛ)
10	Синхронизация ввода	GT200U, GT250, GT350
11	Подключение датчиков АЭ	СНЦ28-32/27В-1-В
	Тип разъема	
Имитатор АЭ-сигналов (калибратор)		
12	Амплитуда импульсов, В	24
13	Диапазон частоты следования	1-5000
14	импульсов, Гц	SC1220, ANR 1250
15	Подключение пьезопреобразователей	СНЦ23-7/18Р-2-В
	Тип разъема	
Управление		
16	Количество выходов (ТТЛ)	8
17	Минимальное напряжение высокого уровня, (IO = -8мА), В	2,4
18	Максимальное напряжение низкого уровня (IO = 8 мА), В	0,4
19	Тип разъема	СНЦ23-10/18Р-1-В

Окончание табл. 5.18

Дистанционное управление 1		
20	Тип	Радиоканал
21	Диапазон	433,92+-0,2% МГц
22	Мощность приема\передачи	10 мВт
23	Скорость данных в эфире	4800...76800 бод.
24	Дальность	до 7...8 км
25	Тип антенны	внешняя, разъем SMA
Дистанционное управление 2		
26	Тип	Wi-Fi AD-HOC
27	Стандарт	Wi-Fi: 802.11n
28	Макс. Скорость	150 Мбит/с
29	Тип разъема	Внешний USB
Общие характеристики		
30	Время загрузки системы	2 мин
31	Индикация на передней панели	«ВКЛ», «СИСТЕМА»
32	Степень защиты корпуса	IP66
33	Питание:	12 В
34	Тип разъёма питания	СНЦ23-3/14P-1-B
35	Габаритные размеры, ШxВxГ, мм	260x160x90
36	Масса, кг	6,25

- Возможность автоматической расстановки датчиков на объектах локации в соответствии с выбранной схемой расположения датчиков;
- Классификация источников АЭ по локационной амплитуде;
- Кластеризация локационных объектов;
- Отображение акустико-эмиссионной информации отдельно по каждому кластеру;
- Фильтрация акустико-эмиссионных данных;
- Спектральный анализ акустико-эмиссионных сигналов;
- Оценка шума на тестируемом объекте;
- Возможность конфигурирования настроек каналов и локационных объектов с возможностью импортирования текущей конфигурации с внешнего накопителя;
- Поддержка работы одновременно с несколькими локационными объектами;
- Подготовка отчета по результатам тестирования;
- Экспорт графической информации в популярные графические форматы в выбранном пользователем разрешении и цветовой палитре;
- Экспорт данных в текстовые файлы.

Модель противоударного пылевлагозащищенного корпуса для системы интеллектуального управления техническими и технологическими объектами представлена на рис. 5.43.

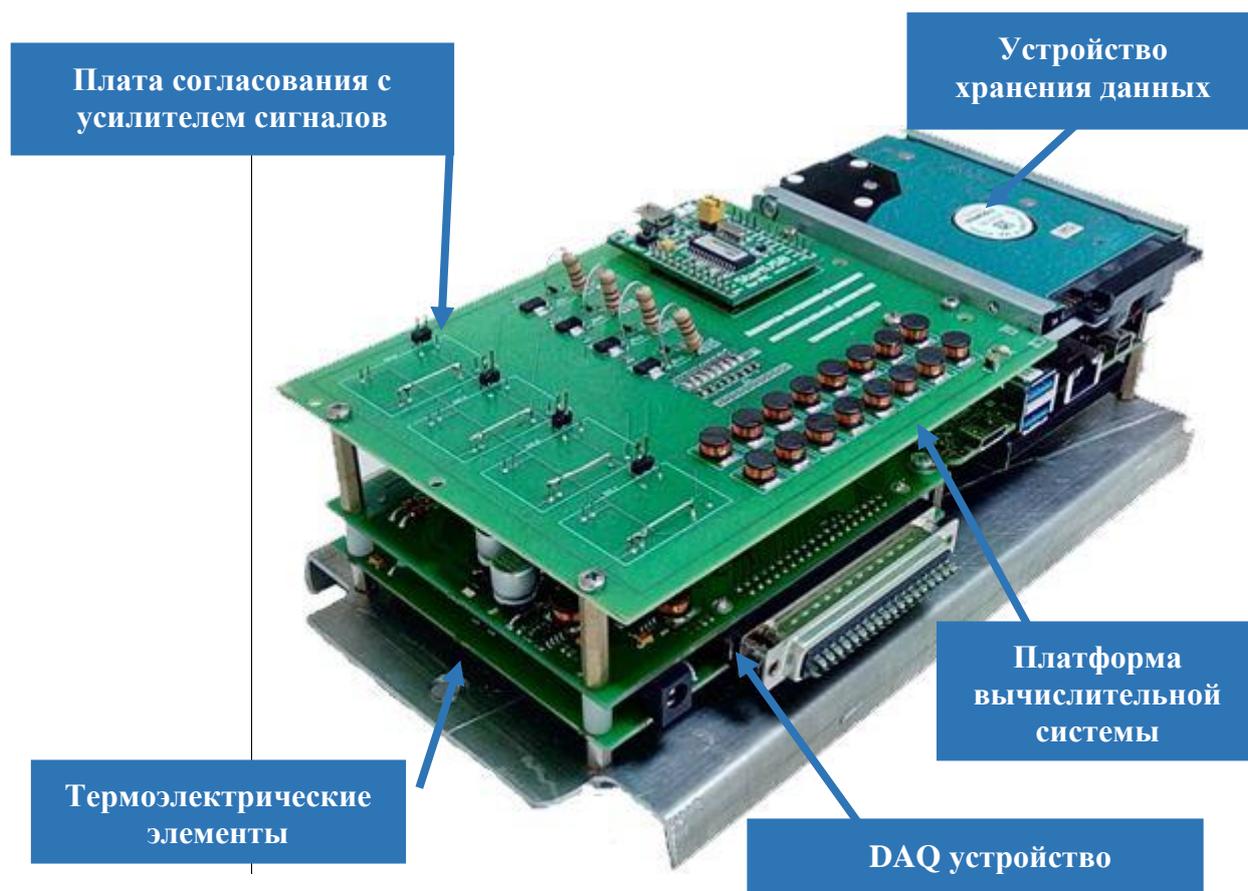


Рис. 5.43. Состав АПК ИУ

Архитектура АПК ИУ основывается на модульном принципе конструирования, который предусматривает проектирование функциональных компонентов с использованием взаимозаменяемых составных частей, или модулей, для обеспечения максимальной гибкости и функциональности. Основой конструкции является основание из алюминия П-образной формы на которой размещаются компоненты комплекса [214]. На нижней части рамы предусмотрены крепления для термоэлектрических модулей. С другой стороны, с помощью стоек крепятся различные устройства: DAQ-устройство, вычислительная платформа, устройство хранения данных и плата согласования с усилителем сигналов [234]. Получившаяся поэтажная компоновка представляет собой единую конструкцию, которая закрепляется внутри корпуса с помощью винтовых соединений после соединения модулей АПК ИУ (рис. 5.44).



Рис. 5.44. Внешний вид АПК ИУ

На передней панели АПК ИУ размещены следующие элементы (рис. 5.44): тумблер для включения питания, разъем питания, индикатор состояния питания, кнопка включения системы, индикатор готовности системы, usb-порт с установленным wi-fi модулем, разъемы для подключения датчиков АЭ, УК.

Разработанный АПК ИУ позволяет реализовать интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний для технических и технологических объектов на основе открытой системы адаптивных моделей вычислений.

5.4 Результаты внедрения

Для различных типов технических и технологических объектов представлены особенности применения адаптивных моделей вычислений (таблица 5.19). Цветовой легендой отмечена степень соответствия моделей вычислений для представления различных типов технических и технологических объектов, что подтверждено соответствующими документами по различным отраслям промышленности в табл. 5.20.

Таблица 5.19

**Использование адаптивных моделей вычислений для представления
различных типов технических и технологических объектов промышленного
назначения**

Модели вычислений		Технические объекты						Технологические объекты		
		Газотранспорт	Импульсный блок питания	Фрезерный станок	Структура металла	Робототехника	Грубы	Металлорежущее оборудование	Наплавка металла	Гидрирование
«Мягкие»	Нейронные сети	●	○	▨		●	●	○	●	●
	Нечёткие отношения	●	●	▨			▨			▨
	Нейро-нечеткие модели	▨			○		●		●	●
Бионсперированные	Эволюционно-генетические модели			▨		●		●		
	Популяционные модели			▨		●				▨
Прогностические	Авторегрессионные модели		●	●	▨	○		●	○	
	Ансамблевые модели		●	●	▨	○		●	○	
Оптимальный синтез	Контролепригодность	▨	●		●	▨	●	▨	●	▨
	Отказоустойчивость	●	●	▨	▨	●	○	●	▨	●
	Экобезопасность	●	○	●		○	▨	○		●
<p align="center">  - модель вычислений применима;  - модель вычислений в разработке;  - в перспективе. </p>										

Результаты внедрения на промышленных предприятиях и научно-образовательных организациях

№	Отрасль/группа компаний	Организация (НИИ, НПО, НПП и т.д.)	Решаемые задачи
1	2	3	4
1	Росатом	Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ "НИИИС им. Ю.Е. Седякина" (г. Н.Новгород)	Разработка аппаратно-программного информационно-управляющего канала для диагностирования и управления состоянием технических объектов.
		АО «ОКБМ Африкантов» (г. Н.Новгород)	Разработка системы диагностирования и входного контроля для труб малых диаметров на основе «мягких» моделей вычислений
2	Машиностроение	АО «Нижегородский завод 70-летия Победы» (г. Н.Новгород)	Автоматизированная система сбора данных и контроля параметров производственного и учебного станочного оборудования, разработка и оптимизация структуры сложных технических и технологических объектов
		АО «ЦНИИ «Буревестник» (г. Н.Новгород)	Система управления и контроля имитационно-моделирующих стендов для отработки артиллерийских комплектов
		АО ПКО Теплообменник (г. Н.Новгород)	Повышение эффективности работы фрезерных станков с ЧПУ, управления робототехнических комплексов
3	Транспорт	ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» (г. Н.Новгород)	Организация технического обслуживания и ремонта оборудования САУ ГПА на основе комплексного показателя - индекса технического состояния (ИТС)

Продолжение табл. 5.20

1	2	3	4
4	Метрология	ГРЦ стандартизации, метрологии и испытаний в Нижегородской области ФБУ «Нижегородский ЦСМ» (г. Н.Новгород)	Разработка автоматизированных рабочих мест для поверки и контроля измерительных приборов (многомерных мер электрического сопротивления).
5	Наука и образование	ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева» (г. Н.Новгород)	При работе научно-исследовательской лаборатории «Диагностика и прогнозирование технического состояния оборудования» ФГБОУ ВО «НГТУ Р.Е. Алексеева» (г. Н.Новгород) В учебном процессе ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Мехатроника и робототехника»
6	Авиастроение	ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» НАЗ «Сокол» (г. Н.Новгород)	Обеспечение контролепригодности технических объектов; формирование планов ТОИР объектов машиностроения.
7	Электротехническое производство	АО «Электро Интел» (г. Н.Новгород)	Обеспечение контролепригодности и отказоустойчивости источника питания для дуговой сварки
8	Микроэлектроника	ООО «ЭКО-ТЕХ Микроэлектроника» (г. Н.Новгород)	Интеллектуальное управление качеством состояния технологического процесса сварки изделий микроэлектронной техники

Применение различных адаптивных моделей вычислений для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов состоит в их использовании в соответствии с условиями и свойствами решаемых задач для конкретных технических и технологических объектов, что подтверждено соответствующими результатами внедрения.

5.5 Выводы по главе 5

1. Разработана обобщенная структурно-функциональная схема интеллектуального управления качеством и экобезопасностью технических и технологических объектов.

2. Рассмотрено интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов разного типа: газотранспортное оборудование, импульсный блок питания, фрезерный станок, трубы малого диаметра, металлорежущее оборудование, технологические процессы наплавки металла и гидрирования этан-этиленовой фракции, робототехнический комплекс, структурная поврежденность материалов.

3. Разработан аппаратно-программный комплекс интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов (АПК ИУ).

4. Рассмотрены возможности применения открытой системы адаптивных моделей вычислений для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов в соответствии с условиями и свойствами решаемых задач с единых позиций.

5. Приведены результаты внедрения интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов на промышленных предприятиях и научно-образовательных учреждениях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сформулирована **научно-техническая проблема** связанная с обеспечением качества и экобезопасности состояний технических и технологических объектов *сложной* структуры.
2. Предложена **концепция** управления качеством и экобезопасностью 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 индекс экобезопасности**.
 - 4.3 **Модифицированная функциональная систематика**, включающая совместное использование **индекса технического состояния (ИТС)** и **комплексного показателя экобезопасности**.
 - 4.4 **Модели оптимального синтеза** контролепригодных, отказоустойчивых и экобезопасных 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. Разработан **аппаратно-программный комплекс** 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 документами *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».

Таким образом, сформулированная цель диссертационного исследования – создание системы адаптивных моделей вычислений и технологий для интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, достигнута.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Сокращение, условное обозначение	Расшифровка
CBM	Condition-Based Maintenance; концепции ТоиР по состоянию
CMMS	Computerized Maintenance Management System; автоматизированная система управления ТОиР
ERP	Enterprise Resource Planning; планирование ресурсов в масштабе предприятия
MES	Manufacturing Execution System; управление производственными процессами
MRP	Material Resource Planning; планирование материальных ресурсов
MRP II	Manufacturing Resource Planning; планирование производственных ресурсов
RCM	Reliability Centered Maintenance; концепция ТОиР ориентированная на надёжность
RTF	Run-to-Failure; ремонт после отказа
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition; диспетчерское управление и сбор данных
TBM	Time-Based Maintenance; концепция ТОиР по времени
АПК ИУ	Аппаратно-программный комплекс интеллектуального управления Новизна предложенной обобщенной схемы интеллектуального управления состоит в использовании открытой системы адаптивных моделей вычислений в соответствии с условиями и свойствами решаемых задач.
АЭ	акустическая эмиссия
БП	блок питания
ГА	генетический алгоритм
ГПА	газоперекачивающий агрегат

ГТС	газотранспортная система
ЗИП	запасные части и принадлежности
ИНС	интеллектуальные нейронные сети
ИСУКС	интеллектуальная система управления качеством состояний
ИСУ	информационная система управления
ИТС	индекс технического состояния
КИПиА	контрольно-измерительные приборы и автоматика
КР	капитальный ремонт
КС	компрессорная станция
ЛПР	лицо принимающее решение
МТР	материально-технические ресурсы
НМ	нечеткое множество
ННК	нейро-нечёткий классификатор
ПГА	параллельные генетические алгоритмы
ППР	планово-предупредительный ремонт
САУ	система автоматического управления
Т2-ИНМ	интервальные нечеткие множества второго типа
ТО	техническое обслуживание
ТОиР	техническое обслуживание и ремонт
ТР	текущий ремонт
ТС	техническое состояние
УПД	условный поиск дефектов
ФС	функциональная систематика
ФП	функция принадлежности
ЭГА	эволюционно-генетический алгоритм
мЭГА	модифицированный эволюционно-генетический алгоритм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года. Распоряжение от 17 января 2020 года №20-р, 2020. – URL: <http://government.ru/docs/38795/> (дата обращения: 20.02.2024).
2. Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности российской федерации до 2024 года и на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 6 июня 2020 г. №1512р, 2020. – URL: <http://static.government.ru/media/files/Qw77Aau6IOSEluQqYnv4tGСу6rv6Qm.pdf> (дата обращения: 20.02.2024).
3. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2009. – 51 с.
4. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 20911–75; введ. 1991–01–01. – М.: Стандартинформ, 2009. – 11 с.
5. Брюле, Д. Д. Отыскание неисправностей в технических устройствах / Р. А. Джонсон, Клетский Е .Д. // В кн.: Оптимальные задачи надежности: Пер. с англ./ Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Изд-во стандартов, 1968. – С. 189 – 199.
6. Биргер, Н.А. Техническая диагностика / Н.А. Биргер – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
7. ГОСТ 18322–2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 18322–78; введ. 2017–09–01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 13 с.
8. Авиженис, А. Отказоустойчивость — свойство, обеспечивающее постоянную работоспособность цифровых систем / А. Авиженис // ТИИЭР.— 1978.— Т. 66, № 10. — С. 5–25.
9. Коваленко, А. Е. Отказоустойчивые микропроцессорные системы / А. Е. Коваленко, В.В. Гула — Киев: Техника, 1986. – 152 с.
10. ГОСТ 26656-85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования.). – М.: Стандартинформ, 2009. –12 с.

11. Сагунов, В.И. Контролепригодность структурно связанных систем / В.И. Сагунов, Л.С. Ломакина – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.
12. ГОСТ Р 56397-2015. Техническая экспертиза работоспособности радиоэлектронной аппаратуры, оборудования информационных технологий, электрических машин. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2016. –20 с.
13. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. – М.: Стандартинформ, 2012. –15 с.
14. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 января 2018г.№84-р, 2018. – URL: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKofeaowzJ.pdf>_(дата обращения: 20.02.2024).
15. Нормативы утилизации отходов от использования товаров на 2021 и 2022 годы. В редакции Распоряжения Правительства Российской Федерации от 29.12.2021 № 3961-р, 2021. – URL: <http://government.ru/docs/all/131880> (дата обращения: 20.02.2024).
16. ГОСТ Р 56276-2014 /ISO/TS 14067:2013 Группа T58. Национальный стандарт Российской Федерации Газы парниковые. Углеродный след продукции. - М.: Стандартинформ, 2015. – 54 с.
17. ГОСТ Р 52107-2003. Ресурсосбережение. Классификация и определение показателей. – М.: Госстандарт России, 2003. –9 с.
18. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 27.002-89. – М.: Стандартинформ, 2016. – 30 с.
19. Пархоменко, П.П. Теория вопросников (обзор) // Автоматика и телемеханика. – 1970. № 4. – С. 140 – 159.
20. Пархоменко, П.П., Основы технической диагностики: В 2-х кн / В.В. Карибский, П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян, В.Ф. Калчев; под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976.– 460 с.

21. Мозгалевский, А.В. Автоматический поиск неисправностей / А.В. Мозгалевский, Д.В. Гаскаров, Л.П. Глазунов. – Л.: Машиностроение, 1967. – 264 с.
22. Осис, Я. Я. Диагностирование на граф-моделях: На примерах авиационной и автомобильной техники / Я. Я. Осис, Я. А. Гельфандбейн. – М.: Транспорт, 1991. – 244 с.; 22 см. – Библиогр.: с. 239 – 243. – 3000 экз. – ISBN 5-277-006-49-4.
23. Сапожников, В.В., Основы технической диагностики: Учебное пособие для вузов ж-д. транспорта / В.В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М.: Маршрут, 2004. – 318с.
24. Ramamoorthy, C. V. Computer diagnosis using the blocking gate approach / C. V. Ramamoorthy, W. Mayeda W // IEEE Trans. Computers. – 1971. – Vol. C-20, № 11. – P. 1294 – 1299.
25. Ломакина, Л.С. Автоматизация проектирования контролепригодных систем / Л.С. Ломакина // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – М, 1990. – с. 222.
26. Ефанов, Д.В. Оптимизация алгоритмов диагностирования технических объектов на основе комплексного использования информационного подхода и методов теории вопросов // Известия КГУ. – Калининград, 2012.
27. Wegener, J. Evolutionary test environment for automatic structural testing / J. Wegener, A. Baresel, H. Sthamer // Information and Software Technology. – 2001. – Vol. 43, № 14. – P. 841 – 854.
28. Shiozaky, J., An improved algorithm for diagnosis of system faults in the chemical process // J. Shiozaky, H. Matsuyama, E. O'Shima, M. Iri // Computers & Chemical Engineering. – 1985. – Vol. 9, № 3. – P. 285 – 293.
29. Каравай, М. Ф. Инвариантно-групповой подход к исследованию к-отказоустойчивых структур // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 1. – С. 144–156.
30. Алексеев, В. В. Алгоритм идентификации диагностических признаков по параметрам вибрации компрессорной установки / В.В. Алексеев, П. Г. Королев, В. С. Коновалова, И. В. Калякин, А. Г. Перкова // XVIII Международная

конференция по мягким вычислениям и измерениям. (SCM'2015) 19- 21 мая 2015
СПбГЭТУ «ЛЭТИ» ул. Профессора Попова, д.5 с. 221-224.

31. Елисеев, В.В. Оценка отказоустойчивости управляющих параллельных вычислительных систем: новый подход / В.В. Елисеев, В.В. Игнатущенко, И. Ю Подшивалова // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 6. – С. 166 – 185.

32. Сперанский, Д. В. Тестирование нечетких линейных автоматов / Д. В. Сперанский // Изв. Сарат. ун-та. – 2019. – № 2. – Р. 61–66.

33. Карибский, В. В., Пархоменко П. П., Согомоян Е. С. Метод построения программ проверки устройств с памятью, описываемых моделью конечного автомата / В. В. Карибский, П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян // Автоматика и телемеханика. – 1969. – № 2. – С. 77–81.

34. Согомоян, Е. С. О диагностике неисправностей в дискретных блочных объектах / Е.С. Согомоян // Автоматика и телемеханика. – 1969. – № 10. – С. 156–167.

35. Сильянов, Н. В. Аппаратное обеспечение многофункциональных бортовых вычислительных систем / Н. В. Сильянов // Датчики и системы. – 2017. – № 8-9. – С. 27–33.

36. Graf, S. Fehlererkennungsschaltungen / S. Graf, M. Gössel M. // Berlin : Akademie-Verlag, 1987. – 146 s.

37. Граф, Ш. Схемы поиска неисправностей / Ш. Граф, М. Гессель — М. : Энергоатомиздат, 1989. – 144 с. – ISBN: 5-283-02462-8.

38. Ломакина, Л.С. Оптимизация глубины диагностирования непрерывных объектов / Л.С. Ломакина, В.И. Сагунов // Автоматика и телемеханика. – 1986. – №3. – С. 146-152.

39. Верзаков, Г.Ф. Введение в техническую диагностику / Г.Ф. Верзаков, Н. В. Киншт, В. И. Рабинович. – М.: Энергоатомиздат, 1968. – 224 с.

40. Глухов, В.В. Техническое диагностирование динамических систем. – М: Транспорт, 2000. – 96 с.

41. Гольдман, Р.С. Техническая диагностика цифровых устройств / Р.С. Гольдман, В.П. Чипулис. – М: Энергия, 1976. – 224 с.

42. Кузнецов, П. И. Контроль и поиск неисправностей в сложных системах / П. И. Кузнецов, Л. А. Пчелинцев, В. С. Гайденоко – М.: Сов. радио, 1969. – 239 с.
43. Ломакин, Д.В. Диагностирование сложных технических и программных систем / Д.В. Ломакин, А.А. Иванова, А.М. Ворон // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. – 2011. – №3(90). – С. 83–88.
44. Окле́й, П. И. Методика оценки интегрального технического состояния оборудования тепловых электростанций / П. И. Окле́й // Транспортное дело России. – 2015. – № 6. – С. 72–75. – ISSN 2072-8689.
45. Осипов, О.И. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов / О.И. Осипов, Ю.С. Усынин. – М.: Энергоатомиздат 1991 -160 с.
46. Гагунов, С.А. Проектирование легких коммерческих автомобилей с учетом требований утилизации в конце жизненного цикла // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 2 (121). – С. 135–145
47. Васькова, Н. А. К вопросу утилизации сложных технических изделий и систем / Н.А. Васькова, М. Г. Кургузкин, Ю. А. Лебедев // Материалы международной научно-практической конференции "Экология и жизнь". Ч. II.- Пенза, ноябрь 1999. – с 39-42.
48. Васькова, Н.А. Экологическое проектирование сложных технических изделий и систем / Н. А. Васькова, М. Г. Кургузкин // Инженерная экология. 2000. – № 4. – С. 50-53.
49. Васькова, Н. А. О методе оценки утилизационной способности изделий на стадии предпроектных и проектных работ / Н. А. Васькова, М. Г. Кургузкин, Ю. А. Лебедев // Материалы международной научно-практической конференции "Экология и жизнь" – Пенза, 1999. – С. 95-97
50. Королев, П.Г. Проектирование систем экологически безопасного уничтожения отходов / П. Г. Королев, Н. В. Романцова, Е. С. Сулоева // Международная конференция «Управление муниципальными отходами как важный фактор устойчивого развития мегаполиса» Санкт-Петербург WASTE 4-6 октября 2018. – С. 111-115.

51. Nikiforos, M. Distribution and capacity utilization: conceptual issues and empirical evidence / M. Nikiforos // *DK Foley – Metroeconomica*. – 2012. – P. 200-229.
52. Биоинспирированные методы в оптимизации: монография / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, П. В. Сороколетов — М.: Физматлит, 2009. — 384 С. — ISBN 978-5-9221-1101-0
53. Гладков, Л.А. Основы теории алгоритмов. Учебное пособие / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик - Таганрог: изд-во ТРТУ, 2003.
54. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик; – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.
55. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы: Учебное пособие / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик – Издательство "Физматлит" 2-е издание, 2010. – 368 с.
56. Алексеев, В.Е. Графы. Модели вычислений. Структуры данных: Учебник / В. Е. Алексеев, В. А. Таланов – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. – 307 с.
57. Батищев, Д.И. Решение задачи оптимизации нестационарной функции при помощи генетического алгоритма с использованием базы опыта / Д. И. Батищев, Е. А. Неймарк // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. Серия Информатика, управление и компьютерные технологии.СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2006. – № 1. – С. 29–33.
58. Батищев, Д.И. Оптимизация нестационарных задач комбинаторного типа с помощью генетических алгоритмов / Д. И. Батищев, Е. А. Неймарк, Н. В. Старостин // 10-я национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2006 (25–28 сентября 2006 г., Обнинск): Труды конференции. В 3 т. Т. 3. М.: Физматлит, 2006. – С. 976–983.
59. Батищев, Д.И. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации: Учебное пособие / Д. И. Батищев, Е. А. Неймарк, Н. В. Старостин – Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2007. – 85 с.

60. Батищев, Д.И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач / Д.И. Батищев; Нижегородский госуниверситет. — Нижний Новгород: 1995. — 62 с.
61. Подвальный, С.Л. Системы многоальтернативного управления. Эволюционный подход / Подвальный С.Л., Васильев Е.М. — Старый Оскол.: Тонкие наукоемкие технологии, 2023. — 376 с.
62. Баршдорф, Д. Нейронные сети и нечеткая логика. Новые концепции для технической диагностики неисправностей / Д. Баршдорф // Приборы и системы управления. — 1996. — №2. — С.48–53.
63. Riascos, L. M. A Bayesian network fault diagnostic system for proton exchange membrane fuel cells / L. M. Riascos, M.G. Simoes, P.E. Miyagi // Journal of Power Sources. 2007. — №165. — P. 267-278.
64. Hartmann, A.K. Optimization Algorithms in Physics / A.K. Hartmann, H. Rieger — Berlin, 2001. 357 p.— ISBN:9783527600878.
65. Koza, J. R. Genetic Programming / J. R. Koza. — Cambridge: The MIT Press, 1998.— 609 p. — ISBN 0-262-11170-5.
66. Шваб, К. Технологии четвёртой промышленной революции / К. Шваб, Н. Дэвис // Архивная копия от 11 февраля 2022 на Wayback Machine. — Эксмо, 2018. — 320 с. — ISBN 978-5-04-095565-7.
67. Манцеров, С.А. Внедрение принципов индустрии 4.0 в образовательную деятельность / С.А. Манцеров, К.В. Ильичев // Всероссийская научно-методическая конференция «Инновационные технологии в образовательной деятельности». — 1 февраля 2018. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева».
68. Манцеров, С.А. Разработка масштабируемой мобильной робототехнической системы роевого взаимодействия /К.В. Ильичев, С.А. Манцеров // Вестник ПНИПУ Электротехника, Информационные технологии, системы управления. — 2017. — №21. — С. 91-108.
69. Терехов, В. А. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов; СПб: Издательство С.–Петербургского университета, 1999. — 265 с.

70. Цыпкин, Я. З. Оптимальные гибридные алгоритмы адаптации и обучения / Я. З. Цыпкин // Автомат. и телемех. – 1968. – № 8. – С. 87–92.
71. Родзин, С. И. Биоэвристики: теория, алгоритмы и приложения: монография / С. И. Родзин, Ю. А. Скобцов, С. А. Эль-Хатиб. – Чебоксары: ИД «Среда», 2019. – 224 с.
72. Карпенко, А.П. «Параллельные популяционные алгоритмы одно- и многоцелевой оптимизации» // Труды Международной суперкомпьютерной конференции (22-27 сентября 2014 г.,г. Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2014. – 240-244 с.
73. Карпенко, А.П. «Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов» / Карпенко А. П. // Приложение к журналу «Информационные технологии». –2012. – № 7. – С. 1-32.
74. Манцеров, С.А. Разработка стратегии обслуживания и ремонта оборудования газотранспортного предприятия на основе индекса технического состояния / Е. А. Гаврилюк, С. А. Манцеров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 3 (118). – С. 121–126.
75. Proc. 14th International Symposium on High Voltage Engineering / M. Marketz, J. Polster, M. Beijing Muhr // Maintenance Strategies for Distribution Networks. –2005. – №14. – P. 55.
76. Smit, J.J. Trends in PD-diagnostics for Asset Management of Aging HV Infrastructures / J.J. Smit // 14th International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing/P.R.China, 25 -29 August, 2005.
77. Антоненко, И. Н. Эволюция практик и информационных систем управления ТОиР / И. Н. Антоненко, И. Э. Крюков // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 10. – С. 27–30.
78. Овсянников, А. Г. Стратегия ТОиР и диагностика оборудования / А. Г. Овсянников // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2008. – № 1. – С. 6–9.

79. Черемных, С. В. Структурный анализ систем: IDEF-технологии / С. В. Черемных, И. О. Семенов, В. С. Ручкин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 208 с.: ил. – (Прикладные информационные технологии).
80. Манцеров, С.А. Управление техническим состоянием сложных систем на основе нечеткой модели / Е. А. Гаврилюк, С. А. Манцеров // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 1 (51). – С. 91–98.
81. Манцеров, С.А. Комплексная оценка технического состояния систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами / Е. А. Гаврилюк, С. А. Манцеров, С. Г. Синичкин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11. – С. 2141–2145.
82. Манцеров, С.А. Создание системы комплексной оценки состояния станочного оборудования предприятия / С.А. Манцеров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-4. – С.754-758.
83. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде - М.: Мир, 1976.
84. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – № 8. – P. 338–353.
85. Кофман, А. Введение в теорию нечётких множеств / А. Кофман; перев. с фр. В. Б. Кузьмина; под ред. С. И. Травкина. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
86. Манцеров, С.А. Нечеткая модель надежности технических систем / Е.А. Гаврилюк, С.А. Манцеров // Системный анализ в проектировании и управлении сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – 2018. – С. 197-206.
87. Манцеров, С.А. Нечеткая модель интеллектуальной поддержки принятия решений в управлении техническим состоянием сложных систем / С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям "IS&IT'18". – 2018. – С. 44-52.
88. Манцеров, С.А. Нечёткая информационная система управления техническим состоянием оборудования / Е. А. Гаврилюк, С. А. Манцеров, А. Ю.

Панов // Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе: сборник тезисов XII отраслевой научно-технической конференции молодых специалистов госкорпорации «Росатом», 14-16 сентября 2017 г. – Нижний Новгород, 2017. – Ч. 1. – С. 47–49.

89. Манцеров, С.А. Метод нечёткого управления техническим состоянием промышленного оборудования / Е. А. Гаврилюк, С. А. Манцеров // Нечеткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения. Fuzzy Technologies in the Industry (FTI-2017): сборник научных трудов, 14-15 ноября 2017 г. / УлГТУ. – Ульяновск, 2017. – С. 41–50.

90. Ярушкина, Н. Г. Основы теории нечетких и гибридных систем: учебное пособие / Н. Г. Ярушкина. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.

91. Mantserov, S. A. Fuzzy Reliability Model of Systems for Decision Support in Technical Diagnostics / E. A. Gavriiliuk, S. A. Mantserov // CEUR Workshop Proceedings. – Electronic text data. – 2018. – №. 2258. – P. 222–234. Mode of access: <http://ceur-ws.org/Vol-2258/paper28.pdf>. – Title from screen.

92. Юсфин, Ю.С. Экологически чистое производство: содержание и основные требования / Ю. С. Юсфин, Л.И. Леонтьев, О. Д. Доронина // Экология и промышленность России. 2000. – № 3. – С. 19-23.

93. Ломакина, Л.С. Интеллектуальное управление качеством и безопасностью состояний технических и технологических объектов / Л.С. Ломакина, С. А. Манцеров, А. Ю. Панов // Научная книга, Воронеж, 2022. –192 с.

94. Манцеров, С.А. Системный анализ в интеллектуальном управлении качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов / С. А. Манцеров, Л.С. Ломакина, А.Н. Двиговская // Системный анализ в проектировании и управлении. сборник научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции. В 3 ч. Санкт-Петербург, 2023. – С. 85-94.

95. Качала, В.В. Теория систем и системный анализ: Учебник / В.В. Качала. - М.: Академия, 2008. – 352 с.

96. Волкова, В. Н. Основы теории систем и системного анализа: учебник для студентов вузов / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб: СПбГТУ, 2001. – 512 с.

97. Бреховских, С.М. Функциональная компьютерная систематика материалов, машин, изделий и технологий, «Машиностроение» / С.М. Бреховских, А.П. Прасолов, В.Ф. Солинов // Москва, 1995. – 551 с.

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

99. Манцеров, С.А. Функциональная систематика в управлении качеством и безопасностью состояний сложных технических объектов / Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – № 1. – С. 25-33.

100. Манцеров, С.А. Мониторинг состояния объектов на основе методов функциональной систематики / С. А. Манцеров // Труды НГТУ «Современные проблемы механики и автоматизации в машиностроении и на транспорте». - Н.Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2008. – №67. –С. 23-27.

101. Манцеров, С.А. Создание баз данных объектов машиностроения на основе формул функциональной систематики / С.А. Манцеров // Труды Международной молодежной НТК «БТН». - Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2006. – С.22-23.

102. 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.

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

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

105. Панов, А.Ю. Управление качеством технического состояния составных объектов / А.Ю. Панов, С.А. Манцеров // Сборник научных статей по итогам международной научно-практической конференции «Инновационный потенциал современной науки как драйвер устойчивого развития» г. Санкт-Петербургский Центр Системного Анализа, 29-30 октября 2021. – С. 92-94.

106. Манцеров, С.А. Создание информационной системы контроля параметров объектов машиностроения на основе методов функциональной систематики / С. А. Манцеров // Материалы Всероссийской научно-методической конференции «Информационные технологии в учебном процессе». - Н.Новгород, НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2008. – С.53-57.

107. Хранилов, В. П. Идентификация внутренних операторов моделей управления для задач проектирования технических систем // Тр. XII Всероссийск. совещания по проблемам управления ВСПУ–2014. — М. : ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, 2014. – С. 3281–3288.

108. Калман, Р. Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб // под. ред. Я. З. Цыпкина. — М. : Мир, 1971. – 400 с.

109. Хранилов, В. П. Классификация состояний в динамических дискретных системах распределения вычислительных ресурсов информационных систем // Материалы международного симпозиума INTELS`2010 / под. ред. К. А. Пупкова. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – С. 90–94

110. Хранилов, В. П. Системный анализ и идентификация проектной модели просветной радиолокационной системы / Ф.Н. Ковалев, В.П. Хранилов // Идентификация систем и задачи управления, SICPRO '15: труды X Междунар. конф. — М: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015.- С. 1090-1109.

111. Хранилов, В. П. Динамическая модель интерактивного виртуального распределения ресурсов при проектировании технических систем // Материалы

международного симпозиума INTELS'2008 / под ред. К. А. Пупкова. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — С. 234–238.

112. Хранилов, В. П. Нечеткая модель динамической системы интерактивного распределения ресурсов при проектировании и ее приложения // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2007. – № 2. – С. 32–41.

113. Хранилов, В. П. Формирование динамической модели управления конструкторско-технологическим взаимодействием в проектировании деталей машиностроения / В. П. Хранилов, Е.В. Тесленко, В.В. Андреев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 286–290.

114. Нусс, С. В. Экспертная система идентификации технического состояния технологического оборудования на основе нейросетевой модели / Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования / С.В. Нусс, С. А. Фролов / Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. Горная и нефтяная электромеханика 2018 / ПНИПУ, - Пермь : Изд-во ПНИПУ ; Екатеринбург : Графические системы, 2018. - С. 31-38.

115. Трофимова, М.С. Модели и алгоритмы информационного сопровождения процессов управления качеством изделий машиностроения: автореферат. канд. техн. наук: 05.13.01. - Нижег. гос. техн. университет, Н.Новгород, 2017. - 23 с.

116. 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.

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

118. Манцеров, С.А. Создание единого информационного пространства машиностроительного предприятия на основе облачных технологий /А.В. Волгин,

И.В. Гусев, С.В. Куликов, С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник ВГТУ. – 2012. – Т.8 – №6. – С. 44-47.

119. Манцеров, С.А. Система сбора и подготовки диагностической информации для удаленного использования / А.М. Бремзен, К.В.Ильичев, С.А.Манцеров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – №4 (119). – С. 41-44.

120. Манцеров, С.А. Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний сложных технических и технологических объектов/ Манцеров С.А.// Сборник материалов XXVIII Международной научно-технической конференции Информационные системы и технологии ИСТ-2022. Нижний Новгород, 2022. – С. 251-257.

121. Манцеров, С.А. Создание единого информационного пространства жизненного цикла продукции машиностроительного кластера на основе принципов CALS- технологий / С.А. Манцеров, С.В. Кузнецов, А.Ю. Панов, Д.А. Смирнов // Club 3D: Инновационное проектирование. – 2011. – №4. – С.88-95.

122. Манцеров, С.А. Построение единого информационного пространства предприятия на основе современных технологий проектирования и подготовки производства / С.А. Манцеров, В.В Кузьмин // Труды Международной молодежной НТК «БТН». - Н.Новгород, НГТУ, 2006. – С.19-20.

123. Манцеров, С.А. Развитие систем принятия решений единого информационного пространства машиностроительного предприятия / С.А. Манцеров, С.В. Куликов, А.Ю. Панов // Труды НГТУ. - Н. Новгород, 2012. – С.95-100.

124. Рассел, С., Искусственный интеллект. Современный подход / С. Рассел, П. Норвиг; 2-е изд. — М.: Вильямс, 2007. –1410 с. – ISBN 5-8459-0887-2.

125. Klir, G.J. Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A Zadeh / G.J. Klir, B. Yuan // World Scientific. – 1996. – № 6 – 840 p. World Scientific. - 1996.

126. McCulloch, W. S. A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity // W. S. McCulloch, W. Pitts // Bulletin of Mathematical Biophysics. – 1943. – №5 (4). – P.115–133.

127. Ломакина, Л.С. Нейро-нечеткие классификаторы. Теория и практика / Л.С. Ломакина, С.А. Манцеров, И.Д. Чернобаев // Научная книга, Воронеж, 2022, – 137 с.
128. Малякин, А.П. Применение методов искусственного интеллекта при технологической подготовке производства / А.П. Малякин, С.А. Манцеров, А.П. Цапаев // Справочник. Инженерный журнал, 2021. – С 22-27.
129. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition / Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard, L. D. Jackel // Neural Computation. –1989. – №1(4). – P. 541-551.
130. Yasunobu, S. Automatic train operation by fuzzy predictive control / S.Yasunobu, S. Miyamoto // Industrial Applications of Fuzzy Control. North Holland. – 1985. – 1/18.
131. Горбаченко, В. И. Интеллектуальные системы: нечеткие системы и сети: учебное пособие / В. И. Горбаченко, Б. С. Ахметов, О. Ю. Кузнецова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2018. – 103 с. – (Серия: Университеты России).
132. Mamdani, E.H. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // E.H. Mamdani, S. Assilian // International journal of man-machine studies. –1975. – №7(1). – P. 1-13.
133. McCulloch, W. A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity / W. McCulloch, W. Pitts // Bulletin of Mathematical Biophysics. – 1943. – №5 (4). P.115–133.
134. Introduction to type-2 fuzzy logic control: theory and applications / J. Mendel, H. Nagras, W.W. Tan, W.W. Melek, H. Ying // John Wiley & Sons. – 2014. – 357 p. – ISBN:9781118886540
135. Karnik, N.N. Type-2 fuzzy logic systems / N.N. Karnik, J.M. Mendel, Q. Liang // IEEE Trans. Fuzzy Syst. – 1999. – №7. – P. 643–658.
136. Ross, T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications / T.J. Ross // John Wiley & Sons. – 2009. – ISBN: 9781119994374
137. Leekwijck, V., Defuzzification: criteria and classification / V. Leekwijck, E. E. Kerre // Fuzzy Sets and Systems. – 1999. – №108 (2) – P. 159–178.

138. Karnik, N.N. Type-2 fuzzy logic systems / N.N. Karnik, J.M. Mendel, Q. Liang // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 1999. – P. 643 – 658.
139. Sugeno, M. An introductory survey of fuzzy control / Sugeno, M. // *Information sciences*. – 1985. – №36(1-2). – P. 59-83.
140. Takagi, T. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. – 1985. – №(1). – P.116-132.
141. Jang, J.-S.R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system / J.-S.R. Jang // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics : journal*. – 1993. – № 23(3). – P.116-132.
142. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике: Для ВУЗов и ВТУЗов / М. Я. Выгодский. – М.: АСТ, 2005. – 990 с.
143. Mantserov S.A. Forecasting the operation of complex technical equipment using fuzzy logic methods/ Mantserov S.A., Okunev A.V., Kocherov A.V. // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – Seattle, USA: SRC MS, Amazon KDP. – 2021. – № 27.
144. Mantserov, S. A. Development of a model of active noise reduction in internal combustion engines /S. A. Mantserov, A.N. Kocherov, A.V. Okunev // *International Russian Automation Conference (RusAutoCon-2019)*. – 2019.
145. Ломакина, Л.С. Нейро-нечеткие классификаторы / Л.С. Ломакина, И.Д. // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. –2021. №9(4). – С.11.
146. Kreinovich, V. Fuzzy rule based modeling as a universal approximation tool / V. Kreinovich, G.C. Mouzouris, H.T. Nguyen // *In Fuzzy Systems*. Springer, Boston, MA. – 1998. – pp. 135-195.
147. Kumbasar, T. Robust Stability Analysis and Systematic Design of Single Input Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers / T. Kumbasar // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2015. – №24(3):1-1. – P. 675-694.
148. Kumbasar, T. A simple design method for interval type-2 fuzzy PID controllers / T. Kumbasar // *Soft Computing*. 2014. – №18(7). – P. 1293-1304.

149. Dushkoff, M. Adaptive Activation Functions for Deep Networks / M. Dushkoff, R. Ptucha // *Electronic Imaging, Computational Imaging XIV*. – 2016. – P. 1-5(5).
150. Каменев, А.С. Нейромоделирование как инструмент интеллектуализации энергоинформационных сетей / А.С. Каменев, С.Ю. Королёв, В.Н. Сокотущенко // Под ред. В.В. Бушуева – М.: ИЦ «Энергия», 2012. – 124 с.
151. Манцеров, С.А. Нейронечеткая классификация технических состояний объектов сложной структуры // *Информационные технологии*. – 2023. – №2(29). – С. 91-97
152. Beke, A. Learning with Type-2 Fuzzy activation functions to improve the performance of Deep Neural Networks / A. Beke, T. Kumbasar // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2019. – №85. – P. 372-384.
153. Недосекин, А. О. Нечётко-вероятностная модель для оценки рисков ответственных технических систем / А. О. Недосекин, З. И. Абдулаева, Д. П. Макаренко // *Информация и космос*. – 2018. – № 1. – с. 92–99. – ISSN 2072-9804.
154. Неймарк, Ю.И. Динамические системы и управляемые процессы / Ю.И. Неймарк. – М.:Наука, 1978.–336 с.
155. Darrel, W. An Overview of Evolutionary Algorithms: Practical Issues and Common Pitfalls / W. Darrel // *Journal of Information and Software Technology*. – 2001. – №43(14). – P. 817-831.
156. Губернаторов, В.П., Особенности использования генетических алгоритмов при решении задач диагностики сложных систем / В.П. Губернаторов // *Современные проблемы информатизации в анализе и синтезе программных и телекоммуникационных систем. Сб. трудов конференции СПИ Воронеж, 2010.* – №15. – с. 319-320.
157. Губернаторов, В.П., Модификация эволюционно-генетического алгоритма для построения оптимальных тестовых последовательностей. // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2012. – №3(1). – С. 179-183.

158. Губернаторов, В.П., Применение эволюционно-генетического моделирования для синтеза алгоритмов оптимального диагностирования / В.П. Губернаторов // 16-я Нижегородская Сессия молодых Учёных. Сборник трудов конференции. – 2011. – С .176-179
159. Норенков, И. П. Исследование эффективности генетического метода с фрагментным кроссовером / И.П. Норенков // Информационные технологии. – 2008. – № 6. – С. 26-29.
160. Воронцов, К. В. Математические методы обучения по прецедентам (теория обучения машин) / К.В. Воронцов // Москва, 2011. – 119-121 с.
161. Игнатущенко, В.В., Резервирование взаимосвязанных программных модулей для управляющих параллельных вычислительных систем: организация, оценка отказоустойчивости, формализованное описание /В.В Игнатущенко, Н.А Исаева // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 10. – С. 142 – 161.
162. Ульянов, М.В. Ресурсно-эффективные компьютерные алгоритмы: разработка и анализ /М.В. Ульянов —М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 304 с.
163. Kolmogorov, A. N. Introductory Real Analysis / Translated by R. A. Silverman / A. N. Kolmogorov, S. V. Fomin. — Prentice Hall, 2009. – 403 p. – ISBN 978-0-13-502278-8.
164. Винер, Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов / Винер Н. – М.: ИЛ, 1961. – 158 с.
165. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон — М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 830 с.
166. Кирьянов, К.Г. Прогнозирование процессов с помощью уравнений нелинейной регрессии / С.А.Манцеров, К.Г.Кирьянов // Тезисы докладов регионального молодежного научно-технического форума «Будущее технической науки Нижегородского региона№, НГТУ. – 2002. – С. 93-94
167. Кирьянов, К.Г. К прогнозированию процессов с помощью уравнений нелинейной регрессии / К.Г. Кирьянов, С.А.Манцеров // Труды 6-й Научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения М.Т. Греховой, ННГУ. – 2002. – С.122-123

168. Ярушкина, Н. Г. Прогнозирование состояния технической системы с применением меры энтропии для нечетких временных рядов / Н. Г. Ярушкина, В. В. Воронина, И. А. Тимина, Е. Н. Эгов // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 2 (41). – С. 49–57. – ISSN 1991-2927.

169. Манцеров, С.А. К преобразованию нелинейных моделей источников экспериментальных данных в форме Коши к нелинейным регрессионным моделям для целей прогнозирования / С. А. Манцеров // Труды 5-й научной конференции по радиопрофизике. - Н.Новгород, ННГУ им. Лобачевского. – 2001. – С. 327-328.

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

171. Манцеров, С.А. Создание системы прогнозирования технического состояния оборудования автоматизированных систем управления / И.В. Гусев, Г.В. Костюков, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, А.В. Запорожцев, А.Ю. Панов, С.Г. Синичкин // Сборник докладов конференции «Высокие технологии в атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе». - Н.Новгород, ФГУП «ФНЦП НИИИС им. Ю.Е. Седакова», 2011. – С.148-151.

172. The Complete Guide to Ensemble Learning [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.v7labs.com/blog/ensemble-learning> (дата обращения 25.04.2024).

173. Bonab, H. R. A Theoretical Framework on the Ideal Number of Classifiers for Online Ensembles in Data Streams / H. R. Bonab, F. Can //, Proceedings of the 25th ACM International on Conference on Information and Knowledge Management, October 2016. – P. 2053–2056.

174. Mantserov, S. A. Classification of States of Multidimensional Objects Using a Soft Calculations Model/S. A. Mantserov, L.O. Fedosova, L. S. Lomakina // RusAutoCon-2022 – 2022. – URL:https://www.researchgate.net/publication/336562777_Development_of_Model_of_Active_Noise_Reduction_in_Internal_Combustion_Engines (дата обращения 25.04.2024).

175. Mantserov, S. A. Parametric model of the pipe defect description for the generation of the training set for machine learning in data-poor conditions /S. A. Mantserov, L.O. Fedosova, A.P. Tsapaev // Russian Automation Conference (RusAutoCon-2019) – 2019 – URL:<https://ieeexplore.ieee.org/document/8867740/references#references> (дата обращения 25.04.2024).

176. Mantserov, S.A. Predictive computing model based on ensemble machine learning methods for problem states of complex technical systems / S.A. Mantserov, L.S. Lomakina, A. N. Vitkovskaya // В сборнике: Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2023'AS). Proceedings of the XXVIII-th International Open Science Conference. Yelm, WA, USA, 2023. – С. 152-156.

177. Горелик, А. Л., Методы распознавания: учебное пособие для вузов / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. – М. : Высш. шк., 2004. – 261с.

178. Ломакина, Л.С., Информационный синтез контролепригодных систем / Л.С. Ломакина, П.И. Уваров // Системы управления и информационные технологии. Научн.-техн. ж. Москва-Воронеж ИПУ-ВГТУ. – 2007. – №2(28). – С. 53-57.

179. Ломакина Л.С. Информационный синтез контролепригодных систем с учетом ошибок контрольно-измерительной аппаратуры / Л.С. Ломакина, А.М. Ворон / Датчики и системы. – 2013. – № 11. – С.27-31.

180. Ломакина, Л.С. Оптимизация алгоритмов синтеза контролепригодных систем / Л.С. Ломакина, С.А. Манцеров // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – №9(4). – С.12

181. Ломакина, Л.С. Информационные технологии диагностирования сложных технических систем: монография / Л.С. Ломакина, В.П. Губернаторов // – Воронеж: Науч. кн. – 2013. – №21. – С. 160 – ISBN 978-5-98222-838-3.

182. Шалобанов, С.В., Структурные методы диагностирования линейных непрерывных систем управления / С.В. Шалобанов // – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун.та, 1997. – 87 с.

183. Ломакина, Л.С., Принцип декомпозиции в задачах обеспечения контролепригодности систем / Л.С. Ломакина, М.Ю. Панков // Системы управления и информационные технологии. Научн.-техн. ж. Москва-Воронеж ИПУ-ВГТУ. – 2009. – № 3(37). – С.35-40.

184. Ломакина, Л.С. Структурный синтез контролепригодных систем / Л.С. Ломакина, П.И. Уваров // Системы управления и информационные технологии. Научн.-техн. ж. Москва-Воронеж ИПУ-ВГТУ. – 2007. – №3(29). – С. 57-62.

185. Ломакина, Л.С. Обеспечение контролепригодности систем по информационному критерию с использованием метода динамического программирования / Л.С. Ломакина, Е.С. Прохорова // Системы обработки информации и управления. Межвузовский сборник. – Н. Новгород: НГТУ. –2002. – Том 35. – С. 116-117.

186. Тимонен, Л.С. О построении программ диагностики сложных технических объектов / Л.С. Тимонен // Техническая кибернетика. – 1966. – №4.

187. Пархоменко, П. П. Организация самодиагностирования дискретных многокомпонентных систем со структурой типа двудольных квазиполных графов (ДКПГ) / П.П. Пархоменко // Автомат. и телемех. – 2009. – № 5. – С. 180–189.

188. Муромцев, Д.Ю. Информационные технологии анализа устойчивости систем оптимального управления / Д.Ю. Муромцев // Информационные технологии в проектировании микропроцессорных систем. ИТ ПМПС-2000 : тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф. – Тамбов, 2004. – С. 53–54.

189. Пархоменко, П.П. Фигурно-решетчатые графы как модели многопроцессорных вычислительных систем / П.П. Пархоменко //Автоматика и Телемеханика. – 2005. – № 3. – С. 169 – 180.

190. Виноградов, О. В. Алгоритм обеспечения отказоустойчивости вычислительных систем на граф-моделях / О.В. Виноградов, Л.С. Ломакина, Н. В. Сильянов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 3 (122). – С. 16–22.

191. Зыков, А.А. Основы теории графов / А.А. Зыков - М.: Наука, 1987. – 664 с.

192. Ломакина, Л. С. Проектирование отказоустойчивых бортовых вычислительных систем с применением групп симметрий как моделей / Л.С. Ломакина, М.А. Надежкин, Н.В. Сильянов // Датчики и системы. – 2017. – № 8-9. – С. 33–39.

193. Манцеров, С.А. Оптимизация алгоритма синтеза экобезопасных систем / С.А. Манцеров // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – №2. – С. 48-51.

194. Манцеров, С.А. Методика оценки технического состояния систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами / Е. А. Гаврилюк, С. А. Манцеров, С. Г. Синичкин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 5 (107). – С. 191–194.

195. Мещеряков, Л.И., Идентификация диагностических параметров и состояний системы внутрифабричного гидротранспорта / Л.И. Мещеряков, С.Д. Приходченко // Геотехническая механика. Межвед. сб. науч. работ. Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 101. – С. 211-216.

196. Концепция управления техническим состоянием и целостностью объектов ГТС ОАО «Газпром» с учётом задач транспортировки газа – М.: ОАО «Газпром», 2011. –122 с.

197. Муромцев, Ю.Л. Определение границ эффективности и работоспособности сложных систем / Ю.Л. Муромцев // Автоматика и телемеханика. – 1988. – № 4. – С. 164 – 176.

198. Нефедов, С. В. Система управления техническим состоянием и целостностью объектов ГТС ПАО «Газпром» / С. В. Нефедов [и др.] // Газовая промышленность. – 2017. – № 3 (749). – С. 14–20.

199. Стецюк, А.Е. Основы технической диагностики. Теория распознавания: учебное пособие / А. Е. Стецюк, Я. Ю. Бобровников. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2012. – 69 с.

200. Панов, А.Ю. Планирование ремонтов и поставок запасных частей по данным технического состояния оборудования предприятия по производству

упаковочных изделий / А.Ю. Панов, С.А. Манцеров, И.Н. Шканов, А.И. Дмитриев // Труды НГТУ. - Н.Новгород, 2013. – № 2. – С.106-110.

201. Манцеров, С.А. Интеллектуальная диагностика динамических процессов технологического оборудования / Н. Алхатиб, С.А. Манцеров, Л.О. Федосова, В.В. Варцов / Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – №11. – С. 327-330.

202. Манцеров, С.А. Разработка информационных систем предприятия, соответствующим федеральным стандартам обеспечения безопасности информации / С.А. Манцеров, К.В. Ильичев, Е.А. Грошева, И.В. Гусев, В.Н. Дмитриев, С.В. Куликов, А.Ю. Панов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – №4 (115). – С. 9-16.

203. Mantserov, S. A. Information Decision-Support System on the Basis of the Method of Diagnostics and Control of the Technical State of Industrial Equipment / E. A. Gavrilyuk, S. A. Mantserov, K. V. Ilchev, M. I. Turikov // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, 2018. – P. 1–7.

204. Манцеров, С.А. Разработка модели процесса поверки делителей напряжения постоянного тока / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, Р.Г.Хадеев, В.Ю. Максимов // Труды НГТУ. - Н.Новгород. – 2014. – № 5. – С.276-281.

205. Муромцев, Ю. Л. Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах : Методы, модели, алгоритмы / Ю.Л. Муромцев - М.: Химия, 1990. – 143 с.

206. Kyutetsu, K. Fujitsu recycling system / К. Kyutetsu, Н.Hiroaki // Fujitsu. – 1997. –Vol. 48. – №4. – P. 310-314.

207. Kosko, B. Fuzzy systems as universal approximators / B. Kosko // IEEE transactions on computers. – 1994. – №43(11). P.1329-33.

208. Lee, C.C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller / C.C. Lee // I. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. – 1990. –№20(2). –P. 404-418.

209. Lomakina, L. S. Algorithmic support of neuro-fuzzy classification of objects of complex structure // L. S. Lomakina, I. D. Chernobaev, Y. N. Kiselev // Proceedings

of the International Scientific and Technical Congress «Intelligent Systems and Information Technologies – 2021», - Divnomorskoye. –2021. – №. 6. – P. 475-481.

210. Robert, G. Control flow graphs and code coverage / G. Robert // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. – 2010. – № 20(4). – P. 739–749.

211. Манцеров, С.А. Интеллектуальное управление процессом аддитивного электродугового выращивания / Манцеров С.А., Аносов М.С., Аносова Е.С. и др. / Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – №12. –С. 175-179.

212. Патент РФ на полезную модель №219388. Низкочастотный продольно-изгибный пьезокерамический преобразователь с корректируемой частотой резонанса / С.А. Манцеров, А.И. Хилько, А.А. Куркин и др.// № заявки: 2023105114; Дата регистрации: 13.07.2023.

213. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2023620705, 27.02.2023. База данных материалов и режимов аддитивной наплавки для обеспечения усталостных свойств изделия / Аносов М.С., Шатагин Д.А., Манцеров С.А., Баевский А.А., Аносова Е.С. Заявка № 2023620483 от 21.02.2023.

214. 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. – №1. – С. 93-96.

215. Mantserov, S. A. Software development for automated system of recording the range of motion of the shoulder joint during rehabilitation /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.

216. Yu, C.-C., An adaptive activation function for multilayer feedforward neural networks / C.-C. Yu, Y.-C. Tang // IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering. – 2022. – №1. – 6 P.

217. Clevert, D.-A. Fast and accurate deep network learning by exponential linear units (elus) / D.-A. Clevert, T. Unterthiner, S. Hochreiter // ICLR 2016. – 2015.

218. Bishop, C. Pattern Recognition and Machine Learning / C. Bishop // Springer, 2006. – 740 p.

219. 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.

220. 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.

221. Иванов, А.А. Интеллектуальные сборочные системы / А.А. Иванов, С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник машиностроения. – 2021. №3. – с 172.

222. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов – Москва, Машиностроение 1967. – 360 с.

223. Патент РФ на полезную модель Режущая пластина с многослойным покрытием / С.А. Манцеров, Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Башков А.А., Замураев И.Д.// № заявка: 217099(2022131913); Дата выдачи: 16.03.2023.

224. 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. Двиговская // Заявка № 2023682263; 16.11.2023.

225. 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.

226. Манцеров, С.А. Диагностика структурной поврежденности стали 09Г2с, полученной с использованием технологии WAAM при малоцикловой усталости на основе нейро-нечеткой классификации / Манцеров С.А., Аносов М.С., Итальянцев Д.С. // Морской вестник. 2023. №2 (86). С. 32-36.

227. 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;

228. Mantserov, S. A. Group Robotic Platform Based on Mechanisms of Swarm Intelligence / S. A. Mantserov, K. V. Plichev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 15-18 May 2018/ Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8728820>.

229. Nagras, H. A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots / H. Nagras // IEEE Trans. Fuzzy Syst. –2004. – №12(4). – P. 524–539.

230. Манцеров, С.А. Моделирование масштабируемой мобильной робототехнической системы коллективного взаимодействия для реализации задачи мониторинга внешней среды / С.А. Манцеров, К.В. Ильичев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – №2 (117). – С. 158-165.

231. Патент РФ на полезную модель Система контроля состояния дискретных источников сигналов и линии связи / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев // № заявка: 2013142384 (137837); Дата выдачи: 05.02.2014.

232. Портнягин, Н.Н. Теория, методы и эксперименты решения задач диагностики судовых электрических средств автоматизации / Н.Н. Портнягин, Г.А. Пюкке – СПб.: Судостроение, 2004. – 162 с.

233. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати // Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.

234. Манцеров, С.А. Автоматизированное рабочее место поверителя однозначных мер электрического сопротивления / С.А. Манцеров, К.В. Ильичев, В.Ю. Максимов, С.Г. Синичкин, М.И. Тюриков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – №2 (117). – С. 125-133.

235. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017661419 Рабочее программное обеспечение РПО «Корпоративный портал» версия 1 / 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 ;

236. 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.

237. Манцеров, С.А. Разработка защищенной автоматизированной информационной системы предприятия / К.В. Ильичев, Е.А. Грошева, И.В. Гусев, В.Н. Дмитриев, С.В. Куликов, С.А. Манцеров, А.Ю.Панов // Вестник ПНИПУ Электротехника, Информационные технологии, системы управления. – 2016. – №20. – С. 84-99.

238. Яблонский, С.В. О тестах для электрических схем // Успехи математических наук. / С.В. Яблонский, И.А. Чегис. – 1955. – Т.10. – № 4(66). – С. 182-184.

239. Brule, J.D. Diagnosis of equipment failures / J.D. Brule, R.A. Jonson, E.J. Kletsky // IRE Trans. – 1960. – № 9, 1. – P. 23-34.

Приложение 1. Копии патентов на полезную модель

1. Патент РФ на полезную модель №128757 «Система контроля состояния дискретных источников сигналов» / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев // № заявки: 2012154902/08 (087119); Дата выдачи: 25.01.2013.



2. Патент РФ на полезную модель №137837 «Система контроля состояния дискретных источников сигналов и линии связи» / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев // № заявки: 2013142384 (137837); Дата выдачи: 05.02.2014.



3. Патент РФ на полезную модель Режущая пластина с многослойным покрытием / Кабалдин Ю.Г., С.А. Манцеров, Аносов М.С., Башков А.А., Замураев И.Д.// № заявки: 217099(2022131913); Дата выдачи: 16.03.2023.



4. Патент РФ на полезную модель №129689 «Система контроля состояния дискретных источников сигналов» / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев // № заявки: 2012154903/08(087120); Дата выдачи:05.02.2013.



5. Патент РФ на полезную модель №128758 «Система контроля состояния дискретных источников сигналов» / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев // № заявки: 2012154904/08 (087121); Дата выдачи: 25.01.2013.



6. Патент РФ на полезную модель №128759 «Система контроля состояния дискретных источников сигналов» / С.Г. Синичкин, С.А. Манцеров, С.В. Куликов, И.В. Гусев // № заявки: 2012155838/08 (088392); Дата выдачи: 25.01.2013.



7. Патент РФ на полезную модель №219388. Низкочастотный продольно-изгибный пьезокерамический преобразователь с корректируемой частотой резонанса / С.А. Манцеров, А.И. Хилько, А.А. Куркин и др.// № заявки: 2023105114; Дата регистрации: 13.07.2023.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 219388

Низкочастотный продольно-изгибный пьезокерамический преобразователь с корректируемой частотой резонанса

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *Хилько Александр Иванович (RU), Куркин Андрей Александрович (RU), Манцеров Сергей Александрович (RU), Аюсов Максим Сергеевич (RU), Шатагин Дмитрий Александрович (RU), Галкин Владимир Викторович (RU), Корнев Анатолий Игнатьевич (RU), Антонов Андрей Александрович (RU), Бритенков Александр Константинович (RU)*

Заявка № 2023105114

Приоритет полезной модели 06 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 13 июля 2023 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 06 марта 2033 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 429b409e1bb13646b196183673b4aa7
Владимир Зубов Юлий Сергеевич
Действителен с 10.07.2023 по 02.08.2034

Ю.С. Зубов



Приложение 2. Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ

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



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 «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева». – № 20211613777 ; заявл. 31.03.2021.



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



4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662285. iIndex 1.0 [Текст] / Манцеров С. А., Гаврилюк Е. А., Ильичев К. В., Тюриков М. И. ; правообладатель ФГБОУ «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева». – № 2017619139 ; заявл. 12.09.2017 ; опубл. 02.11.2017. – М. Роспатент, 2015.



5. 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.



6. 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.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023687587

**Программа для диагностики состояния изделий,
полученных аддитивной наплавкой**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *Манцеров Сергей Александрович (RU), Аносов
Максим Сергеевич (RU), Иванов Сергей Владимирович
(RU), Желонкин Максим Викторович (RU)*



Заявка № 2023686588

Дата поступления 05 декабря 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 декабря 2023 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 42906680e1801164baf96183073040a7
Владимир Зубов Юлиан Сергеевич
Действителен с 18.12.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

7. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2023620705, 27.02.2023.
База данных материалов и режимов аддитивной наплавки для обеспечения
усталостных свойств изделия / Аносов М.С., Шатагин Д.А., Манцеров С.А.,
Баевский А.А., Аносова Е.С. Заявка № 2023620483 от 21.02.2023.



8. 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.



9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613502 Определение величины зерна для количественной оценки холоднодеформированного состояния сталей и сплавов [Текст] / С.А. Манцеров, Н.Н. Вилков, В.В. Галкин, Е.Г. Терещенко, А.А. Дербенев А.В. Кошелев //

правообладатель ФГБОУ «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева». – № 2014610743; заявл. 27.03.2014

Приложение 3. Копии документов о внедрении результатов диссертационной работы

3.1 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в АО «ЦНИИ «Буревестник»



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «ЦНИИ «Буревестник»
доктор технических наук,
профессор, академик РАН

Г.И. Закаменных
«27» 05 2022 г.



АКТ

о внедрении (реализации) научных результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук
преподавателя НГТУ им Р.Е. Алексеева
Манцера Сергея Александровича
на тему «Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью
состояний технических и технологических объектов»

Комиссия в составе председателя комиссии начальника НКЦ Ковалёва П.А. и членов комиссии: начальника отдела, к.т.н. Зайцева А.А., начальника отдела, к.т.н., доцента Чернова В.В. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Манцера С.А. на тему «Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов» по специальности 05.13.01, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, реализованы в проектной деятельности АО «ЦНИИ «Буревестник» при разработке изделий 2У670 и 2У671 в рамках СЧ ОКР «Цех-Буревестник» в виде:

1. Концепции технической диагностики, основанной на выборе адаптивных моделей вычислений и технологий, ориентированных на проблему ускорения вычислений.

2. Системы адаптивных моделей вычислений, включающей «мягкие», биоинспирированные и авторегрессионные модели вычислений.

3. Аппаратно-программного комплекса интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов.

Комиссия отмечает практическую значимость указанных результатов, использование которых обеспечивает сокращение временных и материальных затрат на проведение диагностики современных комплексов артиллерийского вооружения.

Настоящий акт не является основанием для взаимных финансовых расчетов.

Председатель комиссии,
начальник НКЦ



П.А. Ковалёв

Члены комиссии:

начальник отдела, к.т.н.



А.А. Зайцев

начальник отдела, к.т.н., доцент



В.В. Чернов

3.2 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в АО ПКО «Теплообменник»


**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ПРОИЗВОДСТВЕННО-КОНСТРУКТОРСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ**
теплообменник
 (АО ПКО «Теплообменник»)


 2 000000 240046

Пр. Ленина, 93, БОКС-1376, г. Нижний Новгород, 603950; тел.: (831) 259-99-68, факс: (831) 253-17-76, 253-09-96
 E-mail: post@teploobmennik.ru; www.teploobmennik.ru
 ОКПО 07511614, ОГРН 1025202607473, ИНН/ КПП 5258000011/525350001

14.06.2022 г. № 200400-16/44
 На № _____ от _____


УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор –
 Главный конструктор, д.э.н.
 В.В. Тягинский

АКТ
внедрения результатов диссертационной работы
Манцера Сергея Александровича
«Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью
состояний технических и технологических объектов»
 представленной на соискание учёной степени доктора технических наук
 по специальности 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации
 (в науке и промышленности) по техническим наукам

Комиссия в составе:

председатель: зам. генерального директора по качеству	А.Б. Кузьмин
члены комиссии: начальник Управления ИТ, к.т.н.	А.В. Стручков
начальник отдела САПР	А.М. Макаровский
начальник бюро экологии	Ю.В. Шруб
начальник бюро автоматизации ТП, к.т.н., доцент	И.Н. Фролова

составила настоящий Акт о том, что представленные в диссертации и опубликованные в ряде научных статей результаты Манцера Сергея Александровича используются в АО ПКО «Теплообменник» при разработке, совершенствовании конструкций и производстве авиационных систем и агрегатов.

Основная область применения – оценка текущего состояния технологического оборудования с целью его диагностики и превентивного контроля.

Разработанные автором методики интеллектуального управления качеством и экобезопасностью технологических объектов интегрированы в используемые на предприятии информационные системы мониторинга работы оборудования, контроля качества, технического обслуживания и ремонта.

Комиссия отмечает, что результаты диссертационного исследования, в которых предлагаются принципы интеллектуального управления техническим состоянием

промышленных объектов, позволили повысить эффективность использования ресурсов на проведение технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования предприятия.

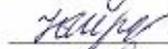
Председатель комиссии:

 А.Б. Кузьмин

члены комиссии:

 А.В. Стручков

 А.М. Макаровский

 Ю.В. Шруб

 И.Н. Фролова

3.3 Справка о внедрении результатов диссертационной работы в АО «ОКБМ Африкантов»

Акционерное общество «Опытное Конструкторское Бюро
Машиностроения имени И. И. Африкантова»
(АО «ОКБМ Африкантов»)

СПРАВКА

03.06.2022

№ 84.2-301

г. Нижний Новгород

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Манцерово Сергея Александровича
«Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний
технических и технологических объектов»
представленной на соискание учёной степени доктора технических наук

Настоящей справкой подтверждается, что выводы, положения, а также прикладные результаты, полученные Манцеровым Сергеем Александровичем использовались в АО «ОКБМ Африкантов» при планировании работ в рамках внедрения фрезерного и шлифовального оборудования с числовым программным управлением и системой интеллектуального контроля, оснащенного расширенным набором датчиков, а также при оптимизации траектории движения исполнительных устройств робототехнического комплекса аддитивного производства по технологии WAAM на основе робота Kawasaki FA-006E.

Предложенная концепция технической диагностики объектов, основанная на системе адаптивных моделей вычислений, а также методы обеспечения контролепригодности и отказоустойчивости, позволяют повысить эффективность использования технологического оборудования при изготовлении изделий.

Технический эффект от внедрения результатов диссертации Манцерово С.А. заключается в сокращении временных затрат на изготовление продукции.

Начальник бюро разработки
управляющих программ, к.т.н.



А.П. Цапаев

Заместитель главного технолога
начальник отдела новой техники
и оборудования




Д.А. Горюнов

3.4 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в филиале
РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ –
директор филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС
им. Ю.Е. Седакова», д.т.н., профессор



(Handwritten signature)
«09» 06

А.Ю. Седаков
2022 г.

АКТ

внедрения в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»
результатов диссертации Манцеров С.А. «Интеллектуальное
управление качеством и экобезопасностью состояний технических и
технологических объектов», представленной на соискание учёной
степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 –
Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и
промышленности) *по техническим наукам*

Комиссия, созданная приказом первого заместителя директора
РФЯЦ-ВНИИЭФ – директора филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС
им.Ю.Е. Седакова» от 08.06.2022 № 195-95/708-П в составе:

председатель

комиссии:

научный руководитель филиала - заместитель главного
конструктора филиала - начальник научно-
исследовательского отделения,
д.т.н., профессор Кашин А.В.;

члены комиссии:

заместитель главного конструктора филиала – начальник
научно-исследовательского отделения Куликов С.В.,
главный научный сотрудник, д.т.н., с.н.с., Орехов Ю.И.,
заместитель начальника научно-исследовательского
отделения – начальник научно-исследовательского
отдела, к.ф.-м.н. Белов А.С.,

рассмотрев диссертацию Манцеров С.А. констатирует, что ее основные
результаты использованы в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е.
Седакова» в НИР при проектировании и изготовлении макетов
вычислительных и управляющих приборов и систем, а также в научных
исследованиях при создании новых подходов, критериев и моделей к
решению задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия

решений и обработки информации, применяемых в новых технических устройствах. А именно, использованы следующие результаты:

1. Предложенные автором в главе 2 методологические аспекты обеспечения проблем управления качеством технических и технологических объектов частично реализованы в ПО для систем станков с ЧПУ разработки филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», а также при анализе функциональных схем систем и приборов при проведении оценки их технического состояния, что значительно повышает качество проектирования и снижает время на выполнение самого процесса управления технологическими объектами.

2. На основе адаптивных моделей вычислений для управления качеством состояний, представленных в главе 4, использован общий подход к интеллектуальному управлению, учитывающий особенности жизненного цикла изделий при создании в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» СУЗ стенда критических сборок и усовершенствованной системы управления и защиты исследовательского реактора ИЯУ БИГР. Применение системы управления техническим состоянием позволяет сократить число отказов приборов и систем, затраты на анализ неисправностей, обработку информации и принятия решений для их устранения.

Экономический эффект от внедрения результатов докторской диссертации Манцера С.А. заключается в снижении затрат на разработку и повышения качества выпускаемой продукции, сокращении проведения диагностических работ по поиску дефектов оборудования до 10%.

Председатель комиссии:

А.В. Кашин

Члены комиссии:

С.В. Куликов

Ю.И. Орехов

А.С. Белов

3.5 Заключение возможности применения результатов диссертационной работы в филиале ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» НАЗ «Сокол»

 <p>ОАК ОБЪЕДИНЕННАЯ АВИАСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ</p> <p>ФИЛИАЛ ПУБЛИЧНОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА "ОБЪЕДИНЕННАЯ АВИАСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ" - Нижегородский авиастроительный завод «Сокол»</p>	<p>Заведующему кафедрой «Автоматизация машиностроения» Институт промышленных технологий машиностроения ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева» доценту, к.т.н. Манцерову С.А.</p>
<p>(Филиал ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол»)</p> <p>ул. Чаадаева, д.1, г. Нижний Новгород, БОКС-593, 603950 Тел: (831) 242-36-03 Факс: (831) 242-33-04</p> <p>E-mail: nazsokol@rsk-mig.ru ОГРН 1067759884598 ИНН/КПП 7708619320/525943001</p>	
<p><i>08.06.2022 № 08.11-1д-44-2022</i></p>	
<p>На № _____ от _____ О направлении заключения на диссертационную работу</p>	
<p>Уважаемый Сергей Александрович!</p>	
<p>Направляю Вам заключение Филиала ПАО «ОАК» – НАЗ «Сокол» на Вашу диссертационную работу на соискание учёной степени доктора технических наук по теме: «Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов».</p>	
<p>Приложение: Заключение о возможности применения результатов диссертационной работы Манцеров С.А. на соискание учёной степени доктора технических наук по теме: «Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов» на 2х листах в 2х экз.</p>	
<p>С уважением, Заместитель Директора - директор по качеству и сертификации</p>	 <p>В.В. Протасов</p>
<p>Дербенев А.А. (831)242-33-54</p> 	

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор

Филиала ПАО «ОАК» НАЗ «Сокол»



Н.А. Витов

« 08 » 2022г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о возможности применения результатов диссертационной работы Манцеров С.А. на соискание учёной степени доктора технических наук по теме: **«Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов»**

В настоящее время в современных авиационных комплексах применяется большое количество сложных технических систем, основная задача которых состоит в обеспечении их стабильного функционирования с заданными показателями надежности и долговечности. В процессе жизненного цикла такие системы подвергаются непрерывному мониторингу технического состояния и работоспособности, а также, по достижению назначенного срока, ремонту установленного объема.

В связи с тем, что часто объем ремонта установлен нормативно-технической документацией, диагностика технического состояния объекта проводится укрупненно, не учитывая большого количества факторов влияния, оценив которые возможно создать индивидуальный подход к ремонту каждой технической системы и сэкономить дорогостоящие ресурсы.

Теоретические положения и практические результаты диссертационного исследования Манцеров Сергея Александровича по теме «Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов», посвященного вопросам управления качеством и обеспечения контролепригодности технических и технологических объектов, являются весьма актуальными и могут быть использованы для повышения эффективности проведения диагностических и ремонтно-восстановительных работ для комплектующих изделий авиационной техники гражданского и военного назначения. В частности одобрены к использованию:

- обобщённая схема интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний объектов сложной структуры;

- методы обеспечения контролепригодности технических и технологических объектов.

На основании информационного критерия глубины диагностирования разработаны оптимизационные алгоритмы диагностирования контролепригодных агрегатов. Применение методов обеспечения контролепригодности для проведения диагностических работ для комплектующих изделий авиационной техники гражданского и военного назначения на основе системы адаптивных моделей вычислений, позволяет обеспечить существенное сокращение трудозатрат на проведение испытаний, а также повысить точность установления и идентификации дефектов изделий.

Заместитель директора по качеству
и сертификации по агрегатно-
сборочному производству и
летно-испытательному комплексу –
заместитель начальника
управления технического контроля, к.т.н.



А.А. Дербенев

08.06.2022

Филиал Публичного Акционерного Общества «Объединенная
авиастроительная корпорация» - Нижегородский авиастроительный завод
«Сокол»

Почтовый адрес: 603035, г. Нижний Новгород, ул. Чадаева, д.1

Тел: (831)242-33-54

e-mail: a.derbenev@rsk-mig.ru

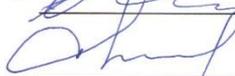
последовательность точек контроля, обеспечивающих оптимальную тестовую последовательность, а именно порядок исполнения диагностических тестов, обеспечивающего минимум затрат на идентификацию неисправностей ЭИ.001.034 ВД-203 торговой марки NEON.

Внедрение указанных методов позволило повысить качество проектирования и эффективность функционирования изготавливаемых источников питания для ручной дуговой сварки. Методы обеспечения контролепригодности внедрены в научно-исследовательской работе АО «Электро Интел», что позволило обеспечить ремонтпригодность, а также снизить количество дефектов на 8% при эксплуатации в неблагоприятных условиях.

Председатель


Гладышев О.М.

Члены комиссии


Медведев Е.И.


Краснов Д.М.

3.7 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ГКУ НО «Главное управление автомобильных дорог»


 УТВЕРЖДАЮ
 Заместитель директора
 по экономике ГКУ НО «ГУАД»
 В.А. Прушинская
 Дата: "___" _____ 2022г.

Акт о внедрении

результатов диссертации Манцера С.А.

на соискание ученой степени доктора технических наук

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ И ЭКОБЕЗОПАСНОСТЬЮ СОСТОЯНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Комиссия в составе: начальник отдела ПТ и ИО Агапов М.М., зам начальника
отдела ПТ и ИО Курочкин А.Г., главный специалист Калишев А.Н.

составила настоящий акт о том, что теоретические и практические
результаты диссертационного исследования Манцера Сергея
Александровича по теме «Интеллектуальное управление качеством и
экобезопасностью состояний технических и технологических объектов»,
посвященного вопросам управления состоянием промышленных объектов,
были использованы при управлении состоянием технических средств.

В частности, использованы:

- предложенный принцип предупредительного обслуживания по состоянию, позволяющий повысить эффективность ресурсов на проведение технического обслуживания и ремонта компьютеров и оргтехники;
- методы модифицированной функциональной систематики, на основе индекса технического показателя, которые обеспечили систематизацию информационно-технических средств предприятия и позволили провести анализ их состояния;

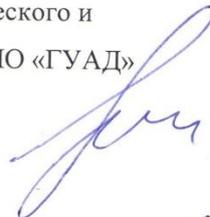
- методология интеллектуального управления качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов, особенность которой, заключается в использовании системы адаптированных моделей вычислений и совершенствовании методов обеспечения контролепригодности, отказоустойчивости и экобезопасности технических и технологических объектов.

Анализ полученных в диссертационном исследовании результатов, показывает их эффективность при систематизации и управления состоянием основных фондов и инфраструктуры предприятия, в том числе производственных процессов компаний-подрядчиков. Внедрение результатов диссертации Манцера С.А. позволило не допустить повышение издержек предприятия на содержание основных производственных фондов (оборудование).

Настоящий акт не накладывает финансовые обязательства на организацию и не является основанием для проведения расчётов.

Председатель комиссии:

Начальник отдела программно-технического и
информационного обеспечения, ГКУ НО «ГУАД»
кандидат технических наук,



Агапов М.М.

Члены комиссии:



Курочкин А.Г.



Калишев А.Н.

Государственное казенное учреждение Нижегородской области «Главное Управление Автомобильных Дорог»

Адрес

603950, г. Нижний Новгород, ул. Керченская, д. 12

3.8 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский
государственный технический
университет
им. Р.Е.Алексеева»
(НГТУ)

АКТ

№ _____

г. Нижний Новгород

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор - проректор по
образовательной деятельности

к.т.н., доцент

Ивашкин Е.Г.



2022 г.

о внедрении результатов диссертационной работы Манцера Сергея Александровича

Результаты диссертационной работы Манцера Сергея Александровича на тему «Интеллектуальное управление качеством и экобезопасностью состояний технических и технологических объектов», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук, внедрены в учебный процесс Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева на кафедрах «Автоматизация технологических процессов и производств», «Теоретическая и прикладная механика», «Технология и оборудование машиностроения», «Артиллерийское вооружение». Результаты диссертации используются при подготовке бакалавров по направлениям: 15.03.04 - «Автоматизация технологических процессов и производств», дисциплины «Автоматизированное управление жизненным циклом продукции», «Системы автоматизации и управления»; 15.03.06 - «Мехатроника и робототехника», дисциплины «Аппаратные и программные средства систем управления»; 27.03.02 - «Управление качеством», дисциплина «Всеобщее управление качеством»; 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 27.03.03 - «Системный анализ и управление», дисциплина «Основы проектирования и

эксплуатации технических систем на производстве и на транспорте». При подготовке магистров по направлениям: 15.04.04 - «Автоматизация технологических процессов и производств», дисциплина «Интегрированная логистическая поддержка продукции на этапах жизненного цикла» и подготовки 15.04.06 - «Мехатроника и робототехника», дисциплина «Надежность и техническая диагностика роботов и РТС». В образовательном процессе по специальности 17.01.02 – «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие».

Результаты диссертационного исследования используются при руководстве выпускными квалификационными работами бакалавров, магистров и аспирантов по направлениям «Автоматизация и технологических процессов и производств» и «Мехатроника и робототехника», а также при реализации программы развития системы подготовки кадров для оборонно-промышленного комплекса в образовательных организациях высшего образования, подведомственных Министерству образования и высшего образования Российской Федерации «Новые кадры ОПК» (2014-2019 г.)

Директор Института промышленных
технологий машиностроения,
д.т.н., профессор



А.Ю. Панов