МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»

(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

**Деста Абебе Бекеле**

**Разработка метода оценивания технического состояния**

**агрегатов гидросистемы воздушного судна**

**на основе анализа состояния рабочей жидкости**

**Специальность**

**AVIATION AND ROCKET-SPACE TECHNOLOGY**

Диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD)

Научный руководитель

**Ковалев Михаил Анатольевич**

доктор технических наук, доцент

**Самара – 2023**

СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc139393257)

[ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ И ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 11](#_Toc139393258)

[*1.1. Практические аспекты оценки технического состояния гидравлических систем воздушных судов 15*](#_Toc139393259)

[*1.2. Физические аспекты процессов изменения свойств рабочей гидравлических систем воздушных судов 2*](#_Toc139393260)*1*

[*1.3. Проблемы оценивания состояния гидравлических систем воздушных судов 28*](#_Toc139393261)

[*1.4. Выводы и рекомендации 3*](#_Toc139393262)*0*

[ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ГИРОСИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА 3](#_Toc139393263)1

*2.1. Введение 31*

[*2.2. Исходные понятия и определения методов теории принятия решений 3*](#_Toc139393265)*4*

[*2.3. Терминологические уточнения и сложные исходные понятия*](#_Toc139393266) *37*

[*2.3.1 Понятие образа*](#_Toc139393267) *37*

[*2.3.2 Постановка задачи синтеза образа состояний*](#_Toc139393268) *37*

[*2.4. Разработка универсальной модели (образа) описательного языка состояния рабочей жидкости 4*](#_Toc139393269)*4*

[*2.4.1 Основные понятия и определения модели языка описания состояния рабочей жидкости 4*](#_Toc139393270)*5*

[*2.4.2 Аксиоматическая модель системы представления рабочей жидкости*](#_Toc139393271) *48*

[*2.4.3 Формальная модель описания образа рабочей жидкости гидросистемы 5*](#_Toc139393272)*3*

[*2.5. Методика формального синтеза образа рабочей жидкости 5*](#_Toc139393273)*5*

[*2.6. Выводы и рекомендации 6*](#_Toc139393274)*5*

[ГЛАВА 3. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ПОВЕДЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ГИДРОСИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА](#_Toc139393275) 67

[*3.1. Введение*](#_Toc139393276) *67*

[*3.2. Основные понятия и определения теории распознавания состояния рабочей жидкости 7*](#_Toc139393277)*3*

[*3.3. Модель состояния рабочей жидкости гидравлических систем воздушных судов 8*](#_Toc139393278)*0*

[*3.4. Структурный метод моделирования распознавания состояния рабочей жидкости 8*](#_Toc139393279)*5*

[*3.5. Модель поведения рабочей жидкости 9*](#_Toc139393280)*0*

[*3.6. Выводы по главе 9*](#_Toc139393281)*6*

[ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ](#_Toc139393282) 98

[*4.1. Введение 9*](#_Toc139393283)*8*

[*4.2. Проблемы оценивания состояния рабочей жидкости 10*](#_Toc139393284)*0*

[*4.3. Основные понятия и определения 10*](#_Toc139393285)*1*

[*4.4. Постановка задачи оценки состояния рабочей жидкости 10*](#_Toc139393286)*3*

[*4.5. Мониторинг и диагностика характеристик рабочей жидкости на основе нейронных сетей 1*](#_Toc139393287)*09*

[*4.6. Синтез структуры системы оценивания состояния рабочей жидкости 11*](#_Toc139393289)*3*

[*4.7. Выводы по главе 12*](#_Toc139393290)*0*

[ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ 12](#_Toc139393291)1

[Список литературы: 12](#_Toc139393292)2

# **ВВЕДЕНИЕ**

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования**

Совершенствование процессов управления современными воздушными судами (ВС) привели к полной автоматизации их полетов, включая его перемещение в аэропорту (аэропортовая навигация и управление движением к месту старта, взлет, набор высоты, полет по маршруту, снижение и посадка). Исполнительная функция, приводящая в движение управляющие поверхности и силовые агрегаты систем управления на всех этапах, реализуется гидравлическими рулевыми приводами и сервоприводами, подключенными к источникам гидравлической энергии ВС передаваемой рабочей жидкостью (РЖ) через направляющие агрегаты, её сетевую структуру, которые в целом определяют гидросистему (ГС) ВС.

Обеспечение надёжности и качества функционирования ГС, существенно связано с состоянием её РЖ, характеризуемым значениями параметров, набор которых в определенный момент времени и определяет её состояние. Поведение РЖ ГС определяется последовательностью её состояний за заданный промежуток времени. Значения параметров, характеризующие состояния РЖ, эволюционно изменяются во времени под воздействием внешних и внутренних факторов, т.е. они являются функциями времени и других внешних и внутренних факторов, воздействующих на РЖ.

Как показала практика эксплуатации загрязнение РЖ частицами различного размера существенно влияет на работу прецизионных узлов системы управления (золотников рулевых приводов). Анализ размера таких частиц с подсчетом их количества позволяет судить об износе элементов ГС.

Проблема синтеза системы оперативного оценивания состояния РЖ, в которой центральное место занимает решение задачи распознавания образов её состояния, и анализа его результатов поставили ряд вопросов, в частности, возможности применения в ГС ВС оперативных средств контроля и классификации частиц загрязнения РЖ. В настоящее время на практике такой контроль проводится периодически в стационарных лабораториях.

Зная материал, размер и количество частиц загрязнения, которые попали в РЖ, а также динамику их изменения можно планировать работы по упреждающему техническому обслуживанию (ТО). Это поможет предотвратить критические неисправности. Определив количество частиц и темп их прироста, можно оценить насколько велика вероятность возникновения отказов элементов и узлов ГС ВС. Поэтому проблема разработки и внедрения в практику научных методов исследования вопросов оперативного диагностирования РЖ ГС ВС и средств их реализации в условиях постоянно повышающихся требований к их надежности и качеству приобретает особую актуальность

**Степень разработанности темы исследований**. На сегодняшний день особую значимость приобретает научно-практическая задача развития и совершенствования технологии диагностирования состояния ГС путем анализа параметров РЖ в условиях интенсивной эксплуатации ГС, что позволяет подтверждать их соответствие требованиям нормативно-технической документации на объект эксплуатации.

Проведенный анализ состояния вопроса оперативного контроля параметров РЖ в производственных системах технического обслуживания (СТО) авиакомпаний показал, что он не был должным образом исследован и формализован. Прежде всего, это связано с недостаточной степенью исследования взаимосвязи состояния РЖ и состояния ГС ВС и, как следствие, возможности диагностирования ГС путем анализа параметров их РЖ. Существующие подходы и методы решения данной проблемы, которые используется на практике в СТО, являются обобщенными или интегрированными и не являются моделями управления, подходящими для реального процесса. Однако за счет применения метода диагностирования состояния ГС ВС путем оперативного контроля параметров РЖ и их анализа можно преодолеть вышеуказанные недостатки. Применение такого метода ТО ГС ВС создает условия для существенного повышения эффективности работы эксплуатирующих предприятий.

В своей работе автор опирается на труды российских и зарубежных ученых в области системного проектирования и моделирования информационно-управляющих систем предприятий технической эксплуатации таких как Л. фон Барталанфи, Хартмут Биннер, Д.А. Гаврилов, В.М. Глушков, А.В. Речкалов и др.

Методы и подходы к оценке состояния РЖ ГС ВС раскрываются в трудах Сидняева Н.И., Бережновой М.А., Горбунова Р.С., Ковалева М.А., Цурилиной А.Ю., Логвинова Л.М., Мяздрикова О.А., Гареева А.М., Никитина Г.А., Подольского А.А., Деркачева И.С., Hao, Liwei, Qiao, Wei, Ht, Lijun, Canale, S., D. Amato, D.D., De Paola, G. и др.

Отдельного внимания заслуживает проблема разработки научных и системотехнических принципов оперативного оценивания состояния РЖ ГС ВС в рамках бортовых систем ТО для повышения эффективности функционирования ГС и качества систем ТО.

**Целью диссертационной работы** является разработка научных основ методов диагностирования на основе анализа параметров РЖ ГС ВС и средств оперативного оценивания её соответствия требованиям нормативно-технической документациям и техническим требованиям, руководящих технических материалов.

**Достижение поставленной цели связано с постановкой и решением следующих задач исследования и разработки:**

1. Анализ теории и практики оценивания состояния РЖ сложных ГС изделий машиностроения в процесс их эксплуатации. Постановка цели, определение проблем, решение теоретических и практических задач оперативной диагностики гидромеханических систем на основе современных информационно-измерительных систем.

2. Разработка универсальной модели описательного языка РЖ, в которую укладывались бы различные языки подзадач описания изменения параметров и показателей функционирования, характеризующих состояние РЖ ГС ВС, с учетом разнообразия её характеристик.

3. Распознавание образов состояния РЖ ГС ВС на основе решения научной задачи определения принадлежности её текущего состояния к заданному множеству параметров и показателей эталона для их автоматической идентификации в информационно-измерительных системах.

4. Построение оперативной интеллектуальной информационно-измерительной системы оценивания состояния РЖ ГС ВС.

**Область исследований:**

1. Разработка универсальной модели языка для описания состояния и поведения РЖ.

2. Разработка методов моделирования поведения и моделей оценивания состояния РЖ как основ теории синтеза её образа и поведения.

3. Разработка информационно-измерительной системы (ИИС) оценивания состояния РЖ для реализации методов распознавания состояния ГС ВС в оперативном режиме её функционирования.

**Объектом исследования** является метод оперативного оценивания состояния РЖ на базе ИИС путем сравнения ее текущего состояния с набором значений ее эталона.

**Предметом исследования** являются методы и средства распознавания образов как основы оценивания состояния РЖ ГС ВС при её функционировании на базе реализации формы распознавания «сравнение с эталоном».

**Научная новизна** работы определяется следующими положениями:

• Разработана концепция синтеза образов оцениваемой РЖ в рамках точного формализма, которая будет использоваться в качестве концептуальной основы построения её образа, отличающаяся тем, что впервые поставлена и решена задача формального описания компонент синтеза образа на основе заданного множества измеряемых параметров, представляющих образ конкретного объекта в текущий момент времени, и предложена методика формального синтеза образа РЖ ГС ВС, в результате которого осуществляется переход от оцениваемого объекта к его формальному описанию и обратно на основе множества изображений, представляющих классы эквивалентности – идеальные образы этих объектов.

• Разработан метод структурного распознавания образа РЖ – оценивания её состояния, отличающийся тем, что впервые для класса образов её состояний, элементы – образующие, конфигурации и изображения описаны в рамках точного формализма, составляющий концептуальную основу распознавания непроизводных элементов образов и их взаимных отношений, выраженных операциями композиции двузначной логики высказываний и функций высказываний.

• Разработан алгоритм распознавания состояния РЖ ГС ВС на основе сравнительной количественной оценки её показателей путем реализации формы распознавания ''сравнение с эталоном'', отличающийся тем, что цепочки показателей состояния РЖ, представляющие оценки анализируемого объекта, сравниваются с цепочками соответствующих элементов, представляющих каждый эталонный образ, при этом исследуется состояние РЖ в динамическом режиме функционирования ГС ВС.

• Разработан метод классификации состояний в рамках аксиоматической системы исчисления предикатов, отличающийся тем, что с помощью введения ситуационного исчисления удается решить задачу исчисления (определения состояния) высших порядков в рамках исчисления предикатов первого порядка.

**Теоретические и методологические основы** диссертационной работы составили научные труды российских и зарубежных специалистов по проблемам управления состоянием сложных систем изделий машиностроения. В работе используются методы синтеза образов, теории множеств, теории управления, теории принятия решений на базе исчисления предикатов первого порядка, разработки в области искусственного интеллекта – её раздела распознавания образов.

**На защиту выносится**

1. Решенные теоретические задачи синтеза образа состояния диагностируемого объекта (РЖ ГС ВС), рассматриваемые в рамках точного формализма.

2. Универсальная модель описательного языка РЖ и изменяющихся во времени параметров, определяющих ее состояние.

3. Структурный метод распознавания состояний РЖ ГС ВС с позиции теории решений и синтаксического подхода.

4. Метод оценивания состояния ГС ВС на основе анализа состояния РЖ и его структурная реализация в рамках ИИС ТО.

**Практическая значимость** работы определяется реализованными в виде ряда методических (структурных решений) принятых на апробирование и внедрение в авиакомпании ОАО “Уральские авиалинии”, а также возможностью применения автоматизированных методов в авиационно-техническом центре (АТЦ), с возможностью сокращения в производственном процессе количества высококвалифицированных человеческих ресурсов и повышения объективности оценивания состояния РЖ.

**Реализации и внедрение работы.** Результаты диссертационной работы были внедрены в учебный процесс на кафедре эксплуатационной авиационной техники ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и переданы для внедрения в авиакомпанию «Уральские авиалинии».

**Публикации.** По материалам диссертационного исследования опубликовано семь научных работ, пять из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК. Кроме того, две работы представлены в материалах международных и всероссийских научных конференций.

**Структура и объем работы**: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы, включающего 84 ссылки. Работа изложена на 129 листах печатного текста, содержит 10 рисунков и 9 таблиц.

**ВО ВВЕДЕНИИ** устанавливается актуальность поставленных задач, выделяются основные понятия и определения, используемые в работе, определяются принципы формирующие системный подход к теоретическому и практическому исследованию выявленных проблем, определяется научная новизна и практическая значимость результатов работы.

**В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** выполнен анализ теории и практики проблемы управления качеством технического обслуживания в самолётостроительном секторе в современной ситуации. Отмечается, что современный период развития самолётостроения характеризуется высокими темпами внедрения достижений в области искусственного интеллекта и средств информационных технологии.

**ВО ВТОРОЕ ГЛАВЕ** диссертационной работы рассматриваются вопросы разработки универсальной модели (образа) описательного языка состояния рабочей жидкости, классификации образов состояния РЖ на этапе ее эксплуатации путем контроля ее изменяющихся параметров. Также отдельное внимание уделено построению образа состояния РЖ, которое осуществлено в рамках точного формализма на основе измерений ее параметров и показателей свойств, изменение которых характеризует эволюцию РЖ в процессе её эксплуатации.

**ТРЕТЬЯ ГЛАВА** диссертационной работы посвящена постановке и решению научных и прикладных задач разработки методов моделирования и моделей оценивания состояния и поведения рабочей жидкости ГС ВС.

**В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ** создана интеллектуальная информационно-измерительная система мониторинга и диагностики РЖ на основе последних достижений в области систем искусственного интеллекта.

**В ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ** работы представлены основные результаты, полученные в ходе диссертационных исследований.

# **ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ И ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Исследования в области оценивания состояния ГС ВС являются комплексными и затрагивают различные вопросы конструирования, производства и эксплуатации объектов. В соответствии с ГОСТом 30848-2003: Оценивание - это принятие решения о допуске к полетам на основе результатов (оценки), полученных при анализе отдельных агрегатов (в целом) конкретного ВС [1].

Увеличение количества летных происшествий в последний период времени, а также высокая конкуренция в сфере авиаперевозок выдвинули с особой остротой проблему повышения надежности бортовых систем ВС.

ГС являются одним из определяющих элементов самолетостроения поскольку они представляют собой неотъемлемую часть современного, технологического и оптимизированного летательного аппарата. ГС для самолетов впервые появилась в 1930-х годах [2]. Она относится к основным вторичным силовым системам, которые передают механическую энергию от двигателей к исполнительным компонентам с помощью жидкости под давлением. Технологичность ГС обуславливается экономичностью и массогабаритными факторами, за которыми очень внимательно следят современные ведущие самолетостроительные компании мира. Благодаря оптимизации этих факторов достигаются необходимые надежность, быстродействие и эффективность системы.

Современные ГС – это наиболее сложные и важные динамические комплексы, представляющие собой источники энергии современного ВС. Особенности функционирования подобных систем и агрегатов, определяются их изменяющимися динамическими характеристиками. При этом остро ставится вопрос предотвращения внезапных отказов ГС в процессе эксплуатации. Наиболее оптимальной стратегией ТО ГС ВС является упреждающее обслуживание, т.е. деятельность по своевременному выявлению и устранению первоначальных симптомов отказа. Оно основано на отслеживании тенденции деградации работы ГС. Цель состоит в том, чтобы получить функциональные симптомы, которые возникают на ранних стадиях предотказного состояния.

Но для того, чтобы профилактическое техническое ТО было эффективным, необходимо иметь соответствующие методы, средства оценки и мониторинга состояния ГС и технологии их реализации, позволяющие получать необходимую информацию в режиме «реального» времени. Последнее в свою очередь требует разработки и использования эффективных методов и средств автоматического контроля технического состояния, как отдельных элементов, так и систем в целом. Одним из наиболее чувствительных признаков развития отказов в ГС являются ее динамические характеристики, в частности, мгновенные значения расходов, давления и других параметров РЖ, которые претерпевают существенные изменения в процессе функционирования системы [3].

Анализ накопленных и опубликованных экспериментальных данных показывает возможность использования динамических характеристик ГС для выявления ее предотказного состояния.

Ущерб, причиненный аварией по вине ГС ВС, очень серьезен. Например, в 2003 году из-за повреждения трех гидравлических систем перевернулся фюзеляж самолета рейса 232 United Airlines, 110 пассажиров погибли [4].

ГС, соединенная с насосом высокого давления, клапаном и исполнительными механизмами, решает ряд задач на протяжении всего срока эксплуатации самолета, а именно: выпуск и уборка шасси, поворот передней стойкой шасси, управление механизацией крыла (выпуск закрылков, интерцепторов и т.д.), бустинг рулей управления [5–10].

Все эти технологические процессы, которые поддерживает и обеспечивает ГС, также могут быть реализованы с помощью электрических систем, однако инженеры отдают предпочтение именно гидравлике из-за того, что задачи, перечисленные выше, требуют больших усилий (выпуск и уборка шасси) или быстродействия и плавности работы (бустинг рулей управления). Конечно, электрические системы способны обеспечить благоприятные показатели необходимых усилий и быстродействия с плавностью работы, но при равных условиях они будут проигрывать в массогабаритных и экономических аспектах ГС [11].

С развитием технологии оборудование, комплектующие элементы и части ГС становятся все более сложными, соответственно обеспечение их надежности и качественного обслуживания выходят на первый план для разработчиков, производителей и клиентов. В то же время в условиях развития Четвертой промышленной революции обнаружение неисправностей и прогнозирование отказов системы становится сложной задачей. Чтобы повысить надежность и снизить стоимость жизненного цикла ГС, в настоящее время существует большой спрос на применение адаптивных, гибких технологий диагностирования.

Известно, что нормативные документы устанавливают жесткие требования к надежности ВС. В то же время отказы многих из функциональных подсистем ГС (например, электрогидравлических систем управления рулевым поверхностями) могут создавать предпосылки для катастроф и аварий. Так, по статистике, 12,7% авиационных происшествий связаны со сбоем в работе ГС. Это определяет актуальность проблемы повышения надежности ГС ВС, что позволит повысить безопасность полетов. Ее решению посвящены работы таких авторов как Нгуен Ч.М., Зорин В.А., Хасанов И.И., Шамбазов Д.А., Маркова Л.В., Bishop, F. E., Smith, M.; Kloda, J.; Friel, J., Musyurka, A.V., Башта Т.М., Белянин П.Н., Бербер В.А., Комаров А.А., Лозовский В.Н., Матвеенко А.М., Мозгалевский А.В., Смирнов Н.Н., Черненко Ж.С. и др.

Заложенные в ГС на этапах проектирования и изготовления надежностные свойства можно реализовать только при условии ее грамотной эксплуатации, одним из основных путей достижения которой является совершенствование СТО. Повысить эффективность обслуживания ГС можно за счет разработки и внедрения на практике нового подхода к ТО, ориентированного на упреждение отказов. Это одно из наиболее перспективных, но в то же время малоисследованных направлений в области ТО, которому в последнее время все большее внимание уделяют специалисты в самых разных отраслях народного хозяйства. Установлено, что применение упреждающих технологий позволяет сократить количество отказов на 70-75%, расходы на обслуживание - на 25-30%, а время простоя объектов ТО - на 35-45% [12].

Как известно, эффективность использования и надежность ГС зависит от качества РЖ, которой она заправлена. При работе гидравлической жидкости в гидросистеме на нее действует ряд внешних факторов, которые приводят к ухудшению ее функциональных свойств. Анализ неисправностей и отказов, обнаруженных во время эксплуатации ВС, показал, что до 34% из них приходится на основную ГС и подсистему шасси [13–16]. При этом доминирующей причиной отказов ГС является ухудшение эксплуатационных свойств РЖ за счет наличия в ней частиц загрязнения, воды и молекулярного кислорода, которые влияют на окислительные и коррозионные процессы.

Таким образом, на сегодняшний день особую значимость приобретает научно-практическая задача развития и усовершенствования технологий контроля качества РЖ ГС в соответствии с современными условиями их эксплуатации, на основании чего можно будет сделать вывод о состоянии и надёжности всей ГС ВС в целом.

Изучением и выявлением связи эксплуатационных свойств РЖ ГС с кинетикой химических преобразований ее углеводородного состава занимались такие ученые как Рылякин Е.Г., Жесткова С.А., Кодиров Ш.И., Сухоставский О.В., Галкин В.Б., Большакова Г.Ф., Клименко Л.П., Конюхова Н.Е., Клюева В.В., Yue, X.; Ge, Y.; Ding, F.; Yongxiang, L. и др.

Методы и подходы к оценке эффективности РЖ ГС раскрываются в трудах Сидняева Н.И., Бережновой М.А., Горбунова Р.С., Цурцилиной А.Ю., Логвинова Л.М., Мяздрикова О.А., Никитина Г.А., Подольского А.А., Деркачева И.С., Hao, Liwei; Qiao, Wei; He, Lijun; Canale, S.; D Amato, D.D.; De Paola, G. и др.

Отдельного внимания заслуживает проблема интеграции систем контроля за качеством и состоянием РЖ ГС в общий диагностический контур бортовых систем ТО, а также проблема контроля за сложными условиями функционирования ГС ВС (высоким уровнем вибраций, давления, расхода, загрязнения, температуры РЖ и др.). Поэтому для того, чтобы упреждающее ТО было эффективным необходимо разработать соответствующие алгоритмы, средства контроля и методологию их применения. Это определило актуальность проблемы разработки новых методов и средств контроля за состоянием РЖ.

Таким образом, повышение конструктивной сложности ГС ВС и перспективных решений для оценки и оценивания технического состояния ГС ВС с одной стороны, а также рост требований к надежности бортовых систем с другой, определяют актуальность проблемы разработки новых более эффективных систем оценивания состояния ГС ВС, которые построены на основе упреждающего подхода к ТО ГС. Для получения такой системы необходимо разработать методику построения алгоритма диагностирования, а также средств контроля, позволяющих реализовать его на практике.

* 1. ***Практические аспекты оценки технического состояния гидравлических систем воздушных судов***

Технологии оценки состояния ГС ВС впервые были включены в промышленные приложения начиная с 1970-х годов. Свою первую апробацию они прошли на самолете A-7.

Эволюция технологий диагностики ГС ВС, разрабатываемых на национальном уровне некоторых государств и NASA в целом, представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Технологии оценки технического состояния ГС ВС

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Годы | Национальные систем | NASA |
| 1950 | Анализ надежности  Испытание и оценка системы  Качественные методы | Анализ надежности  Тестирование и оценка системы |
| 1960 | Моделирование  Анализ отказов | Моделирование и симуляция  Анализ отказов, Телеметрия данных  Системная инженерия |
| 1970 | Мониторинг системы  Техническое обслуживание,  ориентированное на надежность  Системная инженерия  Встроенный тест (BIT) | Мониторинг системы  Встроенная защита от сбоев  Управление избыточностью  Управление неисправностями |
| 1980 | Расширенный BIT  Шины передачи данных и  цифровая обработка информации  Мониторинг состояния систем  Сквозное управление качеством | Расширенный BIT  Шины передачи данных и цифровая обработка информации |
| 1990 | Встроенная диагностика  Запись полетных данных | Удаленный мониторинг состояния системы, Удаленное управление состоянием системы |
| 2000 | Взаимосвязанный мониторинг  состояния гидравлической системы  Интегрированное управление  техническим состоянием | Интегрированное управление техническим состоянием  Инженерия и управления |

Итак, как свидетельствуют данные, приведенные в таблице 1, на ранних этапах диагностика неисправностей ГС в основном опиралась на наземные испытания. Однако при таком подходе неисправности не могли быть точно обнаружены из-за ограничений измерительных приборов и методов. Кроме того, некоторые виды отказов, происходящих во время полета, на проявлялись при наземных проверках. Моделирование и имитация стали применяться в анализе неисправностей с 1960-х годов.

За последние тридцать лет техника зондирования, методы диагностики и прогнозирования достигли значительного прогресса. В 1993 году компания ARINC впервые представила руководство по проектированию бортовых систем технического обслуживания. Это произвело революцию в ТО ВС, и обновленная система была принята на вооружение в самолетах Boeing 747-400 и F-35.

В настоящее время система диагностики технического состояния ГС ВС представляет собой комплексный набор возможностей диагностики, прогнозирования и управления, которые базируются на применении прогрессивных информационных технологий.

Анализ архитектуры, представленной на рисунке 1, показывает, что система диагностики включает в себя две части: бортовую и автономную.

Бортовая система обеспечивает мониторинг и управление информацией о ВС для различных систем мониторинга и наблюдения. Система поддержки обеспечивает обмен текущей информацией между ВС и наземным центром контроля, что помогает обслуживающему персоналу принимать решения и планировать ТО.



Рисунок 1 - Архитектура системы диагностики ГС ВС на базе современных технологий

Учитывая тот факт, что с ростом автоматизации и развития индустрии возникает потребность в интеллектуальных машинах, способных идентифицировать и классифицировать, а также принимать соответствующие решения с помощью искусственного интеллекта и машинного обучения, на сегодняшний день для анализа состояния РЖ ГС ВС, уровня ее отработанности и загрязнения особое распространение получили сенсорные системы, которые позволяют в режиме онлайн проводить мониторинг с помощью системы датчиков.

Несмотря на важность проблемы ранней оценки и оценивания технического состояния ВС в среде производителей авиационных агрегатов и эксплуатирующих организаций отсутствует единое мнение относительно эффективности существующих методов и средств.

Оценка гидравлических жидкостей означает сравнение параметров пробы отработанной гидравлической жидкости с параметрами чистой жидкости. Также важно контролировать предельные значения либо производителем ВС, либо производителем гидравлической жидкости. Это означает, что производитель рекомендует ограничения на значения параметров жидкости. Измерения проб жидкости дают общее представление о качестве жидкости. Большинство предприятий сосредоточено на так называемом профилактическом обслуживании. Основными смыслами и целями профилактического обслуживания являются анализ проб смазочного материала, состояния смазочного материала, состояния машины, рекомендации по следующим шагам, сохранение базы данных и анализ тенденций [17–20].

Для обеспечения надежности и безопасности ГС ВС обычно состоит из нескольких небольших систем с резервированием и высокой мощностью, образующих несколько наборов гидравлических систем с взаимным резервированием [21]. Например, у А320, А380, В737, В787 и других гражданских самолетов ГС состоит из трех-четырех независимых систем. Рассмотрим структуру ГС ВС на примере ГС самолета семейства А320.

Airbus A320 построен с использованием высокотехнологичных материалов, таких как композиты, состоящие из углеродного волокна или стекловолокна и титана. Благодаря легким компонентам разработана удлиненная версия A321. Другая версия A320 - это меньший A319. Эта версия объединила приводы A320 и A321.

Система повышения давления работает при давлении 0,555 МПа. Клапан сброса давления настроен на 0,579 МПа. Максимальный объем топлива в конфигурации с двумя основными баками составляет 15609 литров. Конфигурация с тремя топливными баками составляет 23859 литров с 2% запасом на тепловое расширение. Самолет оборудован тремя гидравлическими системами [22, 23]: Зеленой, Желтой и Синей (рисунок 2) [24]. Каждая питается от своего бака. Нормальное давление в системе составляет 20,68 МПа.

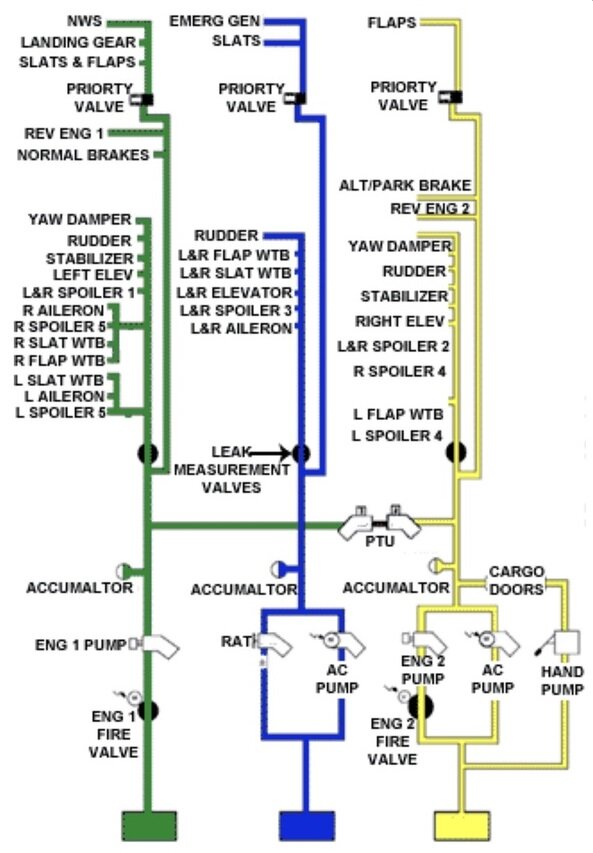


Рисунок 2 - Гидросистема самолета Airbus A320

**Зеленая система управляет** выпуском и уборкой шасси, включая управление носовым шасси, системой штатного торможения, реверсом тяги двигателя №1 (слева), элементами управления полетом, блоком силовой передачи, боковым демпфером (в полете), взлетно-посадочными закрылками, подвижными передними кромками (прорезями).

**Синяя система управляет** элементами управления полетом, двигателем/генератором постоянной скорости, взлетно-посадочными закрылками и плавающими передними кромками (пазами).

**Желтая система управляет** грузовыми дверями, резервным и стояночным тормозами, реверсом тяги двигателя №2 (правая сторона), органами управления полетом, блоком силовой передачи, боковой воздушной заслонкой (в полете), взлетно-посадочными закрылками [25].

Зеленая система (система 1) питается от насоса, расположенного на двигателе №1. Синяя система (система 2) питается от насоса с электроприводом. Желтая система (система 3) питается от насоса, расположенного на двигателе №2. Эта система также может питаться от насоса с электроприводом, который позволяет выполнять манипуляции на земле при выключенных двигателях 1 и 2.

Диагностика гидравлических жидкостей проводится путем сравнения параметров взятой пробы с параметрами чистой жидкости, с их предельными значениями. Производитель рекомендует предельно допустимые значения параметров жидкости. Анализ позволяет получить общее представление о состоянии РЖ и определить степень ее износа.

Профилактическое обслуживание в настоящее время является наиболее распространенным. Его цель состоит в том, чтобы проанализировать образец смазки, определить ее состояние и состояние машины. Цель также состоит в том, чтобы рекомендовать следующую процедуру и сохранить результат в базе данных, провести анализ тенденций и выполнить ТО быстро и точно. Метод очень эффективен и снижает затраты на простои, запасные части, эксплуатационные вещества и ремонтные работы.

**Основные контрольные интервалы:**

Предполетная и летная проверка: проводится перед каждым полетом, не более чем за два часа до вылета по расписанию. Задачи могут выполняться летным экипажем в рамках утвержденного списка предполетных проверок.

Отбор проб производится либо в чистую стеклянную тару, либо в пластиковые контейнеры. Самолет подключают к источнику энергии, и гидравлические системы активируют для отбора проб. Пример результата исследования пробы РЖ самолета А-321 приведен в таблице 2.

Таблица 2 - Результат анализа пробы жидкости HyJet IV-A plus, отобранной из ГС самолета Airbus A-321

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Наименование показателей | Результаты исследования в ГС | | |
| зеленая | синяя | желтая |
| Кинематическая вязкость при 37,8 0с, мм2/с | 8,078 | 7,126 | 7,265 |
| Кислотное число, мг КОН на 1г масла | 0,64 | 0,92 | 0,53 |
| Содержание воды, % | 0,1540 | 0,2557 | 0,1403 |
| Удельная электропроводность, мк См/м | 52,2 | 55,1 | 49,6 |
| Плотность при 230С, кг/м3 | 1001,7 | 1006,2 | 1003,3 |
| Элементный состав | 16 | 21 | 18 |
| Класс частоты по NAS1638  Количество частиц в 100см3 образца при размере частиц, мкм:  5 – 15  15 -25  25 -50  50 -100  более 100 | 6  1450  90  50  0  10 | 6  6200  70  40  0  10 | 7  5010  310  70  20  20 |

Автоматическая оценка кода чистоты основана на микроскопическом анализе твердых загрязняющих веществ, содержащихся в гидравлической жидкости. Принцип заключается в суммировании количества частиц на мембранном фильтре с известной площадью после того, как известный объем гидравлической жидкости был отфильтрован через мембрану.

* 1. ***Физические аспекты процессов изменения свойств рабочей жидкости гидравлических систем воздушных судов***

ГС ВС является важнейшей частью системы управления ВС, от работы которой напрямую зависит управляемость ВС, а высокая надежность ее работы является залогом успешного выполнения авиационных задач [26,27]. Однако эффективность работы ГС ВС ограничивается большим количеством отказов системы и коротким сроком службы компонентов. Во многих случаях причиной отказа компонентов является загрязнение РЖ ГС. Загрязняющие вещества в РЖ могут повлиять на срок службы компонентов, повреждая поверхность компонентов в результате коррозии или износа. Статистика показывает, что загрязнение РЖ ГС является причиной 60–80% отказов авиационных ГС [28]. Типичным примером является задержка на 4 месяца доработки конструкции и испытательного полета перспективного самолета в Китае поскольку РЖ оборудования, находящегося под открытым небом, была загрязнена и вовремя не была заменена [29]. Таким образом, контроль загрязнения РЖ стал важным фактором для продления срока службы ГС ВС.

Загрязнение означает смешивание нежелательных примесей с гидравлическим РЖ. Примесями могут быть пыль, грязь, стружка, пластик, волокна, песок, влага и т.д.

**Последствия загрязнения:**

1. Окисление РЖ, что вызывает коррозию металлических деталей.
2. Образование геля и лака, которые будут прилипать к внутренним поверхностям компонентов. Следовательно, движущиеся компоненты не смогут двигаться легко, в движении будут возникать заедания и рывки. Кроме того, гель и лак также могут блокировать прохождение потока РЖ.
3. Повышенный износ, который вызывает шероховатость рабочих поверхностей агрегатов ГС, из-за чего увеличивается трение и нарушается работа системы.
4. Поскольку при повышенном трении выделяется дополнительное тепло, скорость окисления масла резко возрастает, и свойства масла быстрее ухудшаются, масло портится в кратчайшие сроки.

**Причины загрязнения и способы устранения:**

Загрязнения попадают в гидравлическое масло из различных источников, некоторые из которых перечислены ниже.

1. Новые компоненты: при ремонте и обслуживании изношенные или поврежденные старые компоненты заменяются новыми компонентами. Эти новые компоненты могут быть грязными внутри и содержать пыль, грязь и другие загрязнения.
2. Небрежность при обслуживании: обслуживающий персонал должен знать о необходимости соблюдения и правилах обеспечения чистоты.
3. Окружающая среда: грязная окружающая среда вызывает загрязнение гидравлической жидкости. Окружение должно содержаться в чистоте.
4. Износ: изнашивание приводит к высвобождению мельчайших частиц из материала, поэтому смазка должна быть надлежащей, а изношенные компоненты должны быть заменены в ближайшее время.
5. Коррозия деталей: частицы ржавчины попадают в масло, поэтому следует избегать коррозии.
6. Влажность атмосферы: вода из атмосферы попадает в масло. Это можно свести к минимуму, соблюдая надлежащий уход.
7. Хранение масла: масло следует хранить в закрытой таре. Окружение должно содержаться в чистоте, нельзя допускать смешивания разных сортов масла.

Загрязнения вносятся в РЖ при изготовлении, ремонте и эксплуатации ГС ВС, а также при ее хранении. Эксплуатационные загрязнения по причине появления можно разделить три группы.

1. Загрязнения как результат деградации физических и химических свойств РЖ. В жидкости для ГС при их изготовлении вводят вязкостные и антиокислительные присадки, ингибиторы коррозии и красители, которые в процессе хранения и при эксплуатации под действием различных факторов могут выпадать из жидкости в виде загрязнений.
2. Загрязнения, вносимые из атмосферы. Эти загрязнения поступают в баки ГС через системы наддува и дренажа, через заливные горловины в момент заправки ГС, а также через штоки силовых цилиндров.
3. Загрязнения как результат износа материала компонентов ГС. Частицы загрязнения генерируется в РЖ вследствие разрушения материала, из которого изготовлены поверхности трения компонентов ГС. Причем интенсивность генерирования таких частиц определяется свойствами материала, а также жесткостью условий эксплуатации компонентов ГС.

Преобладание частиц загрязнения той или иной группы зависит от времени эксплуатации ГС, особенностей ее конструкции, соблюдением правил монтажа и эксплуатации, а также ряда других факторов. Однако для «стандартной» ситуации, когда закончен этап приработки ГС, и ее обслуживание проводится согласно требованиям, основной причиной появления загрязнения в ГС является износ [30–32]. Причем количество и размер частиц (дисперсный состав частиц), выделяемых соприкасающейся парой, представляют собой ценную информацию о техническом состоянии всего узла трения агрегата. Это обстоятельство является одной из основных предпосылок для использования дисперсного состава частиц загрязнения рабочей жидкости в качестве интегрального диагностического признака упреждающего обслуживания ГС ВС.

Таким образом, основной причиной появления в РЖ ГС ВС частиц загрязнения является процесс изнашивания пар трения в трибомеханических узлах гидроагрегатов. Следовательно, контролируя дисперсный состав этих частиц, можно оценить техническое состояние компонентов ГС.

Твердые, жидкие и газообразные загрязнения являются тремя основными типами загрязнений в ГС [33]. В настоящее время пассивное ТО является наиболее широко используемым методом борьбы с загрязнением РЖ. Оно включает в себя регулярную замену РЖ ГС или фильтрацию загрязняющих веществ и обычно использует оборудование для повышения давления при хранении РЖ [6, 34]. Пассивные методы ТО могут лишь в некоторой степени снизить содержание загрязняющих веществ в РЖ и не решают трех проблем, а именно:

* игнорирование опасностей, связанных с газообразным загрязнением,
* отсутствие контроля над источником загрязнения,
* отсутствие эффективных методов очистки от жидких и газообразных загрязнений.

В этой работе предлагается активный метод ТО для активного контроля загрязнения масла твердыми, жидкими и газообразными загрязняющими веществами, чтобы преодолеть сохраняющиеся проблемы пассивных методов ТО.

РЖ, циркулирующая в ГС, является носителем информации об интенсивности и степени износа деталей ГС. Тесная корреляционная связь между скоростью износа и накоплением частиц в РЖ, изменением физико-химических свойств РЖ обуславливает необходимость разработки методов диагностики технического состояния сопрягаемых деталей внутренней РЖ ГС.

При эксплуатации под воздействием различных факторов РЖ теряет свои первоначальные свойства: масло накапливает частицы загрязнения, изменяются его физико-химические свойства.

Эксплуатационные загрязнения представляют собой, как правило, вещества видоизмененных первоначальных (исходных) продуктов, например, горюче-смазочных материалов, применяемых в системах и агрегатах авиационной техники в качестве рабочего тела или источника энергии. Видоизменения указанных продуктов происходят под воздействием высоких температур, давлений и других факторов [29]. Эксплуатационные загрязнения в первоначальный период работы попадают в гидравлические РЖ из внутренних полостей агрегатов ГС (остаточные загрязнения), а при дальнейшей эксплуатации накапливаются в РЖ в результате термического разложения и окисления углеводородов, коррозии и износа агрегатов ГС, попадания пыли и влаги из атмосферы [35]. Загрязнения ухудшают физико-химические и эксплуатационные свойства РЖ [36–39].

Основными контрольными и диагностическими процедурами оценки состояния РЖ ГС были следующие.

1. Контроль вязкости РЖ. При эксплуатации ГС вследствие деструктивного разрушения молекул и других факторов происходит уменьшение вязкости масла. Это ухудшает его свойства и может привести к повышенному износу соединенных деталей гидроагрегатов [40]. С целью проведения контроля кинематической вязкости масла применяются вискозиметры разных типов: капиллярные, ротационные, вибрационные. Причем наибольшее распространение получили капиллярные вискозиметры.
2. Контроль чистоты РЖ. Чистота масла ГС ВС строго регламентируется. Для оценки чистоты используются значения массы (объема) частиц загрязнений в единицах объема жидкости, мг/л или %.

Так, например, изменение объема растворенного воздуха по закону Генри рассчитывают по формуле:

,

где α – коэффициент растворимости воздуха в РЖ; *Wp* – объем РЖ; *p(t)* и  – соответственно абсолютное текущее значение давления РЖ в приводе и его исходное значение.

Объем нерастворенного воздуха в жидкости определяется по следующей зависимости:

,

где - суммарный объем растворенного и нерастворенного воздуха в РЖ.

1. Оценка содержания воды в РЖ ГС. Ее проводят путем анализа потрескивания в процессе нагрева пробы масла. Для этого пробирку, заполненную на 60...70% высоты маслом и закрытую пробкой, в центре которой расположен термометр, устанавливают на масляную баню и нагревают до температуры 150 °С. При наличии воды масло начинает пениться и потрескивать. Факт наличия воды считается зафиксированным, если отчетливое потрескивание слышится не менее, чем два раза [41].

Температурные условия работы РЖ в различных зонах ГС неодинаковы. В более благоприятных условиях находится та часть масла, которая обеспечивает смазку переднего подшипника, редукторов, коробок приводов агрегатов. Температура подшипников турбины за счет подвода к ним тепла от более нагретых деталей двигателя достигает 200—260°С [20], что приводит к разогреву масла на выходе из подшипников до 100—140° С и более. Подшипники турбины нагреваются не только во время работы двигателя, но и после его остановки, когда подача масла для охлаждения подшипников и подача воздуха для охлаждения турбины прекращаются, а тепло от горячих деталей двигателя в течение некоторого времени сообщается подшипникам.

Нагрев масла сверх максимально допустимых температур вызывает его коксование и приводит к выпадению смолистого осадка. Интенсивность окисления зависит oт химического состава масла, его температуры, вида и времени контакта с воздухом и каталитического действия металлов. При большой прокачке масла через двигатель оно интенсивно перемешивается с воздухом, вспенивается, что также способствует окислению. С повышением температуры скорость окисления возрастает. Если при температуре 15—20˚С минеральное масло длительное время (несколько лет) практически не окисляется, то при температуре выше 200° С его окисление (сопровождающееся испарением) происходит в течение нескольких минут [42].

Продукты окисления, накапливаясь в масле, приводят к изменению его внешнего вида и физико-химических свойств. Масло темнеет, увеличивается его вязкость, возрастает кислотность. Под кислотностью масла понимается количество миллиграммов щелочи (едкого калия КОН), необходимого для нейтрализации органических кислот, содержащихся в 1 г. масла.

Термическое окисление горячего масла способствует отложению различных углеродистых веществ на деталях, соприкасающихся с ним. Наиболее часто встречаются следующие случаи загрязнения двигателя, вызываемые окислением масла:

* появление лаковой пленки вдоль беговой дорожки подшипников;
* забивка элементов масляных фильтров откачивающих магистралей;
* отложение осадка на подшипниках турбины в виде «бахромы»;
* появление отложений в трубопроводах, канавках и жиклерах масло подающих форсунок.

Вследствие большой площади контакта с металлами и воздухом при окислении масла образуется липкая маслообразная масса темного цвета — шлам. Загрязнение масла продуктами окисления приводит к значительному перегреву двигателя (ухудшается теплоотдача), вызывает коробление деталей, заедание и заклинившие подвижных сочленений, что усложняет и удорожает ТО и ремонт двигателя.

Учитывая возможность значительного нагрева подшипников двигателя, соответственного роста рабочей температуры масла, необходимы такие масла, которые при высокой температуре длительно противостояли бы образованию смолистых веществ. Способность масла сохранять свой состав и свойства при работе в двигателе называют стабильностью. Противостояние масла термическому окислению получило название термоокислительной стабильности.

* 1. ***Проблемы оценивания состояния гидравлических систем воздушных судов***

Трудности, которые возникают в процессе проведения оценки технического состояния ГС ВС имеют разную природу возникновения и связаны с аналитическими, техническими, информационными, конструктивными, процедурными и еще многими другими факторами. Очевидно, что в рамках проводимого исследования рассмотреть каждый из них подробно не представляется возможным, поэтому кратко охарактеризуем некоторые [2, 7, 11, 43, 44].

Во-первых, проблема выбора необходимых диагностических параметров. Чаще всего для исследования применяются обобщенные параметры, которые характеризуют техническое состояние гидропривода (или гидроагрегата) в целом. Так, например, анализ значений колебаний скорости выходного звена гидродвигателя позволяет сделать вывод о его общем техническом состояния, однако не дает возможности точно установить, что именно является причиной такого состояния (изменение расхода масла, выход из строя гильзы цилиндра или износ уплотнения поршня). С одной стороны, использование обобщенных показателей позволяет значительно снизить трудоемкость оценки, особенно при неплановом ТО, однако самостоятельно такие параметры не указывают на неисправность. Это может быть осуществлено только в процессе одновременной регистрации нескольких значений из разных систем.

Во-вторых, мониторинг технического состояния ГС ВС производится путем привлечения широкого круга субъектов, вследствие чего поступает большой поток разнообразной информации, который систематизируется не в полном объеме. Полученные данные наглядно не отображаются и не обобщаются. Кроме того, в большинстве случаев отсутствует централизованное автоматизированное рабочее место для мониторинга соответствующей информации. Поэтому в данном контексте особую актуальность приобретает создание централизованного ресурса для систематизации данных, формирования базы знаний и наглядного изображения технического состояния системы в различных условиях.

В-третьих, в некоторых случаях проведение диагностики требует дополнительно сложных и дорогостоящих подготовительных работ, например, полной или частичной разборки агрегатов, обработки больших массивов исходной разнородной информации, связанной с графиком мероприятий по технической эксплуатации систем.

В-четвертых, углубленный анализ взаимосвязей между входными и выходными параметрами отдельных агрегатов, входящих в структуру сложных ГС ВС, и техническим состоянием этих агрегатов показывает, что на практике в ряде случаев имеет место нарушение выполнения условий правильности работы отдельных агрегатов как блоков логической схемы, а именно – нарушение условий алгебры логики. Так, например, наличие широкого диапазона возможных изменений давления и расхода рабочей жидкости в ряде систем гидравлических приводов, в зависимости от режима их работы, приводит к появлению на отдельных участках «логически незначительных» связей между параметрами конкретных агрегатов и функциональным состоянием гидропривода. Это означает, что выход значений параметров отдельных агрегатов за пределы требований не влечет за собой выхода значений функциональных параметров гидропривода в целом также за пределы требований. Кроме того, следует отметить, что не всегда для диагностируемой ГС могут быть определены пороговые значения совокупных выходов логических блоков, входящих в ее логическую модель. Указанные специфические особенности работы ГС значительно усложняют применение для их диагностики в чистом виде логических схем [45–48].

* 1. ***Выводы и рекомендации***

На основе проведенного анализа данных о реальном состоянии методов и средств можно сделать вывод о недостаточной эффективности их применения в рамках технологий упреждающего обслуживания как самостоятельного комплекса средств по обнаружению предотказного состояния узлов и агрегатов современных ГС ВС вследствие наличия серьезных погрешностей, как технических средств измерений, так и методик, на основе которых делаются выводы и заключения о техническом состоянии ГС.

Исходя из этого, особенно важным могут стать исследования состояния РЖ, изменения его параметров в ходе эксплуатации в зависимости от наличия в нем того или иного загрязнения. Особенно это становится актуальным если учесть тот факт, что принцип действия современных средств основывается на исследовании только частиц износа, наличие которых в отобранной пробе масла не является обязательным, а также возможность возникновения ошибок и погрешностей в процессе пробоподготовки для проведения анализа частиц.

Таким образом, наличие математической модели высокой степени адекватности, учитывающей изменение характеристик масла ГС с течением срока эксплуатации, позволит повысить эффективность диагностики технического состояния и раннего выявления неисправностей ГС в рамках упреждающего обслуживания.

Проведенные исследования показали, что дальнейшее направление исследований в данной области связано с созданием системы моделей состояния РЖ, учитывающей все его составляющие.

**ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ГИДРОСИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА**

* 1. ***Введение***

Этот раздел диссертации посвящен теоретическим вопросам классификации образов состояния РЖ на этапе ее эксплуатации по измерениям ее изменяющихся параметров: кислотности, плотности, содержания механических примесей, ввода растворимых кислот, содержания воды, чистоты РЖ, удельной электропроводности, термокислотной стабильности, кинематической вязкости, кислотного числа. В данной работе образ состояния РЖ строится в рамках точного формализма на основе измерений ее технических характеристик, которые изменяются в процессе ее эксплуатации. Пример описания реальной РЖ приведен в таблице 3. Ее состояние определяется значениями регламентируемых технических характеристик, измеряемыми в конкретной ситуации.

Таблица 3 - Описание масла НГЖ-5У

|  |  |
| --- | --- |
| **Наименование показателя** | **Норма по ГОСТ (ТУ)** |
| Внешний вид | Прозрачная жидкость |
| Цвет | От фиолетового до синего |
| Кинематическая вязкость, мм2/с: | |
| при 50°С, не менее | 8,5 |
| при −60°С, не более | 4200 |
| Температура, °С: | |
| вспышки в открытом тигле, не ниже | 155 |
| застывания, не выше | -65 |
| Кислотное число, мг КОН/г, не более | 0,08 |
| Плотность при 20°С, кг/м3 | 1060—1080 |
| Содержание механических примесей, водорастворимых кислот и щелочей | отсутствие |
| Содержание воды, %, не более | 0,1 |
| Чистота жидкости по ГОСТ 172216 | не грубее 10 класса |
| Удельная электрическая проводимость, мк См/м, не менее | 40 |
| Термоокислительная стабильность после окисления при температуре 200°С в течение 30 ч: | |
| а) кинематическая вязкость, мм2/с, не более, при температуре: | |
| 50°С | 10,5 |
| -60°С | 5000 |
| б) кислотное число, мг КОН/г, не более | 0,15 |
| в) коррозия поверхности металлов, г/м2, не более | ±1,0 |

Рабочая жидкость НГЖ-5У (ТУ 38.401-58-57-93) – синтетическая взрыво- и огнестойкая, эрозионностойкая жидкость, изготовленная на основе эфиров фосфорной кислоты, содержащая пакет добавок, улучшающих вязкость, антигидролизные, антиоксидантные, антикоррозионные и противоэрозионные свойства. Имеет температуру самовоспламенения 595-630°С, медленно горит в пламени, не поддерживает горения и не распространяет пламя. Жидкость НГЖ-5У полностью совместима с жидкостями НГЖ-4 и НГЖ-4У.

Отметим, что РЖ для большинства практических целей несжимаема, и этот факт позволяет передать энергию движения РЖ по трубопроводам на большие расстояния без потери времени или скорости. Однако РЖ будет расширяться или сжиматься, оказывая механические воздействия, в результате изменений температуры (температурных воздействий). При движении РЖ необходимо также учитывать ее динамические характеристики. Трение, существующее между молекулами жидкости, а также между жидкостью и трубопроводом, по которому она течет, увеличивается с увеличением вязкости или скорости потока. Трение приводит к тому, что часть энергии, вырабатываемой насосами, преобразуются в тепло, а давление в трубопроводах снижается. Любое изменение в конструкции трубопровода увеличивает или снижает скорость потока РЖ и создает турбулентность, что приводит к изменению давления по потоку при изменении сечения.

В настоящее время концепция состояния РЖ относится в основном к области эвристики, и соответствующие концепции на языке описания РЖ только начинают разрабатываться. Конечно, в дополнение к прямым описаниям, эвристические описания, как правило, интерпретируют состояние РЖ наряду с общепринятыми концепциями, т.е. принятыми описаниями в соответствии с ТО.

В этом отношении можно сказать, что любое данное состояние с общей точки зрения может быть интерпретировано как метрическое пространство с регулярными числовыми характеристиками, а состояния в этом состоянии - как открытое множество в этом пространстве. В работе изучаются лишь те свойства РЖ, которые зависят от выбранного набора показателей. К таким свойствам относятся ряд физических свойств, указанных выше. Они характеризуются измеренными показателями РЖ.

Далее кажется вероятным, что если к указанным измерениям добавить оператор возможности из модальной логики, то можно интерпретировать более чем два состояния (исправно/неисправно). Для эвристики хорошо подходит физическая модель в виде системы показателей, по которым можно интуитивно судить о состоянии РЖ, в которой понятия пространственного времени, вещества и возможной идентичности приобретают смысл.

Оценивание состояния РЖ в заданной ситуации, как упорядоченного множества совместимых состояний ее технических характеристик, с общих позиций, если суть описания состояний технических параметров характеристик объекта исследования, которые описывают в данный момента времени конкретную ситуацию, то есть описание ситуации [49, 50].

Разработка специальных математических методов оценивания состояния РЖ, моделей и алгоритмов, применяемых в СТО для получения оценок и оценивания (принятия решения о возможности использования РЖ по назначению), является актуальной научно-исследовательской проблемой, решение которой обеспечивает необходимый теоретический уровень, лежащий в основе использования точных моделей, методов решения задач оценивания состояния в данной ситуации. Для того, чтобы формулировка задачи была содержательной, она должна включать в себя адекватное представление задачи на некотором языке, что требует описания, связанных с ней множеств, которые должны быть адекватно описаны на этом языке.

Таким образом, содержательная теория задач и их решения, должны обеспечивать такое представление, в котором все элементы задачи представлены однозначно, а решения задач должны включать в себя точные модели и теории.

* 1. ***Исходные понятия и определения методов теории принятия решений***

Разработка моделей описания методов теории и алгоритмов решения задач оценивания состояния РЖ – есть задача принятия решений, лежащая в основе их классификации для допуска ее к эксплуатации. Процедура классификации РЖ, как правило, базируется в рамках современных подходов на выделении совокупности технических характеристик, определяемых при их измерениях (таблица 3). Видимая тривиальность решения задач оценивания состояния РЖ, при наличии хорошо развитой бортовой системы ТО и аппаратных средств измерения, не дает оснований отказываться от соответствующей деятельности квалифицированных системных аналитиков, принимающих решения по данным системы и выполненных измерений, на базе которых строится изображение ее состояний и оценок изображений специалистами по ТО на всех этапах обслуживания ВС.

Задача принятия решений в рамках общего подхода является задачей выбора вариантов альтернатив на базе соответствующей организации (лицензированная лаборатория оценки состояния РЖ). Однако это лишь необходимые, но недостаточные условия функционирования системы оценивания состояния РЖ, дополнительно требуется высокая профессиональная подготовка лица принимающего решения (ЛПР). Существующая постановка задачи принятия решений, в которой задано множество вариантов состояний X (конечное) приводит к выбору какого-либо из вариантов состояния определяемого набором показателей РЖ для конкретной ситуации , которое связано с некоторым исходом , где Y – множество возможных исходов, которые в этой задаче сводятся только к двум (0 или 1), что не соответствует задачам ТО ВС, альтернативы при котором равны трем. Решение этой задачи требует новых логических оценок состояния РЖ.

В рамках формальной логики состояние РЖ может быть описано как совокупность (последовательность) решающих правил, которые представляются выражениями вида:

, ТО ⟨решение⟩.

Выбор решающего правила в современных условиях полностью ложится на ЛПР без логического обоснования процедуры принятия решения. Формализация этого решения в данной работе использует лингвистический подход к распознаванию, как зрительных, так и незрительных образов.

В работе осуществлено исследование и разработка концепции описания состояния класса объектов ТО – их образа, который представляется абстрактной структурой – математической моделью, т.е. формальным описанием состояния объекта ТО, включающим множество образующих 𝒜, представляющих отношения или функции, из которых по определенным правилам ℛ строятся регулярные конфигурации, система которых (ℛ) характеризует регулярность образов из заданного класса.

Образующие – это элементы - носители информации, которые имеют значение некоторых первичных высказываний.

Множества всех образующих 𝒜 состоит из неперескающихся классов образующих , где ⍺ - общий индекс, индекс класса образующих,

Интерпретация этого разбиения заключается в том, что качественно сходные образования относятся к одной и той же категории [51–53].

Образующая определена в конкретной области рассуждений о РЖ - G, показатели которой имеют эталонные и аналитические значения для конкретной ситуации. Она определяет характеристики своего входа (состояния), объединение которых охватывает область рассуждений. Для оценивания состояния РЖ используются свойства – это признаки . Образующим ставятся в соответствие признак , при чем в качестве значений признака могут выступать целые числа, действительные числа и т.д. Одной из составляющих признака служит индекс класса образующей ⍺, другие составляющие представляют более конкретную информацию. Обычной является ситуация, когда образующая определена применительно к некоторой среде X. Опорным пространством X в данной работе является математическая модель реальной среды – образ РЖ. Образующие РЖ характеризуют её признаки, значениями которых являются числа опорного пространства X, стандартные для эталона и измеренные для текущего её состояния.

Таким образом, образующие состояния РЖ в данном исследовании могут быть охарактеризованы определенным набором измерений (числовых значений), которые служат индикаторами результатов исследования. Для построения образа РЖ могут быть применены дискриминационные подходы. В работе будем иметь дело с конкретными образующими, которые определяются применительно к среде РЖ, выступающей в роли опорного пространства, в котором можно задать определенные преобразования , используемые для определения инвариантных свойств объектов ТО. Эти образующие в рамках единого подхода к синтезу образа состояний РЖ для формирования отдельных ее факторов, образуют их описания в конфигурациях. Конфигурация в работе будет определяться составом (перечнем образующих) и структурой (их соединением). Конфигурация определяет конкретные характеристики РЖ и, как правило, является обычной конфигурацией.

Объединение регулярных конфигураций идентифицируются наблюдателем или системой наблюдения, результаты которых соответствуют множеству регулярных конфигураций, называемых изображениями, которые являются отдельными фрагментами образа РЖ. Таким образом, вводится в теорию представлений объектов ТО наблюдаемость при формировании изображения. Изображение зависит от наблюдателя или системы наблюдения и способа обработки, получаемой в этом процессе информации. Формализация получения изображения связана посредством правила идентификации R. Тогда, с общих позиций, правила наблюдения позволяют различать конфигурации в изображении, а для идентификации правила их объединения в изображения используется класс эквивалентности (ℛ). С общих позиций, изображения будем обозначать через , а их множества через 𝒯.

.

Элементы из 𝒯 являются идеальными изображениями соответствующих компонент РЖ, а класс эквивалентности I, содержащий эти c-конфигурации, обозначается как I⟨c⟩ [54].

* 1. ***Терминологические уточнения и сложные исходные понятия***

***2.3.1 Понятие образа***

Центральной задачей ТО является классификация объектов ТО по их состоянию, которая с позиций искусственного интеллекта относится к одному из направлений распознавания образов, которая тесно связана с вопросами решения задач оценивания состояния объектов ТО. С этих позиций распознавание образа состояния РЖ в работе является основой, лежащей в определении состояний объектов в конкретной ситуации. Под образом будем понимать множество объектов из заданного класса. Это определение будем использовать в соответствии с решаемыми в данной работе задачами [55].

Таким образом, класс образов с формальных позиций – это множество образующих, конфигураций, изображений, которые определяются задачей данной работы, связанной с построением образов в заданном множестве образующих, которые разлагаются на подобразы – множества конфигураций, формируемых наблюдателем для описания изображений. Из множества изображений, в свою очередь, строится образ состояний объекта ТО, в частности РЖ.

***2.3.2 Постановка задачи синтеза образа состояний***

С учетом приведенных условий, основная задача синтеза образов состояния объектов ТО, в конкретной ситуации, в замкнутом виде, с использованием точного теоретико-множественного формализма представления ситуации в данный момент времени и состояний как множества регулярных конфигураций, характеризующих его отдельные стороны – изображения, из множества которых строится образ состояния этого объекта, может быть записано следующим образом:

*Построить в заданном множестве 𝒜 образующих – результатов ТО множество регулярных конфигураций , отражающих ситуацию текущего момента ТО, описываемого совместными состояниями отдельных компонентов объекта ТО (жидкости), результаты которых интерпретированы, как принято в практике ТО, заменой принципа бивалентности (либо истина либо ложно) трехзначной системой логики введением высказывания ни истина и ни ложно, т.е. принять третье логическое значение для описания определенных состояний, которые имеют место быть в данный момент времени t и может быть выражено конъюнкцией формул For в трехзначной логике Лукасевича, заданных требований, выступающих в качестве ограничений на отдельные показатели РЖ* [54]*.*

Используя логику Лукасевича (введение третьего истинностного значения, которое интерпретируется как возможность и оператора необходимости , определяемые через исходный оператор ( на основе этих определений строятся истинностные таблицы для , т.е. трехзначная логика объединяет понятие значений “истина”, “ложно” и “возможно”. Именно такая логика лежит в основе принятия решения при ТО ВС [56].

Задание образа состояния РЖ, как пространства G, в общем случае предполагает одновременное задание её структуры – образующих и разрешенных операций над образующими. Знание G является определяющим фактором в представлении образа состояний РЖ ГС ВС для принятия решений о допуске или не допуске её к эксплуатации и, как следствие, ВС к полету, что связано с формальным определением таких понятий как “описание”, “описательный язык”, “образ”, “состояния”, “событие” и ряда специфических понятий для объектов из этого класса, вводимых специальными требованиями производителя объекта ТО. Так, например, для РЖ ГС ВС : “кинематическая вязкость”, “кислотное число”, “содержание воды”, “удельная электропроводность”, “плотность”, “элементный состав”, “класс чистоты” [57].

Описание формальных аспектов задачи потребовало введение понятия среды для представления РЖ G, как упорядоченной пары , где U – абстрактное множество, характеризующее ГС ВС, а ℛ - семейство нетривиальных разбиений на U компоненты, представляющие свойства P структуры ГС ВС. Множество U есть область рассуждений. Каждый элемент ℛ называется свойством P. Если P – свойство, то каждый элемент p будет значением P.

Для исследования состояний структуры РЖ, как компоненты ГС ВС, в ней задано подсемейство ℛ’ из ℛ, включающее её показатели, составляющие основу для оценивания состояния реальной структуры РЖ. Тогда реальная среда РЖ с формальных позиций есть тройка, где - её среда и ℛ’ – подсемейство в реальной структуре из ℛ. Элементы подсемейства ℛ’ представляют входные свойства реальной среды.

Конечное подсемейство структуры состояния РЖ является полным, если

(1)

Это семейство структуры РЖ устанавливает границы различимости элементов области рассуждений. Любой объект в U полностью задан указанием его принадлежности набору элементов каждого свойства ℛ’. Для решения задачи представления объекта исследований введены следующие определения. Задана реальная среда ГС ВС . Обобщенный объект – РЖ в ней можно представить строкой вида , где n – такое конченое целое число, что , и выполняется (1) для любого k, отражающее свойство объекта ТО числом.

Для перевода обобщенного объекта в реальный объект, если для всех и или содержится в p, или пересекается с p, объект определяет образ, именно образ . Образ, определяемый объектом, есть объект.

В данной работе класс образов ограничен и представляет множество образов, в рамках которого выделено множество подмножеств состояний, образующих класс подмножеств данного множества, который является областью рассуждений, в которой РЖ ГС ВС является рассматриваемым объектом ТО. Для каждого конкретного элемента данной области существуют общие утверждения – предикаты вида , где P – некоторое свойство, p – его значение, а x – переменная, уточняющие структуру области рассуждений, которые совместно с логическими связками составляют описательный язык образа РЖ как объекта исследований.

Для решения задачи синтеза образа состояния РЖ в главе использована теория синтеза образов в рамках точного формализма [53]. Задача рассмотрена с формальных позиций.

Пусть U – метрическое множество, содержащее все элементы с определенными свойствами, например, множество всех параметров РЖ. Для описания свойств всех элементов множества вводится база переменных , характеризующих параметры соответствующих свойств элементов из U, и принадлежащих им значений из множеств *i*, . При этих обозначениях элемент из U представляет образующую *a*, множество которых обозначим через 𝒜, а для отдельного первичного элемента будем использовать .

Объект в данном разделе (РЖ) – это образ, который определяется значением входных свойств P.

Изучение формальных аспектов этой проблемы выявило необходимость создания универсальной модели описательного языка, которая могла бы вместить в себя различные описательные языки, связанные с конкретными показателями РЖ. Это позволило бы заменять один язык другим, что необходимо для постановки и решения основной задачи – определения чистоты РЖ и состояния ее компонентов.

Исходя из задачи описания образа состояния РЖ ГС ВС и введенных выше понятий, область рассуждений о её состоянии определяется анализом проб РЖ (пример приведен в таблице 4), эталон которой представляется номинальными параметрами РЖ.

Таблица 4 - Показатели состояния РЖ (пример результата анализа ее пробы)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Наименование показателей | Результаты исследования |
| 1 | Кинематическая вязкость при 37,8 0С, мм2/с | 8,078 |
| 2 | Кислотное число, мг КОН на 1г масла | 0,64 |
| 3 | Содержание воды, % | 0,1540 |
| 4 | Удельная электропроводность, мк См/м | 52,2 |
| 5 | Плотность при 230С, кг/м3 | 1001,7 |
| 6 | Элементный состав | 16 |
| 7 | Класс частоты по NAS1638 | 6 |
| 8 | Количество частиц в 100см3 образца при размере частиц, мкм:  5 – 15  15 -25  25 -50  50 -100  Более 100 | 1450  90  50  0  10 |

Для удобства обозначим элементы области как (по числу анализируемых параметров). Формально область обладает восьмью входными свойствами, имена которых есть функции, описанные в таблице 4. Эта область обладает следующим свойством: каждый отдельный элемент принадлежит отдельному и единственному состоянию объекта. Поэтому каждое подмножество области есть подобраз состояния.

Образ РЖ – её эталон и анализируемый образец формально описывается на основе предикатов, которые состоят из утверждений вида *P(x)=p*, где P -некоторое свойство, p – его значение, а x – переменная. Этот предикат истинен для всех элементов, т.е. любой элемент из эталона РЖ удовлетворяет утверждению G(x), где G(x) есть For

(2)

Это утверждение рассматривается как формальное описание РЖ в рамках теоретико-множественного подхода

(3)

В силу использования описания объектов терминами распознавания образов и учета специальных ограничений на функцию, реализуемую одним пороговым элементом устройства распознавания, образ РЖ G представляется предикатами вида ⍺, где М – множество значений свойства, которому отвечает элемент из множества N. При специализации природы множества, в частности, М – множество входных значений свойств оцениваемого объекта, а N – множество значений свойств эталона этого объекта, т.е. РЖ.

Образ эталона Gэ – множество N состояний компонент РЖ *А* представляется использованием утверждения типа . Рассмотрим множество *А* разбитым на классы, соответствующие определенному показателю РЖ *(i=1, 2, …, 8)*. Тогда эталон РЖ может быть представлен конъюнкцией показателей, представляющих эту жидкость, а именно

(4)

где *,*

*,*

*…*

*.*

Понятие разбиение на классы тесно связано с понятием отображения, т.е. есть отображение М в N. Тогда .

Следовательно, если *A* – некоторое множество из N; совокупность всех элементов вида , где – есть образ , для каждого множества B из M определяет его полный прообраз т.е. есть совокупность всех элементов из M, образы которых принадлежат множеству B.

Содержательная формулировка задачи для исследования свойств РЖ потребовало разработки дополнительных структур для адекватного описания образа её состояния на языке теории синтеза образов. Описание состояния РЖ представлено в виде иерархической структуры более простых подобразов.

Универсальная модель состояния РЖ помещена в реальную среду ГС ВС и представлена для цели распознавания образов её состояния совокупностью показателей , которые представляют образующие состояния РЖ, а их соединение по заданным правилам приводит к регулярным конструкциям и представляют комбинаторную структуру компонент её состояний – конфигураций (цепочки), характеризуемую составом 𝒳//:

*,* (5)

где правая часть – неструктурированное множество показателей 𝒳, и структурой:

(6)

где *(i=1, 2, …, k)* показатели из совокупности показателей 𝒳, объединенных в подобраз, входящий в описание образа состояния РЖ.

Описание задачи синтеза образов состояний РЖ в рамках теоретико-множественного подхода не придает ей форму удобную для применения методов решения выше сформулированной задачи, которые для ее решения требуют решения целого комплекса подзадач, что требует, в свою очередь, создания универсальной модели описательного языка.

* 1. ***Разработка универсальной модели (образа) описательного языка состояния рабочей жидкости***

Современная наука ищет способы и методы строгой формализации на основе концепции искусственного интеллекта и различных форм ее представления для подзадач на основе универсального языка логики исчисления предикатов в силу его гибкости, интегрируя последние достижения математики, логики, кибернетики, информатики и других точных наук. Интеграция науки основана на принципах системного подхода, методологической основой которого является теория и практика математического моделирования сложных систем, к которым, несомненно, относится система распознавания состояния РЖ ГС ВС.

Еще раз отметим, что актуальность задачи создания универсальной модели РЖ вытекает из необходимости решения проблемы оценивания ее состояния в данной ситуации на основе анализа значений совокупности ее характеристик. Для решения этой проблемы в работе применен системный подход, реализуемый в рамках универсальной модели, позволяющей выполнить адекватное описание задачи и ее подзадач. Для предложенной выше теоретико-множественной интерпретации области рассуждений в работе введены дополнительные ограничения на касающиеся ее структуры области рассуждения. При этом предполагаем, что для каждого конкретного элемента этой области существуют некоторые общие утверждения, в соответствии с символьной логикой, называемые предикатами. Таким образом, если получен элемент из области, то его принадлежность к образу, описывающему состояние РЖ, предполагает необходимость соответствия правилам, введенным для описания состояния в заданной ситуации. Следовательно, будем считать, что описательный язык образов состояния РЖ, содержащий начальные предикаты и логические связки “или”, “и”, “не”, “импликация” и другие, позволяет описать любой элемент из класса рассматриваемых образов состояний РЖ. При этом множества состояний РЖ, определяемых определенным набором показателей, определяют ее образ.

***2.4.1 Основные понятия и определения модели языка описания состояния рабочей жидкости***

Содержательная формулировка задачи оценивания состояния РЖ в заданной ситуации должна включать в себя адекватное описание ее представления. При этом прагматика и семантика представляется в формализованном виде. Рассматриваемая в данном разделе задача должна включать в себя адекватное представление на некотором языке. Никакую конкретную задачу нельзя поставить пока связанные с ней множества не будут описаны на каком-либо языке.

В данной работе язык оценивания состояния РЖ в конкретной ситуации строится для решения прикладных задач в рамках исчисления предикатов первого порядка и представляет формальную аксиоматическую систему ситуационного исчисления состояния РЖ в реальной ситуации, отображающую эволюционные процессы изменения состояния РЖ.

При этом под задачей оценивания состояния РЖ будем понимать цель Z – определение состояния S РЖ в конкретной ситуации для данного момента времени t, которую с формальных позиций можно представить трехкомпонентной системой. С общих позиций, для ее формулировки воспользуемся понятием “пространство состояний”, а саму задачу (Z S), сформулированную выше, представим в следующем виде:

, (7)

где S – заданное множество образующих показателей эталона РЖ, определяющих ее базовое состояние на языке предикатов; F – множество операторов, переводящих описание показателей состояния РЖ в ее параметры на основе их измерений (операции измерения); Z – множество целевых показателей состояния S РЖ.

Задача в обобщенной постановке может быть представлена кортежами

(8)

1. Чтобы сформулировать и выразить целевую ориентацию состояния РЖ, определить обобщенные ценности отдельных вариантов для достижения конкретного состояния РЖ и обосновать предпочтения при анализе альтернатив, использование кортежа оказывается в общем случае недостаточным. Следует также уделить внимание степени ограничений, налагаемых на стоимость некоторых из подчеркнутых свойств РЖ (X), и параметров представления РЖ. С учетом этих положений целевая модель M (O)ц может быть представлена кортежем. С учетом функциональной модели

(9)

Модель является средством:

1. Создания обобщенного описания и представления объективных и сопоставимых оценок целей РЖ, единых и обязательных для всех эксплуатантов РЖ ГС ВС;
2. Формирования предпочтений при анализе вариантов и оценке степени достижения заданной целевой ориентации РЖ.
3. Модель продуктивности , относится к подмножеству показателей моделей-интерпретаторов, представленных в форме таблиц (например, таблиц 2 и 4) для показателей, представленных в его составе показателей различного уровня сущности (“кинематическая вязкость”, “кислотное число”, “содержание воды”, “удельная электропроводность”, “плотность”, “элементный состав”, “чистота”), представленных в номинальной форме РЖ, а также для указанных выше составных показателей. Документация на оценивание состояния РЖ должна отвечать требованиям ГОСТов и ОСТов и руководящих технических материалов и содержать все сведения, необходимые и достаточные для использования данной РЖ в эксплуатационных условиях.

Все множество представлений необходимо для решения задач оценивания состояния РЖ: определение состояния РЖ в пространстве состояний, сведение задачи к подзадачам.

Использование представления в пространстве состояний подразумевает возможность создания полной модели состояний РЖ. При этом модели представления параметров РЖ реализуются за счет компонентов и (или) элементов системы распознавания состояния показателей. Используя представление, которое сводит задачу (оценивания состояния РЖ) к подзадачам (получение оценок индексов), задачу можно разбить на набор подзадач, решение которых позволяет выполнить исходную задачу. Этот процесс можно применять рекурсивно для порождения подзадач, подподзадач и т.д., до тех пор, пока наконец не получится множество тривиальных задач, решения которых в конечном итоге известны. Использование представлений на основе декомпозиции исходной задачи реализует принцип “редукции сложности” и в применении к задаче оценивания состояния РЖ эквивалентно разбиению РЖ на подобъекты с меньшим индексом меры и созданием связей между этими подобъектами, разбиение конкретной РЖ – неизвестного целого на – показатели, которые в общем случае могут иметь различную степень определенности, также означает по существу построение подмоделей РЖ.

Решение задачи оценивания состояния РЖ при использовании типа представления, сводящего задачу к подзадачам, осуществляется по следующей схеме.

Сначала необходимо заимствовать набор соответствующих моделей индикаторов для формирования оценивания конкретной РЖ, являющейся предметом задачи.

Затем выбрать модели показателей, наилучшие в смысле возможности построения общей модели оценивания состояния РЖ.

Условия решения задачи оценивания состояния РЖ задаются допустимой областью изменений значений показателей (параметров), выделенных для использования в процессе эксплуатации ВС.

Общим для этой системы являются описание показателей РЖ в различных реальных ситуациях.

Прежде всего определим основные для данной работы термины.

Под объектами языка, как объектов моделирования оценивания состояния РЖ ГС ВС в конкретной ситуации, будем понимать ту их составляющую, в которой эволюционно изменяются показатели РЖ, определяемые ее параметрами. Как указывалось выше, будем строить модель (образ РЖ) из единичных показателей – ее образующих; средства языка для описания ее образа с позиций точного формализма.

Уточним понятие единичного показателя РЖ. Класс показателей РЖ будем обозначать для конкретной ситуации 𝒜, который рассматривается как множество переменных X: – . Абстрагируясь от показателей этого класса, создадим один постоянный объект, характеризующий номинальную РЖ, который будет выступать в качестве ее эталона Y. Объект такого рода без изменения смысла слов для конкретной ситуации будет рассматриваться также как соответствующие переменные для Y – .

Таким образом, к единичным показателем РЖ с определенностью будем относить только показатели, в принципе доступные непосредственно восприятию, т.е. показатели конкретной РЖ, выявленные в процессе их оценки.

***2.4.2 Аксиоматическая модель системы представления рабочей жидкости***

В этой главе выше было дано теоретико-множественное описание некоторой физической модели РЖ, которую следует рассматривать как предварительную мотивировку последующей формализованной теории оценивания состояния РЖ. Важнейшей составляющей модели РЖ являются ее компоненты, характеризуемые показателями (таблицы 2 и 4). Они и только они являются сутью РЖ. Их постоянство на определенном промежутке времени определяет существование РЖ как основы ГС ВС. Идеализация компонентов позволяет построить модель самой РЖ, в которой ее показатели, набор которых суть показателя состояния, фиксируемого на определенном участке жизненного цикла РЖ. Следует отметить, что в течение жизненного цикла РЖ на каждом конкретном промежутке времени – это разные РЖ в силу изменяющихся ее показателей.

Для решения задачи расчета показателей РЖ в работе использовано ситуационное исчисление этих показателей в рамках аксиоматической системы, построенной в соответствии с формальной теорией , в которую добавлено множество показателей состояний РЖ. Словарь системы содержит:

* Индивидуальные константы a, b, c…;
* Предметные переменные x, y;
* Функциональные константы f;
* Высказывания p, q, s;
* Предикатные константы P, Q, R.

Система построена в контексте расширения пропозиционального исчисления, поэтому словарь содержит все те же связки , который расширен двумя квантрами: . Множества синтаксических правил V пропозиционального метода может быть также применены к предикатному методу, где добавляются правила:

* Атом есть формула.
* Если P(x) – формула и x – переменная, то – формулы.

Каждая предикатная формула в работе интерпретируется, т.е. оценивается по трехзначной логике . Для определения показателей введена базовая система аксиом W в заданных предикатах. Правила вывода R остаются прежними, как в исчислении высказываний, и являются правилами специализации.

С общих позиций уточним термин “язык”, который следует понимать, как совокупность двух понятий: множества синтаксических выражений, производимых данной производной грамматикой, и обозначение множеств, образованной этими выражениями. Для того, чтобы это было возможным, необходимо чтобы синтаксические образования были предикатами. Общими для этой модели являются определения показателей РЖ в различных реальных ситуациях.

В заданном абстрактном пространстве РЖ – среда ГС ВС переменная состояния показателя принимает значения . Эти состояния показателей посредством различных операторов формируют состояние РЖ, т.е. её переход из в результате действия операторов , где *i* – последовательность определения операторов состояния РЖ, которые могут быть связаны в граф состояния РЖ , где - (вершины) параметров РЖ. Операторы, представляемые в ситуационном исчислении, отображают операции по вычислению (измерению) отдельных параметров РЖ при ТО, формирующих описание состояния РЖ – , которое представляется конъюнкцией предикатов, описывающих отдельные параметры

Ситуационное исчисление представляется пятеркой:

, (10)

где Ƥ – множество предикатов вида , где К – некоторое значение свойства ; - множество операторов, отображающих состояние на состояние РЖ; *S* – множество состояний РЖ; ⍺ - система аксиом – правила описания действия операторов, которая в общем виде записывается в следующем виде:

(11)

Здесь описывает подстановку вместо и начальную ситуацию в виде:

(12)

где

Формирование образа текущей ситуации состояния РЖ строится на основе начальной информации и текущей информации с использованием детерминированного источника образующих и простого вероятностного источника – образующих состояния. Тогда текущая ситуация состояния РЖ описывается формой:

. (13)

Для решения задачи описания состояний ситуационного исчисления введем следующие общие предикаты этого языка:

1. Предикат “Ситуация X есть конъюнкция совместных показателей состояния s” (обозначается ). Предикат представляет описания состояния РЖ в конкретной ситуации и является конъюнкцией измеренных параметров показателей, определяемых измерениями;
2. Предикат показателя есть часть РЖ (обозначение). Интуитивный смысл предиката существенно связан со словестной формулировкой;
3. предикат “показатели РЖ совместны с показателями РЖ”. Выражение фиксирует способ определения тождественности показателей состояний РЖ в конкретной ситуации и соответствующих показателей эталона РЖ;
4. предикат “показатели эталона РЖ предопределяет показатели в конкретной ситуации”. Предикат фиксирует причинноследственные связи “оцениваемый объект -эталон ”;
5. предикат “показатели РЖ есть X в состоянии s” этот предикат фиксирует состояние X в текущей ситуации.

Введем аксиомы для представленных выше предикатов универсальной модели языка представления РЖ.

Все аксиомы разделим на базовые и специальные.

Базовые аксиомы, предлагаемой универсальной модели, будут связаны с предикатами мативировка которых выполняется в терминах показателей как части целого X (целостность).

I. .

Это значит, что если и в одной ситуации (т.е. ), то всякая третья часть *u* находится либо в этой же ситуации (тогда и ), либо не в этой (тогда и ). Эта логическая конструкция от приведенных выше предпосылок (аксиом) к следующей схеме, которая должна привести к "логически правильному" заключению (вывод, следствие [58]). Предпосылки и заключение представлены на языке исчисления высказываний, адекватно отражающим предметную область оценками состояния РЖ, и используют совокупность знаний, необходимых для автоматического синтеза решения задачи оценивания состояния РЖ в данном контексте.

**Язык оценивания** состояния РЖ включает **алфавит**, содержащий в символьной форме ) набор показателей, которые характеризуют состояния РЖ в данной ситуации (в заданный момент времени *t*), и с которыми имеют дело при получении оценок отдельных показателей, а также **набор синтаксических правил**, на основе которых, пользуясь алфавитом, строятся выражения, описывающие состояние РЖ для данного момента времени *t*. Эти выражения строятся на предложенном языке, объединяющем аксиомы и предикаты, из которых можно делать выводы в виде новых выражений, построенных на основе заданной метрики времени *t*, используя определенные правила вывода, основанные на исчислении высказываний и предикатов.

Речь идет о сложных высказываниях о составляющих РЖ, которые полностью характеризуют ее состояние, построенное из показателей X. Эти высказывания состоят из частей, порождающих некоторую целостность или эквивалентность третьей и последующих частей длинной конъюнкции (предикатов)

Эта эквивалентность означает, что если , то речь идет два раза об одной и той же целостности (u). В нашем случае – РЖ, это значит, что ее части взаимно соответствуют друг другу, в смысле тождество. Но этот факт (т.к. тождество транзитивно [59, 60]) может быть записан так, что каждая целостность одновременно тождественна частями и ,

Эта схема действует при произвольных предикатах A. Она на протяжении всей работы предполагает, что предикаты *A(X)* могут иметь, кроме , и другие свободные переменные, отличные от переменных данной аксиомы. Эти свободные переменные содержательно могут интерпретироваться как параметры в схеме аксиом, отражающие эти изменения, например, показатели РЖ.

Аксиома V означает, что если в двух целостностях совпадают их части, то это равносильно тому, что речь идет об одной и той же целостности – РЖ в одной ситуации. Для решения задач ситуационного исчисления определим важные для этой цели предикаты:

1. Определим трехместный предикат P(x, y, s) “s есть переменная состояния, действующая на предметные переменные x и y”, характеризующие состояние РЖ для каждого показателя. Переменная состояния может принимать значения (состояния) Эти состояния отображают состояние на состояние.
2. Определим двухместный предикат “x и y не имеют тождественных частей”, в частности, это отдельные показатели РЖ (обозначение ⋀(*x, y*)):

*.*

1. Определим одноместный предикат “x есть ситуация” (обозначение *S(x)*)

***2.4.3 Формальная модель описания образа рабочей жидкости гидросистемы***

Перейдем теперь к математическим основам материализации представления знаний о РЖ, т.е. установим соответствие между объектами математической теории, которые выступают как переменные, представляющие эволюционную динамику изменения состояния РЖ как физического объекта.

Выше введен язык оценивания состояния РЖ в пространстве состояний в заданной ситуации, который позволяет решить задачу в рамках формальной системы исчисления показателей, характеризующих состояние РЖ в конкретной ситуации.

В этом разделе остановимся на формальных основах описания понятия “образ”, в частности, образ РЖ. Образ, на данном этапе создания его модели, в работе определяется с общих позиций, как множество объектов [57]. При этом для образа РЖ будем рассматривать образ всех множеств показателей, из которых, применяя классификацию последних, можно получить образ РЖ в заданной ситуации, т.е. с формальных позиций будем считать, что он является множеством подмножеств данного множества.

Рассмотрим естественное понятие множества, которое и породило наглядные свойства абстрактного множества для РЖ. Опишем, во-первых, понятие множества показателей РЖ, смесь которых и делает конкретную РЖ, во-вторых, РЖ, как множество показателей, обладает тем свойством, которое интуитивно приписываются к понятию множества.

Для мотивировки вводимых понятий рассмотрим следующие примеры:

1. пусть **,** тогда существуетобъект (вещь) – объединение x и y, которое, естественно, назвать множеством с элементами x и y;
2. пусть ⪯ , тогда приходится считать, что не существует множества с элементами x и y.

Таким образом, приходится требовать определенную независимость для элементов множества. Из этого следует, что не для всякого показателя РЖ можно определить вещь, которая являлась бы множеством всех составляющих компонентов РЖ, обладающим свойством конкретной компоненты;

1. пусть *x, y, z, u, v*… элементы множества РЖ. Для конкретной РЖ, как объекта исследований, все ее компоненты (показатели) не должны быть одновременно множествами в элементах *x, y, z, u* и, например, при этом *v* окажется множеством с элементами *x, y, z, u*. Поэтому предикат, разделяющий, например, РЖ как множество на объекты элементы, нужно считать фиксированным в процессе рассуждений.

В нашей работе будем считать РЖ фиксированным объектом, как множество, содержащее в себе все элементы с определенными свойствами.

Пусть U – множество, представляющее РЖ, содержит в себе все элементы (показатели) с определенными свойствами. Для описания свойств всех показателей РЖ, введем базу переменных , характеризующих показатели соответствующих свойств для конкретного ее состояния показателей из U и принимающих значения в некоторой ситуации.

* 1. **Методика формального синтеза образа рабочей жидкости**

Важность распознавания образов состояния РЖ и решения задач оценки и оценивания ее состояния обсуждалась в приведенных выше разделах этой главы.

Универсальная модель языка, предложенная выше, требует проверки его прикладных составляющих, в частности, уточнения таких общих понятий, из которых он состоит, как термин “знак”, “знаковая система”, “образ”, которые определяют его структуру, включающие две его части: множество синтаксических выражений, порождаемых производной грамматикой, и обозначения множеств посредством этих выражений.

Для того, чтобы это было возможно, необходимо чтобы последнее из них было одним из введенных выше предикатов. Кроме того, синтаксис должен допускать возможность комбинирования предикатов этого языка для составления утверждений о состоянии РЖ на базе простых предикатов, описывающих отдельные стороны состояния РЖ. При этом предикаты типа представляют образующие ее состояния, описывающие входные свойства компонентов РЖ , где Ƥ – множество значений входных свойств P, которые являются измеримыми, а, следовательно, ее истинностными характеристиками, т.е. получить одно – однозначное соответствие [61], где каждой из восьми образующих, характеризующих параметры РЖ, будет соответствовать одно значение свойства РЖ. Такое попарное соответствие восьми образующих своим значениям и будет одно однозначное соответствие, формирующее базу данных логического вывода о состоянии РЖ в заданной ситуации. При этом список образующих свойства РЖ наперед задан, в реальной среде , где U – абстрактное множество показателей РЖ, – семейство нетривиальных разбиений на U, на группы показателей, характеризующих РЖ, - подсемейство из , формирующее эталон представления частной структуры РЖ. Элементы есть входные свойства РЖ, с общих позиций, U есть область определения, каждый элемент *u* из есть свойство. Если – свойство, то каждый элемент *u* принадлежит элементу .

Таким образом, с общих позиций, образ РЖ, как указывалось выше, можно представить в виде пересечений значения отдельных свойств из множества , характеризующих РЖ. Если РЖ является собственным подмножеством конъюнктивного образа, составленного из подсемейств значений свойств P, то оно является минимально возможным представлением этого образа, т.е. его эталоном.

Введенная выше формальная система ситуационного исчисления состояния РЖ, использующая понятие математической логики, позволяет построить в ней формальные утверждения (предикаты), в том числе о состоянии РЖ, на основе простых утверждений, справедливость которых не требует доказательств и воспринимаемых как аксиома в данной системе. В частности, к таким аксиомам в нашей работе относятся результаты измерений параметров РЖ. В рамках заданных систем и правил можно выводить новые справедливые утверждения о состоянии РЖ, в заданной ситуации, доказательство истинности которых является логическим выводом, как решение задачи.

Рассмотрим решение задачи в рамках предложенной формальной системы оценивания состояния РЖ, как ее решение с учетом введенных выше понятий.

Пусть

Тогда для конечной реальной среды обобщенный объект описывается строкой вида где *n* – такое конечное целое число, что и для любого *k.*

Обобщенный объект будет конкретным объектом, если для всех или содержится в p, или пересекается с p.

Основные предикаты, из которых можно построить описания образа, состоят из утверждений вида , где P – некоторое свойство, p – его значение, а x – переменная. Этот предикат должен быть истинным для всех элементов значения p свойства P. Тогда любой элемент из объекта

Это утверждение можно рассматривать как описание “РЖ” в том смысле, что утверждение S() истинно для всех элементов из этого объекта.

Очевидно, что, используя утверждения, включающие основные предикаты , где , и обычные логические связки, можно описывать другие объекты, отличные от эталона РЖ.

Моделирование оценивания состояния РЖ интерпретатором (сложной системой) является единственным способом доказательства адекватности математической модели (образа РЖ), существенно связанной с предложенной выше аксиоматической моделью РЖ. Логический вывод – правдоподобное суждение о свойствах РЖ реализуется машиной вывода (интерпретатором правил) [62], выполняющей управление процессом формирования вывода и реализующей вывод. Схема функционирования интерпретатора состояния РЖ показана на рисунке 3.

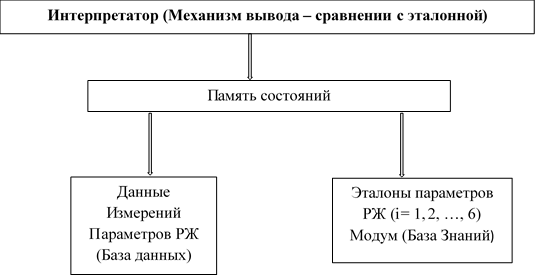


Рисунок 3 - Схема функционирования интерпретатора состояния РЖ

Главной задачей формальной теории вывода суждения о состоянии РЖ является образование тождественно истинностных формул (тавтологий) из заданного подмножества исходных истинностных формул, полученных в результате измерений в процессе химического анализа РЖ. При этом простейшие тавтологии в рассматриваемой версии ситуационного исчисления образуются из аксиом раздела 2.4 настоящей главы, конкретизация которых связана с подстановкой вместо аргумента конкретного элемента характеристики РЖ. Т.е. для логического вывода используется правило подстановки, в результате применения которого получается также тавтология. При этом проблема формализованного представления предикатов и отношений с учетом времени и пространства является задачей данной работы. Задача состоит в том, чтобы по заданным конкретным фактам, описанным простыми предикатами, найти обобщенные формулы (вывода на основе частных данных).

Формальная постановка данной задачи состоит в следующем:

*Дано множество , отражающее определенные отношения в предметной области оценки и оценивания состояния РЖ. Найти обобщенное правило, связывающее заданные факты в тождественно истинные формулы с предметными переменными, характеризующими эту область.*

В данной работе формализуются новые принципы решения задачи синтеза образа РЖ на базе предложенной новой концепции синтеза образа РЖ в рамках точного формализма.

Основной принцип синтеза образа РЖ использует единичные объекты (измеренные показатели РЖ), образующие – носители информации о показателях РЖ, выраженные их значениями, входящими в класс образующих. Средства языка, описывающие образ РЖ, остаются абстракциями. Исходя из этого положения и положения о двух частях, определяющих структуру языка, включающих множество синтаксических выражений, имя которым показатели входных свойств P: “вязкости”, “плотности”, “кислотности”, “удельной электропроводности”, “завоженности”, “химического состава”, “класса чистоты” и “дисперсного состава части загрязнения”, а также поставленным им в соответствие множества знаков, можно построить описание образа, как знаковой системы, в которой каждый объект есть образ, объединяющий большое число конъюнктивных понятий.

Таким образом, описание конкретного образа РЖ, с общих позиций, имеет вид

где B – логическая комбинация утверждений а – линейные функции. Остановимся на алгоритме получения описания образа состояния РЖ, реализуемом интерпретатором. Пусть дана база переменных в заданной ситуации с базовыми множествами значений для каждой переменной, и даны обобщенные предикаты значений параметров РЖ. В соответствии с введенными выше операциями объединения и пересечения получим описание образа C на основе рекурсии следующим образом:

C1. Значение свойства есть образ показателя РЖ.

C2. Если A и B – образы, в частности, показатели РЖ, то и – образ.

C3. Если A – образ, то и его дополнение – образ.

C4. Других образов, кроме указанных в С1, С2, С3 – нет.

Перейдем теперь к описанию РЖ. Прежде всего будем считать, что РЖ и только РЖ есть суть содержания участников в пространстве-времени физического мира, и что РЖ имеет объем, продолжительность существования и присущие ей свойства.

Описание образа РЖ, с формальных позиций, существенно связано с формальной теорией вывода, главной задачей которой является образование тождественно истинностных формул (тавтологий) из заданного множества исходных тождественно-истинностных формул (истинностных тавтологий). Формула называется тавтологией, если она истинна для всех значений составляющих ее предикатов. Например, формула является тавтологией, так как она истина при любых значениях ее компонентов , что легко проверить простой подстановкой этих значений в данную формулу.

Два правила, обычно используемые для логических вывода:

1. Правило подстановки, утверждающее что замена каждой буквы переменной X в тавтологии на выражение приведет к выражению , которое также является тавтологией.
2. В импликации правило вывода определяет, что выражение является тавтологией тогда и только тогда, когда является тавтологией.

Формула F (тавтология) называется выводимой в исчислении, если она может быть получена из конечного подмножества истинных формул с помощью конечной операции применения правил вывода. В категориальной логике было строго показано, что существует также конечное подмножество тождеств (функционально полных аксиоматических вычислительных систем), из которых могут быть получены произвольно идентичные истинные типы. Это означает, что проблема определения функционально полной системы аксиом для категориального исчисления может быть решена. На практике мы обычно ищем и используем самую простую, практичную и функционально полную систему аксиом. Этот метод логических рассуждений обычно предполагает определение истинности или ложности конкретного отношения, учитывая исходное отношение (факт), которое предполагается истинным априори, с помощью некоторой формулы (правила умозаключения), такой как:

Вывод формируется в соответствии с правилами замены данных о событиях в уравнении в левой части

вместо содержащихся там символов переменных. Эта техника называется конкретизацией предикатов. В наших обозначениях конкретизация предикатов или отношений означает замену переменной X субъекта в его выражении определенным значением .

Формальная формулировка проблемы воплощения предикатов выглядит следующим образом.

Дано: 1. Множество фактов, представляющих определенные предикаты или отношения.

2. Множества R правил вывода, представляющих собой тождественно истинные формулы , содержащие переменные .

Требуется путем конкретизации заданных правил найти конкретные отношения , истинность которых по определению следует из истинности заданных исходных фактов правила вывода.

Для построения методики и индуктивного вывода разделим всевозможные высказывания на 3 принципиально различных класса.

К первому классу отнесем предикаты, определяющие свойства РЖ. Формально эти предикаты представляют собой двухместные отношения вида S(x, y), где S – имя отношения (свойства), , X – переменная, определенная на множестве объектов, а Y - переменная, определенная на множестве значений свойства S, x и y – конкретные значения переменных X и Y соответственно. Примером свойства РЖ являются его показатели.

Ко второму классу предикатов отнесем предикаты, определяющие объекты. Формальные выражения для таких предикатов имеют следующий вид: , или , где Q – имя определяемого объекта, а – имя свойства или его значение. В последнем случае наименование свойства должно быть определено заранее. Пример, РЖ есть множество показателей (таблица 4).

К третьему классу предикатов отнесем все предикаты, которые являются логическими типами, состоящими из предложений первого, второго и третьего класса.

Первое требование для индуктивных рассуждений - наличие достаточного количества фактов для обобщения. Пример - простые базы данных (фактов), которые могут быть использованы для индуктивных выводов. Первым шагом индуктивного вывода может быть объединение объектов (показателей РЖ), обладающих одинаковыми значениями одноименных свойств. При этом используются связки ИЛИ и конъюнктивная объединения с помощью связки И. Чтобы добиться такого объединения в данной базе данных, можно выполнить следующее формальное преобразование. Так предикат с субъектной переменной, принимающей значения из некоторого подмножества, выводится из определенного события: Отношение ЕСТЬ (X, Y) указывает, что аргумент X обладает свойством Y. По смыслу данного отношения объединять можно объекты, обладающие одинаковыми свойствами.

В одном случае используем свойства одного и того же объекта, в другом - экземпляры разных объектов с одинаковым именем. Это различие отражается соответственно символами “˄” и “˅”. Если предположить, что в любой формуле свойства S(x, y) первый аргумент всегда представляет собой имя (или имена объектов, в нашем случае показателей состояния РЖ), а второй аргумент представляет собой значение (или значения) свойства (или свойств) данного объекта, то будут справедливы следующие формальные соотношения:

1. *S(x, y)*, то есть из истинности *S(x, y)* следует истинность *xS(y)*,

2. *S(x, y)˄S(x, z)*

3. .

В процессе индуктивного вывода можно использовать также следующее правило обобщения отношений, содержащих *X, Y* и их значений *x, y*:

1. где *R* – имя любого отношения предикатов.

Отношение или условие равенства предикатов также важно. Оно заключается в том, что два предиката с одинаковым аргументом, то есть одинаковым именем и одинаковым значением, считаются эквивалентными.

Другими словами, , если для всех *i=1,…,n,* – формула, представляющая собой свойство, объект или любое тождественно истинное высказывание.

В данной работе на основе введенного языка, построенного на базе заданного множества простых предикатов типа , обозначены ядра отображений показателей РЖ, переводящих область рассуждений множества действительных чисел. Пусть *S* – некоторое множество свойств РЖ, а – отображение, переводящее его в множество действительных чисел. Ядром этого отображения является отображение эквивалентности , определенным условием , тогда и только тогда, когда .

Это отношение разбивает S на непересекающиеся подмножества, называемые классами эквивалентности, т.е. оно порождает формальное описание РЖ – ее образ, построенный в идеальных условиях, его точность определяют цели и решаемые задачи. Следовательно, с формальных позиций, образ (модель РЖ) есть множество класса эквивалентности I на множестве полученных в процессе измерений значений свойств S (оценок заданных показателей), отношение R между которыми является правилом идентификации [53]. Тогда 𝓙 множество формальных описаний РЖ есть множество формальных объектов, задающих пространство области рассуждений X, на котором задана алгебраическая структура и разрешены операции над X. Задание X является определяющим в исходных данных.

Каждый класс эквивалентности, представляющий формальный объект в заданной ситуации, служит обозначением предиката вида .

Таким образом, в качестве исходных данных для формального описания объекта РЖ заданы: множество простых предикатов P посредством характеристических функций ; конечное множество отображений , определенных на S; принадлежит множеству значений – множество предикатов, связанных с отображениями; множество действительных чисел .

В работе рассматривается случай, когда отображения являются характеристическими функциями, и известны адаптивные процедуры их измерения. При этом существуют и удовлетворяют условию: если дано множество отображений , переводящих S в множество действительных чисел таких что

*,*

то предикат отображает данный факт как взаимодействие, отношение или, в нашем случае, свойство РЖ. При этом, как указано выше, строятся отображения специального типа в параметрическом пространстве на базе имеющейся информации множества *M* (с точки зрения распознавания состояния РЖ – эталон), построенного из заданных функций , на множество *N* (испытуемая в данной ситуации РЖ) тех же характеристических функций . Тогда отображение будет образом состояния РЖ. При этом *A* – некоторое множество из *M*; совокупность всех элементов вида *f(a)*, где есть образ *A* – эталон. Соответственно для испытываемой РЖ – *f(b)*, где есть образ *B*.

Статическая модель (образ) РЖ есть формула

*,*

где K – описание имени – идентификатор РЖ; – описание параметров РЖ; Ф – функция РЖ – ; *t* – время описания, связанное с конкретной ситуацией совместимых состояний .

Для ГС ВС при исследовании процессов поведения РЖ, когда параметрические точки известны, они соответствуют параметрическому пространству РЖ, которое определено априори. Неизвестны параметры смеси , принадлежащие пространству Ƥ параметров смеси РЖ. При этом конечная смесь *H(x)* описывается формулой, представляющей ее образ

где – функция распределения, – параметры смеси.

* 1. ***Выводы и рекомендации***

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие заключения.

Изучение теоретических вопросов классификации образов состояния РЖ на этапе ее эксплуатации по измерениям ее изменяющихся параметров позволило провести терминологические уточнения исходных сложных понятий и рассмотреть методы теории принятия решений. На основании полученных данных автором была разработана концепция описания состояния класса объектов технического обслуживания, т.е. их образа, который представляется абстрактной структурой – математической моделью.

Использование полученных данных позволило сформировать задачу синтеза образа состояний. Для решения этой задачи использовалась теория синтеза образов в рамках точного формализма. В ходе исследования была установлена необходимость создания универсальной модели описательных языков, в которую укладывались бы различные описательные языки, связанные с конкретными показателями РЖ. Это позволит заменять один язык другим, что необходимо для постановки и решения основной задачи – определения уровня чистоты РЖ, и состояния ее компонентов.

Для решения проблемы исчисления показателей РЖ в работе использовано ситуационное исчисление показателей в рамках аксиоматической системы, построенной согласно формальной теории, в которую добавлено множество показателей состояний РЖ. Словарь системы, предложенный автором, содержит: индивидуальные константы; предметные переменные; функциональные константы; высказывания; предикатные константы. Каждая предикатная формула в работе интерпретируется, т.е. оценивается по трехзначной логике.

Кроме того, отдельное внимание в диссертации уделено формальной модели описания образа РЖ ГС и методике формального синтеза образа РЖ. Введенная в работе система ситуационного исчисления состояния РЖ, использующая понятия математической логики, позволила построить в ней формальные утверждения (предикаты), в том числе о состоянии РЖ, на основе простых утверждений, справедливость которых не требует доказательств и воспринимается как аксиома в данной системе.

Для доказательства адекватности математической модели (образа РЖ), существенно связанной с аксиоматической моделью РЖ, было предложено использовать логический вывод – правдоподобное суждение о свойствах РЖ, который реализуется машиной вывода (интерпретатором правил). С этой целью в работе представлена схема функционирования интерпретатора состояния РЖ.

Таким образом, в главе формализованы новые принципы решения задачи синтеза образа РЖ на базе предложенной новой концепции синтеза образа РЖ в рамках точного формализма.

**ГЛАВА 3. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ПОВЕДЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ГИДРОСИТСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА**

## **3.1. Введение**

Эта глава посвящена постановке и решению научных и прикладных задач разработки методов моделирования и моделей распознавания образа состояний РЖ ГС ВС.

Особенности функционирования ГС ВС не позволяют проводить активных экспериментов с РЖ. Поэтому обслуживающий персонал должен ограничиться пассивным наблюдением и измерением имеющихся характеристик и параметров объекта обслуживания. При тщательном наблюдении за объектом всегда можно определить и измерить факторы окружающей среды, влияющие на объект и зависящие от них показатели, представляющие интерес для специалистов по ТО. Однако количество параметров, подлежащих измерению, может быть очень большим. Проблема заключается в том, чтобы из множества измеряемых параметров выбрать минимально возможное количество наиболее важных для оценки состояния РЖ.

Предлагаемый в работе синтаксический подход содержит и нелингвистические методы, хотя эта работа в основном носит лингвистический характер. Теория принятия решений и синтаксический подход отличаются тем, что первый использует вероятностные распределения реализаций образов для описания или моделирования образов, а второй использует синтаксические правила (грамматику). Эффективность каждого из них зависит от конкретной задачи. Часто бывает необходимо применять оба подхода одновременно. Действительно, иногда трудно провести различие между синтаксическими и несинтаксическими системами распознавания.

Множество различных математических методов решения задач распознавания образов делятся на две группы: методы, которые могут быть использованы с точки зрения теории принятия решений (дискриминантные подходы), и методы, которые могут быть использованы с точки зрения синтаксических (или структурных) подходов. В первом подходе объекты характеризуются набором чисел, которые являются результатом некоторых измерений, характеризующих объект, называемых признаками. Распознавание образов (отнесение каждого объекта к определенному классу) обычно осуществляется путем разбиения пространства признаков на области или подзадачи [63–67]. Развитие исследований в области распознавания образов в последнее десятилетие в основном связано с подходами к дискриминации и их приложениями [68, 69].

Однако метод моделирования, вытекающий из общих законов теории познания и опирающийся на строгие законы логики, теории вероятности, математической статистики и других дисциплин, предоставляет специалистам ТО, в частности, набор принципов, правил и алгоритмов, применение которых неизбежно приведет к построению логической модели конкретного процесса, к которому он должен привести. Это обеспечивает определенную степень достоверности.

Эволюционные методы моделирования на основе нейронных сетей и генетических алгоритмов сегодня оказываются лучшим способом решения таких проблем.

Методы эволюционного моделирования имеют различные функции и цели и используются специально для решения всевозможных проблем, возникающих при технической диагностике, но основная цель их применения - повысить эффективность диагностических исследований и избежать роли человеческого фактора, который является основным источником многих ошибок [70].

В настоящей диссертации сформулированы принципы эволюционного моделирования состояния РЖ ГС ВС, являющиеся основой для оценки и оценивания её состояния на базе единой структурной модели распознавания образов.

Эволюционное моделирование является подобластью искусственного интеллекта и широко используется в сложных задачах оптимизации и для непрерывной оптимизации. Эволюционные вычисления используются для решения задач, в которых слишком много переменных для традиционных алгоритмов. Для решения сложных проблем они используют процесс эволюции и базируются на теории биологической эволюции. Развивающиеся алгоритмы используют такие принципы, как наследование от предыдущих успешных поколений и естественный отбор, при котором лучшие решения передают свои черты последующим поколениям [71, 72].

Теория эволюционного моделирования предназначена для создания моделей широкого класса систем со следующими ключевыми характеристиками [73, 74]:

* Сложность – система состоит из большого числа элементов и связанных с ними взаимодействий (мерой сложности Колмогорова является длина кратчайшего описания системы).
* Динамичность - изменение структурных и функциональных характеристик системы, включая возможное расширение.
* Слабый детерминизм - элементы системы могут по-разному реагировать на одно и то же потрясение. Концепция слабого детерминизма может быть формализована и частично определена с помощью теории вероятности, нейронных сетей и методов поиска данных.
* Открытость - обмен информацией с окружающей средой (включая человеческое сознание).

Существует традиционный подход к моделированию сложных систем. В рамках этого подхода применяются последовательные методы многоуровневой декомпозиции, усреднения и упрощения. При этом выявляются некоторые ключевые (основные, наиболее важные) характеристики и определяются лежащие в их основе законы и зависимости. Это становится основой для построения моделей для управления, мониторинга и прогнозирования.

Эволюционная модель также называется моделью последовательных версий, а иногда и инкрементальной моделью. В эволюционной модели требования к программному обеспечению сначала разбиваются на несколько модулей (или функциональных блоков), которые можно создавать и доставлять постепенно.

При разработке сначала разрабатываются основные модули системы. Основные модули — это те, которые не нуждаются в услугах других модулей. Первоначальный скелет продукта совершенствуется для повышения уровня возможностей путем добавления новых функций в последующих версиях. Каждая эволюционная модель может быть разработана с использованием итеративной водопадной модели развития.

Эволюционная модель показана на рисунке 4 [75]. Каждая последующая версия/модель продукта представляет собой полнофункциональное программное обеспечение, способное выполнять больше работы, чем предыдущие версии/модель.

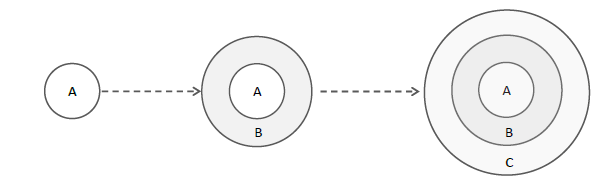


Рисунок 4 – Эволюционная модель развития

Эволюционное моделирование использует эволюционные механизмы (исходная организация, случайные мутации и отбор), характерные для процессов самоорганизации. Эволюционные алгоритмы по сути предназначены для работы в условиях непреодолимой априорной неопределенности и характеризуются непрерывным мониторингом внешней среды (обновлением информации о среде) и чередующимися (или параллельными) этапами адаптации и принятия удовлетворительного решения.

Эволюционное моделирование использует все три представления конечных графов [74]:

* теоретико-множественное – для изложения теоретических построений,
* матричное – при применении эволюционных алгоритмов к компьютерам,
* геометрическое - для визуальной интерпретации.

Методы эволюционного моделирования имеют различные функции и цели, в частности, при решении разного рода проблем, возникающих при технической оценке. Но основная цель их применения – повысить эффективность диагностического тестирования и избежать роли человеческого фактора, который является основной причиной многих ошибок.

Поэтому исследования по использованию эволюционных методов – перспективного направления для интеллектуальной обработки диагностической информации от различных технологических систем в настоящее время являются важной научной и практической задачей.

Однако, несмотря на существующие исследования и изыскания, многогранность, важность и актуальность этого вопроса остаются неизученными. В частности, требуется дальнейшее развитие и совершенствование метода выбора оцениваемых точек для использования при проведении испытаний.

Следует также подчеркнуть, что в условиях постоянно возрастающей интегративной сложности дискретных электронных компонентов авиационных ГС актуальной является задача синтеза качественных тестов, где также может быть эффективно применена теория эволюционного моделирования.

Концепция оценки и оценивания технического состояния ГС ВС включает в себя набор аналитических процедур, процессов и мероприятий, которые могут привести к принятию обоснованных решений о действиях по ТО на основе информации в реальном времени, имеющихся ресурсов и эксплуатационных требований [24,47,48,69,70]. Существует три основных аспекта первичной функции анализа и управления техническим состоянием ГС: мониторинг в реальном времени, диагностика и прогнозирование.

Первый аспект направлен на получение информации о состоянии системы или ее компонентов в зависимости от конкретной технологии и соответствующего программного обеспечения. Оценка - это процесс измерения (оценки) параметров мониторинга и определения технического состояния на основе исторических и графических данных. Процесс прогнозирования позволяет предсказать будущее техническое состояние, оставшийся срок службы или соответствующий срок эксплуатации систем и их компонентов [49].

Одним из основных способов повышения надежности различных типов техники является совершенствование их систем ТО, важной частью которых является стратегия ТО. На практике используются стратегии ТО по наработке и по состоянию. Повысить эффективность ТО можно за счет разработки и внедрения в практику нового вида стратегии, ориентированного на упреждающее отказы агрегатов обслуживание. Это одна из самых перспективных, но слабоизученных областей ТО, которая в последние годы привлекает внимание профессионалов в самых разных отраслях народного хозяйства [47, 78].

Наиболее совершенной из используемых на практике является стратегия ТО по состоянию, которая основана на «реагирующем подходе». Подход заключается в определении деградации параметров системы и исправлении деградации. Идея применения упреждающего обслуживания заключается не в том, чтобы реагировать на деградацию рабочих параметров системы, а в ее предупреждении. Для этого необходимо выявить симптомы условий, в которых может произойти эта деградация.

Следовательно, упреждающее обслуживание направлено на выявление и устранение коренных причин деградации параметров системы, приводящей к отказу. Если такие причины не будут устранены вовремя, то можно считать, что обратный отсчет срока службы системных блоков уже начался. Соответственно, поддерживая параметры основных причин отказа в допустимых пределах, срок службы компонентов системы может быть значительно увеличен [79].

Таким образом, исследование возможностей использования эволюционных методов в применении упреждающего обслуживания, представляющих собой перспективное направление интеллектуальной обработки диагностической информации о состоянии РЖ ГС ВС, базирующейся на дискриминантном и структурных методах распознавания образов, является в настоящее время перспективным направлением с точки зрения научной и практической значимости для повышения качества ТО и эксплуатации ВС.

* 1. ***Основные понятия и определения теории распознавания состояния рабочей жидкости***

Распознавание образов - это метод анализа данных, который использует алгоритмы машинного обучения для автоматического распознавания закономерностей в данных [80]. Эти данные могут быть любыми - от текста и изображений до звуков или других определенных качеств. Системы распознавания образов позволяют быстро и точно выявлять известные закономерности. Однако, они также могут распознавать и классифицировать незнакомые объекты, определять формы и объекты под разными углами, а также идентифицировать закономерности и объекты, даже если они частично скрыты [81].

Как было отмечено выше, математические методы для решения задач распознавания образов можно разделить на две группы: методы, которые могут быть интерпретированы с точки зрения теории принятия решений (дискриминантный подход), и методы, которые могут быть интерпретированы в рамках синтаксического (или структурного) подхода. В первом подходе объекты характеризуются наборами чисел результатов определенного набора измерений, которые их характеризуют, объекты, называемых признаками. Распознавание образов (отнесение каждого объекта к определенному классу) обычно осуществляется путем разбиения пространства признаков на области. Развитие исследований в области распознавания образов в последнее десятилетие в значительной степени связано с дискриминантным подходом и его приложениями, а также изучаются проблемы распознавания образов, где важна информация, описывающая структуру каждого объекта, и необходимы процедуры распознавания. Необходимо не только отнести (классифицировать) объект к определенному классу, но и описать те стороны объекта, которые исключают его отнесение к другому классу.

Для решения проблемы создания языка теории сопровождения необходимо разработать формализованную «сложную грамматику» [53], содержащую подобразы с произвольным числом точек связывания, которые могут быть соединены с другими подобразами. В контексте общей теории синтеза образов У. Гренандера [53] эти подобразы связаны с понятиями «конфигурация». Наиболее распространенный способ построения такой конфигурации, которая описывает техническое состояние объекта обслуживания на каждом этапе, - это построение графа состояний в пределах предикатов первого порядка, которые реализуют символизацию обычного языка путем введения в него переменной состояния [60].

Методы оценки и оценивания позволяют представить оцениваемую систему в пространстве состояний, где состояния соответствуют множеству входных воздействий, которые переводят систему в состояние, адекватность которого заданному необходимо оценить. Как показали проведенные исследования, для того, чтобы решить эту задачу, необходимо взаимодействовать с оцениваемой системой, т.е. необходимо иметь информацию о ее внутренней структуре. Эта информация в данный момент времени и является состоянием системы, которое в общем виде, может быть описано вектором.

Вектор состояния формируется из множества величин, которые должны быть достаточными для описания движения оцениваемой системы в пространстве состояний. Имея вектор состояния в один момент времени, зная законы движения и последовательности входных воздействий, можно вычислить состояние в любой другой последующий момент времени. Однако в случае оценивания состояний сложной системы помимо этих векторов требуется привлечение дополнительных знаний о предметной области. Для решения таких задач используются сложные иерархические построения и программы, имитирующие механизмы мышления специалиста в конкретной области знаний, в частности планирования поведения РЖ ГС ВС. К таким задачам относится задача оценивания (принятия решений) о состояния РЖ ГС в целом. Эта задача считается интеллектуальной задачей, для эффективного решения которой разрабатываются системы искусственного интеллекта, т.е. их теория подтверждается практикой её использования.

В настоящее время проектирование систем искусственного интеллекта направлено на поддержание процессов принятия решений, происходящих на завершающих стадиях производства, конструкций, подготовки производства и собственно производства, в частности, создания ГС ВС, а затем их ТО.

При решении любой из управленческих задач (планирование, организация, проектирования, управление, качества) главная проблема - это оценки и принятие решений.

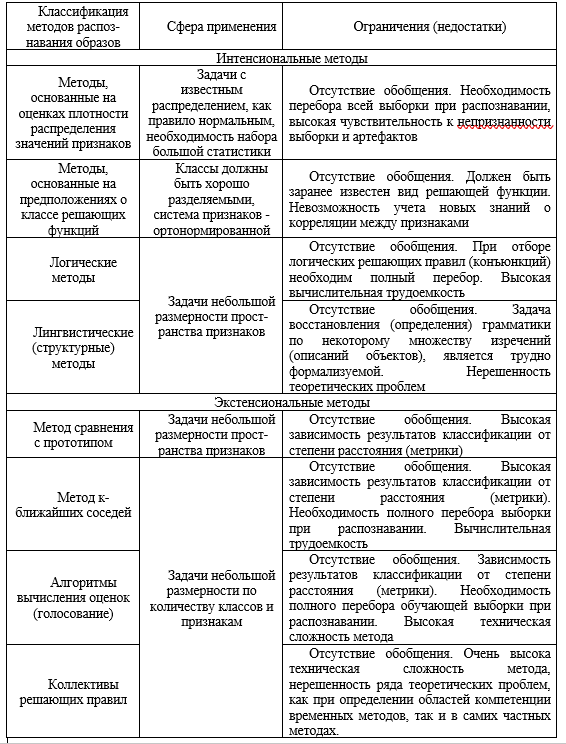
Распознавание образов обрабатывает разнородные данные и преобразует их в формат, пригодный для использования машинами. Оно включает в себя классификацию и кластеризацию образов.

1. Классификация присваивает метки классов, которые соответствуют шаблонам, основанным на наборе обучающих и абстрактных шаблонов, созданных с использованием знаний о предмете. Классификация использует метод обучения с учителем.
2. Кластеризация генерирует разбиение данных, которое помогает принимать решения, совершать конкретные действия по принятию решений, представляющие для исследователя интерес. Кластеризация используется в неконтролируемом обучении – самообучении.

Формальной основой распознавания является база описаний изображений эталонов (алфавит классов), представленная в виде совокупности признаков [82].

В целом на сегодняшний день разработан широкий спектр методов распознавания образов, которые имеют свои достоинства и недостатки (таблица 5). Принятие во внимание этих особенностей является необходимым условием выбора наиболее эффективного и приемлемого метода для распознавания состояния РЖ ГС ВС.

Таблица 5 - Методы распознавания образов



Для описания образа РЖ ГС ВС во второй главе работы создан формализованный язык.

Введенный выше формализованный язык описания РЖ позволяет выявить в ней прообразы математических понятий и интерпретировать на этом языке как теоретико-множественные модели состояния РЖ, так и синтаксический подход с использованием заданного набора непроизводных элементов эталона РЖ. Система синтаксического распознавания РЖ, разрабатываемая в работе, требует введения дополнительных понятий для решения задачи классификации и описания ее состояния, являющихся основой принятия решений о ее допуске к дальнейшей эксплуатации. Эволюционные методы моделирования, основанные на нейронных сетях и генетических алгоритмах, оказались лучшим способом решения этой проблемы.

В данной работе сформулированы принципы эволюционного моделирования состояния качества РЖ ГС ВС, являющиеся основой для оценки и оценивания качества ее состояния на базе единой структурной модели распознавания образов ее состояния. При всех преимуществах, которые дают ГС ВС, необходимость оценки их технического состояния, своевременного обнаружения неисправностей и предотвращения аварий ставит вопрос о поиске новых и более эффективных способов оценки и оценивания их состояния для управления качеством функционирования этих систем. В этом контексте методы эволюционного моделирования на основе нейронных сетей и генетических алгоритмов зарекомендовали себя как наилучший способ решения подобных задач.

Эволюционное моделирование является подобластью искусственного интеллекта и широко используется в сложных задачах оптимизации и для непрерывной оптимизации.

Во второй главе были даны ключевые понятия и определения, лежащие в основе формального представления объекта исследования – РЖ ГС ВС. При этом было отмечено, что ключевым моментом в рамках системного подхода, является адекватное описание задачи представления РЖ в рамках точного формализма. В этой главе строится содержательная теория решения задачи распознавания образов состояния РЖ, существенно связанная с понятиями квалиметрии, что требует расширения и, как следствие, введения дополнительных понятий и определений.

Прежде всего введем понятие операции. Операция – это совокупность действий, которые позволяют получать данные X, характеризующие состояние РЖ, необходимые для описания текущей ситуации как упорядоченного множества совместимых состояний данной ситуации, которое формирует ее пространственно-временной образ.

Полученная во второй главе эталон-модель РЖ имеет в качестве концептуальной основы точный формализм ее синтеза и анализа, а также алгоритм, использующий четыре исходных принципа У. Гренандера для описания образа РЖ, включающих образующие, свойства, обуславливающие качество РЖ, определение которого имеет следующую формулировку: качество РЖ – это совокупность свойств, обуславливающих ее пригодность для использования по назначению в ГС ВС.

При этом каждое из свойств в РЖ описано количественно с помощью некоторых переменных, значения которых характеризуют меру его качества, называемую частными показателями ее качества. Уровень качества РЖ характеризуется значениями совокупности показателей его существенных - атрибутивных свойств, т.е. свойств необходимых для определния соответствия РЖ ее назначению.

Определим эту совокупность (таблица 4) как показатель качества РЖ, представляющего ее портрет. В заключении введем определение критерия оценивания качества, лежащего в основе оценки эволюционной деформации образа РЖ, который позволяет построить модель состояний, как отображения эволюционных процессов.

Критерий оценивания качества РЖ – это совокупность условий, вытекающих из принятых концепций и принципов оценивания качества РЖ, как процедуры принятия решений о ее качестве.

Кроме этих понятий в рамках эволюционного моделирования введены понятия, уточняющие понятия предмета, модели, системы.

Прежде всего остановимся на предметной области, для которой необходимо создать соответствующую модель. Для решения задачи распознавания состояния РЖ необходимо знать, как указано во второй главе, множества имен элементов, представляющие сущность РЖ, как смеси. Такие элементы *u* принадлежат элементу *p* разбиения *P* из наперед заданного множества разбиений. Каждое разбиение *P* будем определять как входное свойство из предметной области, элементы которой характеризуются значениями *p.* Образ (модель) РЖ может быть описан конъюнкцией разбиений в реальной среде , являющейся обобщением представления РЖ.

Таким образом, введем понятие эволюционного моделирования РЖ – это понятие, включающее не только физические структуры, но и показатели реальности, такие как виртуальные, мысленные конструкции и т.п. РЖ является потоком энергии, состоит из смешанных компонентов, находится в динамическом взаимодействии (функционировании).

В теории эволюционного моделирования состояния РЖ определяются целевые области, для которых должны быть построены соответствующие модели.

Предметная область –это совокупность показателей и процессов взаимодействия. Предметная область РЖ ГС ВС описывается свойствами. Свойства имеют компоненты: параметры (характеристики) и методы (алгоритмы взаимодействия), которые могут эволюционно познаваться и изменяться при различной динамике в пространстве и времени.

Процесс взаимодействия можно разделить на два типа:

- процессы жизненного цикла компонентов РЖ;

- процессы управления состоянием РЖ и процессами обеспечения качества ее жизненного цикла.

Разделение процессов на эти типы является одним из ключевых требований для стандартизации основных характеристик элементов моделирования любой предметной области.

Процессы жизненного цикла – это последовательность трех этапов действий (поведения):

1. заправка РЖ ГС ВС;
2. функционирование и поддержание заданного состояния РЖ ГС ВС;
3. замена РЖ.

Явное задание процессов жизненного цикла, структурирование процессов, формализация и обобщение свойств является основой одного из существенных элементов моделирования – балансировки (включая элементы и методы автоматического управления, определение дисбаланса процессов и состояний в целевых областях в созданной модели).

Детали динамики процесса жизненного цикла РЖ формируют основу для общего подхода, который отражает временные и исторические характеристики преобразований и истории преобразований и состояний.

Процесс управления – это целенаправленное воздействие, которое определяет персонал, творения и технологии, созданные специалистами в РЖ, а также процессы жизненного цикла. В частности, управление выражается в форме ТО, описанием и т.п.

Формализация процессов управления обеспечивает основу для архитектуры модели предметной области и ряда базовых элементов. Свойство любой предметной области, включая описания процессов, являются неограниченными. Однако при решении задач оценивания состояния РЖ они ограничены в рамках решения конкретной задачи.

* 1. ***Модель состояния рабочей жидкости гидравлических систем воздушных судов***

Функции, процессы преобразования и взаимодействия РЖ ГС ВС, ее жизненного цикла формализованы (описаны) как набор ее компонентов.

Для РЖ и ее функциональных процессов рассматривается заданный набор ее составляющих, сформулированных на основе различных принципов, целей, задач, функций. В частности, РЖ ГС ВС и ее функционирование описывается в работе совокупностью конечного числа параметров , совместное распределение которых дает конечную смесь – РЖ:

, (14)

где – функция распределения; – определяется функцией *F*; – параметр смеси.

Применение традиционных принципов структурного моделирования вызывает ряд проблем, которые связаны с декомпозицией предметной области на составляющие в соответствии с субъективными целями и задачами.

При этом каждая составная часть образует интерфейс отношений с другими составными частями, в той или иной степени описывающий субъективно разъединенные элементы единого целого – РЖ. Получается, что с точки зрения теории изображения, путем объединения сложных предметных областей в многослойную структуру формируются и составляются отдельные образы.

При изменении элементов одного компонента происходят сложные сетевые реакции, которые требуют соответствующих изменений в реляционной структуре и элементах других связанных компонентов. В то же время некоторые изменения могут вообще не учитываться, что приводит к несоответствиям.

Для каждой составной части РЖ параллельно может быть сформировано неограниченное количество несопоставимых и неоднозначных описаний одних и тех же сущностей и процессов, как повторений.

Структурный и модульный подходы на этапе создания разнородных компонентных систем предполагают сложные процессы их дальнейшей интеграции, даже если строго соблюдаются организационные и предварительные общесистемные соглашения.

Любой регулирующий механизм контроля за состоянием РЖ ГС ВС общесистемных изменений обязательно порождает и удваивает временные рамки оценки состояния РЖ как системы при последовательном изменении параметров любой части предметной области. Для решения этих вопросов эволюционное моделирование радикально меняет подход к понятию систем. Это связано с тем, что системы обладают супер-динамикой изменений и спецификой условий формирования и использования.

В данной работе РЖ рассматривается с точки зрения анализа процессов ее функционирования.

Рассмотрим порождение модели состояния РЖ ГС ВС в рамках формализма образа У. Гренандера. С этих позиций, как показано во второй главе, рассматриваем теоретические образы РЖ, т.е. образующие , составляющие свободные конфигурации, распределенные на подмножестве параметров РЖ , опорного пространства . Здесь положение образующей задано в виде:

,

(15)

Полная энергия конфигураций, составляющих основу образа РЖ, определяется аддитивно по всем внутренним связям при помощи выражения

. (16)

Для несимметричных стрелок соединений в выражение (16) для полной энергии войдут два члена: один вида и другой – . Тогда нарушение на их границе будет незначительное.

Здесь конфигурация образующих была свободной, на образующие не накладывались никакие ограничения за исключением того, что они должны быть расположены в . Однако принцип экстремума вводит ограничение, именно это делает конфигурацию регулярной.

Для модели эволюции изображения в работе использована математическая игра – “игра в жизнь”. Изображение в момент времени *t* состоит из множества точек решетки *I(t)*, при ее эволюции оно заменяется на новое множество *I(t+1)* в соответствии с правилами, зависящими от числа *n(x,y)* соседей *(xy)*, принадлежащих к *I(t)*, где каждой точке решетки *(x, y)* сопоставляют восемь соседей *(x+1, y), (x+1, y+1), (x, y+1), (x-1, y+1), (x-1, y), (x-1, y-1), (x, y-1), (x+1, y-1)*. А эволюция РЖ от рождения до ее замены отображается моделями:

.

*.*

Объект ТО – РЖ – это некоторый набор показателей процесса измерения его параметров. Все объекты управления, независимо от их предназначения в системе ТО, имеют некоторые обязательные ключевые свойства, которые их идентифицируют и определяют.

Выбор и спецификация объектов управления осуществляется методами нормализации свойств описывающих их объектов.

Процессы ТО отражают текущее понимание методов и этапов ТО. Они могут дополняться и развиваться. Процессы ТО включают:

1. планирование, прогнозирование, бюджетирование ТО ВС;
2. оперативное ТО, регистрацию фактических действий и состояний РЖ;
3. периодическое ТО ВС на основе оперативных результатов ТО;
4. систему поддержки принятия решений.

В качестве общих положений сформулируем следующие принципы: заданы образующие объекта оценки и оценивания, обладающего взаимосвязанными признаками, и разбиение его на характеристики состояния – множество показателей; множество предикатов, определяющих введенные показатели в область рассуждений; правила комбинирования для синтеза оценивания состояния РЖ ГС ВС, т.е. сложные утверждения, однозначно связанные с описанием структурной информации класса образов состояний этого объекта. Процедура распознавания состояния объекта реализуется системой, функция которой аналогична процессу “обучения” в дискриминантной системе распознавания образа её состояния в рамках реализации формы “сравнение с эталоном”, состоящего из подобразов. При этом формируется структурное описание состояния РЖ ГС ВС как сети из активных модулей в виде цепочки полученных результатов измерения или логических значений показателей, представляющих, с общих позиций, открытый интервал в пространстве их значений }. Каждый показатель, с общих позиций, есть точка содержащая окрестность и, следовательно, представляющая собой открытое множество вида:

(17)

в *n*-мерном евклидовом пространстве .

Автоматизация этого процесса была заложена МакКаллоком и Питтсом, использующими достижения теории конечных автоматов, для представления любой деятельности, вычислительной сетью, если она может быть описана конечным числом слов. Такая сеть построена из “абстрактных нейронов”, свойства которых были грубым приближением известных свойств нервных клеток и процессов в них, в первой половине 20-го века.

Автоматизация процессов принятия решений в настоящее время существенно связана с развитием и влиянием средств искусственного интеллекта, лежащих в основе обеспечения эффективного решения этой проблемы, возникающей при оценке и оценивании РЖ ГС ВС как образа.

Данная глава посвящена теоретическим способам классификации образов. Образ, в рамках точного формализма второй главы настоящей работы, представляет собой упорядоченное множество совместимых состояний параметров РЖ в заданной ситуации, характеризующих её состояние, которые составляют описание ситуации, и как следствие, состояние РЖ для этой ситуации.

Условия в рамках точного формализма для задачи распознавания состояния РЖ запишем следующим образом: пусть РЖ, состояние которой описываются совокупностью *X* заданных показателей , функционирует в среде ГС ВС, состояние которой описывается набором *K* параметров . Задание совокупности *X* показателей РЖ означает в общем случае одновременное задание структуры *X* и разрешенных операций над *X*. Знание *X* является определяющим в исходных данных для распознавания состояния в конкретной ситуации.

***3.4. Структурный метод моделирования распознавания состояния рабочей жидкости***

Распознавание образов в работе рассматривается, как вычислительный алгоритм. Оно тесно связано с состоянием РЖ, которое определено следующим образом:

(18)

где множество представляет РЖ в виде некоторого языкового эквивалента, степень адекватности которого зависит от числа задач: числа показателей, свойств, отношений и семантики.

Выражение (18) описывает ситуацию как упорядоченного множество совместных состояний РЖ ГС ВС. При этом, если (*n=1, 2,…, 8*) суть описания состояний данной ситуации, то есть описание ситуации на данный момент времени *t*, как упорядоченного множества совместных физических состояний РЖ, отображаемых её показателями.

Таким образом, модель ситуации – образ текущего состояния РЖ описывается через отображения (18) на множестве возможных состояний в динамическом взаимодействии функционирующей ГС ВС.

Процессы трансформации, взаимодействия РЖ ГС ВС описываются в рамках введенного во второй главе ситуационного исчисления, путем решения логических задач в логике исчисления предикатов первого порядка. Эти методы допускают реализацию вычислительной системой, т.е. решение задач оценки и оценивания состояния в силу полноты логического исчисления первого порядка, что не гарантируется при использовании эвристических приемов.

В основу формализации сложной задачи оценивания состояния РЖ положена идея её описания в виде иерархической структуры решения более простых подзадач.

"Оптимальное" структурирование и последовательная иерархическая декомпозиция РЖ на составные показатели её состояния в диссертации зависят от субъективных целей и задач, которые заданы и формируют структурный модульный подход – систему разрозненных показателей, интегрируемых в рамках исчисления предикатов первого порядка.

Так как подмножество показателей состояния РЖ ГС ВС области рассуждений велико, то для практического использования при их описании вводим дополнительные ограничения, касающиеся структуры области. При этом для показателей области существуют некоторые общие утверждения, справедливость которых для каждого конкретного показателя области можно легко проверить. В рамках символической логики эти утверждения есть предикаты.

Таким образом, класс образов состояния РЖ ГС ВС ограничен. Будем считать, что под классом образов понимается множество образов состояний РЖ. Тогда РЖ есть класс подмножеств данного множества состояний ГС ВС – область рассуждений, которая дополнительно задается множеством предикатов.

Во второй главе было показано существование решения задачи описания образа и, как следствие, возможность определения текущего состояния РЖ в рамках формализма ситуационного исчисления. Сформулирована математическая задача “Получить описание образа состояния РЖ , исходя из , которое определяет ее исходное состояние”.

Для решения этой задачи в рамках ситуационного исчисления определены предикаты, операторы, состояния, аксиомы и множества показателей состояния РЖ. Переформулируем эту задачу так, чтобы можно было доказать ее разрешимость, не решая ее непосредственно. Переформулировка задачи описания образа состояния РЖ базируется на её декомпозиции на заданное множество задач определения показателей её состояния, решение которых связано с применением стандартных методов автоматического решения задач в логике первого порядка, которые, в свою очередь, допускают их реализацию вычислительной системой.

Разобьем задачу описания образа состояния РЖ на подзадачи, решение которых формируют отдельные показатели её состояния.

Последовательно определим предикаты.

При такой формулировке задачи нам нужен один трехместный предикат

(19)

Предикат верен, если только 𝒙 – один из показателей состояния РЖ находится в результатах в состоянии s. Состояние РЖ полностью характеризуется путем учета всех показателей как конъюнкция этих показателей, представляющих подобразы образа состояния РЖ (18). Множество операторов реализуется одним оператором “измерение”

(20)

Здесь *d* – система измерения, осуществляющая измерения конкретных показателей состояния РЖ, *y* – результат измерения для конкретного показателя, – состояние показателя в момент *(t-1)* и – в момент *t*.

Состояния образуют множества:

S= { (21)

Множество объектов, иллюстрирующих проблему оценивания состояния РЖ, состоит из:

*.* (22)

Здесь C – система измерения показателей, осуществляющая измерения констант , которые вводятся для обозначения значений конкретных показателей текущего измерения и эталона, символизируют наименования показателей, для которых вводятся константы .

Зададим аксиомы исчисления ситуации:

1. Начальные аксиомы, которые задают состояния констант эталонов показателей РЖ и констант текущего состояния РЖ.

А1: находятся (, (23)

А2: находятся (. (24)

1. Аксиома

*находится (x,* (25)

отражает факт того, что каковы бы не были состояния s для показателя 𝒙 для конкретного значения свойства следует “если только в этом состоянии 𝒙 находится в то когда система измерений перейдет к 𝒳, из в и т.д. *i=1, 2,…, 8*”.

Для решения задачи оценивания состояния сформулирована задача в рамках подхода, описанного во второй главе. Решены задачи определения констант для заданного набора показателей

Задача №1: (26)

Ответ: (27)

Задача №2: (28)

Ответ: . (29)

И т.д. (постановка и решение задач для *i=3, 4,…, 8* наименование показателей ).

Решение исходной задачи формулируется на основе замены пространства – носителя входных свойств и их значений, полученных в результате решения задач для показателей, на множество из предметного пространства *X*, описываемого в терминах логики, заданной посредством множества 𝒯. Образ состояния РЖ описывается булевым выражением, содержащим логические значения утверждений, включающих предикаты *P(u)=p*, в которых , где *K* – значение свойства РЖ, заменяемого логическим значением, определяющим его состояние.

Описание показателей, которые будут использованы при синтезе образов состояния РЖ, имеют вид

(30)

где *E* – заданное подмножество показателей, 𝒜 – набор показателей состояния РЖ.

При этом образующие для всех *x* из *E*, т.е.

(31)

Для текущих образующих, полученных в результате измерений, существуют показатели .

Предложенный выше подход, базирующийся на двухзначной логике, позволяет решить лишь разомкнутые задачи на основе одношагового процесса, получить результат в виде чисел, характеризующих показатели состояния РЖ. Однако исходная задача оценивания состояния РЖ формулируется следующим образом:

(32)

Задача неразрешима при выше заданных аксиомах. Для решения этой задачи вводится модульная функция, реализуемая вычислительной сетью, в которой использован алгоритм вычисления состояния РЖ с актом выбора и преобразования информации о показателях состояния РЖ, путем введения булевой функции для измеримых показателей, заданной переменными , выраженными в конъюнктивной нормальной форме

(33)

Две конфигурации , построенные из показателей , будут отождествляться , если

(34)

Другими словами, конфигурации идентифицируются по их логическим функциям модулем вычислительной подсистемы системы измерения показателей состояния РЖ. Каждая конфигурация входов

определяет единственный выход .

Рассмотрим семейство показателей 𝒙: каждый показатель ⍺ – это функция, определенная на *X* и принимающая значение “норма” и “ненорма”. Такая двухзначная функция отождествлена со своим множеством истинности в *X*. Если для двух показателей и из 𝒜 имеем , , то отсюда вытекает, что . При этом задано разбиение *X* на классы эквивалентности.

Для образов состояния РЖ допускается группа S преобразований подобия s: , т.е. если 𝒜, то .

При этом образующие, рассматриваемые в данной работе, определяют в среде РЖ носители свойств энергетической составляющей ГС ВС, в которой они составляют естественное множество отображений , соответствующих различным индексам классов образующих . В качестве в работе принят набор показателей РЖ.

***3.5. Модель поведения рабочей жидкости***

Предложенная строгая формализация на основе последних достижений научного направления распознавания образов в рамках искусственного интеллекта статической модели РЖ и параметрического пространства, представляющего образ РЖ как смеси, позволяют сформировать модель распознавания состояния качества РЖ.

Схематическое представление двухмерного пространства для традиционного распознавания образов РЖ показано на рисунке 5.



Рисунок 5 - Двухмерное пространство для традиционного распознавания образа РЖ ГС ВС

На рисунке 5 треугольники, квадраты и круги представляют собой три различных вида образцов, где квадраты - это образцы, подлежащие распознаванию. Овалы отображают результат кластерного разделения образов, а линии – результат разделения образов на классы.

Как видно из рисунка 5, отправной точкой распознавания образов является определение взаимосвязи между точками образцов в пространстве признаков.

Математическая формулировка распознавания образов описывается следующим образом. Предположим, что в пространстве признаков *Rn* все наборы точек *A* представляют собой объекты класса *A*. Если существуют любые два различных элемента *x* и *y* в множестве *A*, то должно существовать множество *B*, принимающее любое значение больше нуля для *ε*, такое, что:

*.* (35)

Чтобы собрать обширный набор данных для распознавания состояния РЖ ГС ВС, по мнению автора, необходимо использовать инструментарий моделирования системы методом решетки Больцмана (LBM). Этот набор данных позволяет изучить способность процесса прогнозирования машинного обучения в моделировании распознавания образов потока жидкости. Искусственный интеллект используется для получения нескольких срезов за различное время моделирования в центре полости в координатах *x-y*. В результате это дает возможность визуализировать картину движения жидкости за короткий промежуток времени.

Реализация распознавания образов заключается в «наложении сложной геометрии в высокоразмерном пространстве». Это позволяет изучить свойства жидкости в пространстве признаков и в результате получить разумное наложение, чтобы можно было «узнать» ее текущее состояние.

Согласно теории размерности [83], для разделения *n*-мерного пространства на две части интерфейс должен быть *n-1*-мерной гиперплоскостью или гиперповерхностью. Нейрон в искусственной нейронной сети действует как *n-1*-мерная гиперплоскость или гиперповерхность в *n*-мерном пространстве, он может представлять собой различные сложные замкнутые гиперповерхности.

Таким образом, искусственные нейронные сети являются очень подходящим средством для описания и реализации распознавания образов РЖ ГС ВС. Существующие нейронные сети основаны на нейронах с одним весом, которые на практике могут строить простые, регулярные геометрические фигуры. BP-сеть представляет собой гиперплоскость, а RBF-сеть – гиперсферу [84], но ни одна из них не удовлетворяет требованиям «сложной геометрии в высокоразмерном пространстве».

Двувзвешенная нейронная сеть имеет два веса, один из которых эквивалентен направленным весам сети BP, а другой - основным весам сети RBF. Учитывая это, по мнению автора, нейронная сеть с двойным взвешиванием может быть использована для получения сложных геометрических форм, характеристик отклика и анизотропных свойств высшего порядка, наследственных свойств для удовлетворения требований распознавания образов РЖ.

Многовзвешенные нейроны в таком случае могут быть описаны следующим образом:

, (36)

где *X* - входной вектор, *Wn* - вес *n*-го вектора, - функция нейрона, *f* - передаточная функция, - порог нейрона.

Когда *n* = 2 формула (36) является дуальновзвешенным неравенством, обозначаемым как:

. (37)

Когда две точки *W1* и *W2* в пространстве имеют определенный уникальный промежуточный слой, это может быть выражено следующим образом:

, (38)

где *wi* - направленный вес от *i*-го входа нейронной сети, который определяет направление масштабирования нейронной сети, *τi* - основной вес от *i*-го входа нейронной сети, который определяет центральное расположение нейронной сети, *xi* - собственное значение *i*-го входа, *p* - параметр метрики, *n* - пространственная размерность, *p* и *n* вместе определяют множество гиперповерхностей конструкции нейронной сети, *s* - параметр метода для определения одностороннего положительного и отрицательного знака, причем односторонний знак всегда положителен, когда *s* = 0, и односторонний знак остается таким же, как *wi*, когда *s* = 1.

Схема структуры двувзвешенного нейрона показана на рисунке 6.



Рисунок 6 - Структура двувзвешенного нейрона

Благодаря такому подходу описание каждого слоя РЖ выполняется независимо, а результаты передаются на следующий слой. Каждый последующий слой фокусируется на описании одного конкретного набора признаков, предполагая, что вся необходимая информация уже найдена вышестоящими слоями нейронной сети.

Например, первый слой описывает тип РЖ и передает данные на второй слой. Второй слой описывает дальнейшие признаки (например, эмульсию, твердые частицы, цвет). Преимущество иерархического подхода заключается в том, что он позволяет рассматривать каждый этап описания независимо, что значительно упрощает задачу распознавания.

На рисунке 7 представлены результаты описания цвета РЖ с использованием двувзвешенной нейронной сети, которые получены в лабораторных условиях в процессе проведения опыта.

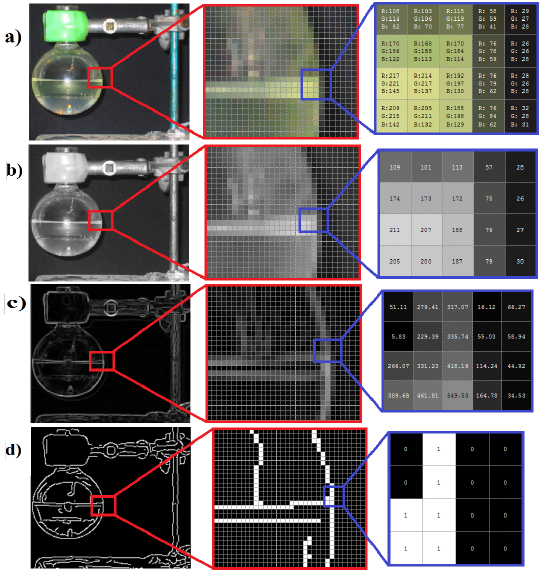


Рисунок 7 - Иерархическое описание РЖ

a) Цветное изображение представлено в виде двумерной матрицы. Каждая ячейка матрицы (пиксель) содержит 3 параметра (R, G, B), которые дают цветовую насыщенность заданной цветовой гаммы в месте расположения пикселя.

b) Полутоновое изображение представлено в виде двумерной матрицы. Каждая ячейка матрицы (пиксель) имеет одно значение, которое дает интенсивность уровня серого в данном месте пикселя. Интенсивность варьируется от 0 (черный) до 255 (белый).

c) Изображение размера градиента: значение каждого пикселя - это размер градиента интенсивности в данном месте. Размер градиента представлен на рисунке как уровень яркости.

d) Изображение краев: двоичное изображение, в котором пиксели, соответствующие краям, имеют значение 1 (белый), а все остальные пиксели имеют значение 0 (черный).

После описания образа РЖ ГС ВС необходимо выбрать способ распознавания. Учитывая данные, приведенные в таблице 5, для решения поставленной задачи представляется целесообразным использовать структурные методы распознавания.

В заключении сформулируем ряд понятий, лежащих в основе моделирования поведения РЖ.

Набор значений заданного ряда классификационных признаков *K* (классификационных атрибутов ), т.е. , где область значения атрибута для РЖ.

Функциональный атрибут РЖ – это методы и функции, определяющие ее поведение. Например, “РЖ изменяет цвет в соответствии с ее изменением при функционировании элементов ГС ВС; плотность; кислотность и т.п.”.

Структура формальной модели всех атрибутов представляет собой причинно-следственную связь. Причина - это действие, определяющее соответствующий атрибут, а результат - следствие этого действия или условное значение атрибута (параметр, характеристика или функция РЖ). В общем случае схема этой модели выглядит следующим образом:

(39)

где – аргументы, *Y* – функция, символ *f* означает тип операции с аргументами. Аргументами таких моделей являются параметры РЖ, а также внутренние факторы , влияющие на ее поведение. Поэтому применительно к показателям РЖ модели функциональных атрибутов имеют вид:

. (40)

Идентификаторы РЖ заданы в ее эталоне.

Из главы 2 следует, что представление об атрибутах РЖ формулируется как предикаты на введенном формальном языке.

Процесс объединения РЖ в классы в соответствии с их свойствами представляет собой их классификацию по состоянию, реализуемой путем конкретизации значений ее атрибутов. При этом набор значений, полученных при исследовании РЖ в определенный момент времени *t,* определяет ее состояние.

Формальная модель поведения РЖ (*О*) представленная в графическом виде представлена на рисунке 8.

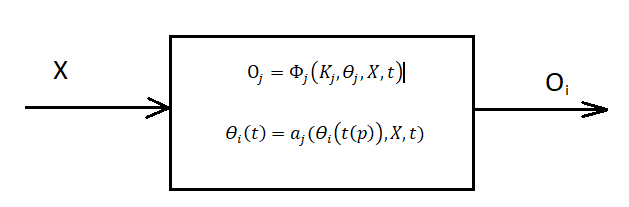


Рисунок 8 - Модель поведения РЖ: *X* – база факторного пространства, – состояние РЖ, – идентификатор атрибута, *t* – определенный момент времени.

* 1. ***Выводы по главе***

В процессе исследования были поставлены и решены научно-прикладные задачи разработки методов моделирования и моделей распознавания образа состояний РЖ ГС ВС.

В частности, автором обоснована целесообразность использования эволюционных методов моделирования в реализации упреждающего обслуживания. Это связано с тем, что данная группа методов представляет собой перспективное направление интеллектуальной обработки диагностической информации о состоянии РЖ ГС ВС, базирующейся на дискриминантном и структурных методах распознавания образов, что является на сегодняшний день важным научно-практическим направлением совершенствования ТО ВС, повышающим качество эксплуатации ВС.

С целью использования эволюционного моделирования на практике выделена предметная область, обозначены процессы взаимодействия, процессы жизненного цикла и управления рабочей жидкостью.

В ходе построения модели состояния РЖ ГС ВС были введены основные понятия и определения распознавания состояния РЖ, формализован язык. Для выбора наиболее эффективного метода распознавания образа проведено сравнение нескольких подходов, обозначены их достоинства и недостатки.

С использованием полученных результатов, а также формализма образа У. Гренандера была разработана модель состояния РЖ ГС ВС. Для модели эволюции изображения в работе использована математическая игра – «игра в жизнь».

Для распознавания состояния РЖ автором было предложено применять структурный метод. Благодаря ему процессы трансформации, взаимодействия РЖ ГС ВС описываются на базе ситуационного исчисления, путем решения логических задач в логике исчисления предикатов первого порядка. Эти методы допускают реализацию вычислительной системой, т.е. решение задач оценки и оценивания состояния в силу полноты логического исчисления первого порядка, что не гарантируется при использовании эвристических приемов.

Моделирование поведения РЖ проводилось в работе с использованием нейронных сетей, а именно сети с двойным взвешиванием. Чтобы доказать эффективность предложенного подхода к моделированию на практике были проведены лабораторные эксперименты описания цвета РЖ. Полученные результаты позволяют утверждать, что модель может быть использована для получения сложных геометрических форм, характеристик отклика и анизотропных свойств высшего порядка, наследственных свойств для удовлетворения требований распознавания образов РЖ.

**ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ**

**4.1. Введение**

Повышение надежности работы бортовых систем (БС) – является одной из основных задач, для решения которой разрабатываются системы контроля БС и диагностики их состояния.

В настоящее время имеется большое количество различных систем контроля и диагностики, классифицируемых на встроенные и внешние, повышающих эффективность ТО современных БС.

Встраиваемые системы контроля и диагностики существенно повысили надежность функционирования БС и эффективность их ТО. Они реализуют методы аппаратурной избыточности и сложные алгоритмы оценивания на базе современной вычислительной техники. Эти методы и средства сводятся в основном к тому, что кроме сигналов, несущих информацию о состоянии элементов БС, формируется дополнительная информация, используемая для оценивания состояния отдельных элементов этих БС для обслуживающего персонала.

Решение задачи повышения надежности БС достигается ценой дополнительных затрат на введение дополнительной аппаратуры не всегда готовой к оцениванию, т.е. принятию решений о ее реальном состоянии, что требует дополнительного времени и использования интеллектуальных затрат на восстановление работоспособности БС в целом. При этом использование методов аппаратурной и сигнальной избыточности требует больших дополнительных затрат, порой значительно превышающих затраты на создание БС ТО на базе существующих методов проектирования и аппаратурной реализации.

Однако использование этого дополнительного комплекта бортового оборудования значительно изменило характер работы инженера по ТО. Его основная задача – контролировать процесс управления, принимать решения в нестандартных ситуациях и, по сути, воспроизводить технологию.

С более совершенным оборудованием работа техника должна стать намного проще. С одной стороны, это так, но с другой стороны, во многих случаях верно и обратное, как показали исследования эргономистов. Проблема взаимодействия человека и техники стала намного сложнее и является одной из главных проблем современной науки.

В основном это связано с развитием различных тенденций в создании новых технологий и специалистов, которые ими занимаются. Можно отметить наличие следующих характерных особенностей, связанных с взаимодействием в системе “человек-техника”.

Во-первых, в связи с появлением БС ТО требуются специалисты с системотехнической подготовкой. Увеличились потоки информации. В этих условиях возникла потребность в создании языка, описывающего события в системе “человек-техника” и деятельность специалистов в среде ТО. По существу, этот язык должен быть псевдофизическим языком, базирующимся на исчислении предикатов, переменные которых изменяются на области всех БС и их элементов, и исключающим вероятностные методы при решении конкретных задач, так как требуется конкретное решение в конкретной ситуации.

Во второй главе настоящей работы проведены достаточно глубокие исследования по языку оценивания РЖ и предложена универсальная модель описательного языка состояния РЖ как сочетания теоретико-множественной интерпретации области рассуждений и ситуационного исчисления.

Во-вторых, сложное системное, иерархическое строение процессов приема и переработки информации предъявляет высокие и специфические требования к методам их теоретического анализа и уровню экспериментального его внедрения.

В-третьих, за последние годы наблюдается сближение математических, кибернетических и практических методов исследования не только результатов, но и структуры, функционирования и генезиса информационных процессов при принятии решений.

В третьей главе поставлена и решена научная задача разработки методов и моделей распознавания образов состояния РЖ ГС ВС. В основу оценки и оценивания состояния РЖ положены принципы эволюционного моделирования состояния РЖ ГС ВС, являющиеся основой для оценки и оценивания ее состояния на базе единой структурной модели распознавания образов ее состояния.

**4.2. Проблемы оценивания состояния рабочей жидкости**

Оценивание состояния РЖ в работе рассматривается как процесс принятия решений, что требует решения задачи создания организационной структуры и системы управления для обеспечения непрерывности поступления информации и принятия решений. Система управления должна включать три подсистемы:

* 1. информационную систему, которая собирает данные и своевременно представляет эту информацию тем, кто в ней нуждается;
  2. систему поддержки принятия решений, обрабатывающую информацию и инструкции;
  3. систему контроля, которая должна уметь выявлять благоприятные возможности и определять решения, которые необходимо принять при возникновении таких возможностей.

Внутрифирменная проблема является одной из наиболее интенсивно изучаемых проблем в теории управления при эксплуатации. Необходимость разработки метода гибкого и оперативного принятия решений по отдельным проблемам является узким местом оценивания состояния РЖ. Как показал анализ, "узким" местом внутрифирменного получения информации остаются:

• Чрезмерно стандартизированное целеполагание при решении стратегических задач. В определенной степени оно определяется динамикой внешней среды, неопределенностью взаимодействия ключевых, развивающихся и сопутствующих технологий;

• Неадекватная коммуникация стратегической и оперативной информации для оценивания качества, обычно вызванная отсутствием коммуникации стратегических целей по отношению к оперативным целям;

• Определенная "отсталость" оперативного получения информации: в рамках оперативного оценивания состояние РЖ постановка целей в собственном смысле слова фактически не производится. Оперативные цели базируются, как правило, на показателях предшествующего периода. Анализ возможных путей уменьшения неопределенности при оценивании потребовал построить простейшую кибернетическую модель процесса оценивания.

Для того чтобы построить адекватную модель, необходимо хорошо понимать цели исследуемой системы и иметь информацию об ограничениях, которые определяют область допустимых значений управляемых переменных.

Сложность реальных систем, в частности ГС ВС, может сильно затруднить представление целей и ограничений в аналитическом виде. Поэтому очень важно уменьшить "размерность" решаемой задачи таким образом, чтобы обеспечить возможность построения подходящей модели. Казалось бы, существует множество переменных и ограничений, которые необходимо учитывать при анализе реальных ситуаций. Однако было установлено, что лишь небольшая их часть важна для описания поведения рассматриваемой системы. Поэтому при упрощенном описании реальной системы для создания модели сначала необходимо определить доминирующие переменные, параметры ограничений.

## **4.3. Основные понятия и определения**

Определим понятие РЖ. С нашей точки зрения, РЖ – это все, что различаем как нечто целое, реально существующее, или появляется в нашем сознании в целом, то, что, как мы можем определить, имеет характеристики, позволяющие нам четко идентифицировать его. Итак, РЖ – это реальная сущность, определяемая как:

* осязаемая или видимая жидкость;
* на что направлено мышление или действие.

Для более строгого определения используемых понятий проведем следующие действия:

* Вводим уникальный идентификатор имя определяемого понятия – РЖ;
* Указываем ранее определенное известное понятие РЖ, свойство которого наследует определяемое понятие, так реализуется принцип наследования при определении новых понятий, в частности, РЖ – есть сущность. Это подразумевает, что все характеристики концепции сущности должны быть известны.
* Указываем существенные для данного понятия свойства, отличающие его от свойств всех других понятий (принцип выделения отличительных особенностей нового понятия).
* Определяем область применения вводимого понятия, его роль и место среди других понятий данной теории (принципы ограниченности, целесообразности и логической связности понятий).

В теории синтеза системы оценивания рабочая жидкость служит основным исходным понятием для определения всех ключевых понятий этой теории. С точки зрения теории синтеза системы оценивания рабочей жидкостью называется все то, что можно мысленно выделить из своего окружения, определив свойства и характеристики, важные для данного понятия.

Всеобщим свойством РЖ являются его атрибуты. Атрибуты – это важные детали, параметры, характеристики или особенности определяемого объекта. Другими словами, атрибут - это объект, который служит для определения объекта, т.е. служит для определения другого объекта, и который имеет характеристики, подобные другому объекту. В зависимости от предназначения атрибуты объекта можно разделить на:

* Идентификаторы,
* Параметры,
* Методы взаимодействия,
* Функции.

Идентификатором конкретной РЖ служат паспортные данные. В качестве аргумента для идентификаторов РЖ выбираются переменная, значение которой не меняется в течение периода использования. Параметрами обычно являются структурные параметры. Параметры обычно описывают состояние РЖ в пространстве и времени. Состояние обычно меняется с течением времени. Наиболее важными для всех РЖ являются их структурные параметры: состав элементов и характер связей между ними. Метод взаимодействия с окружающей средой определяет реакцию РЖ на взаимодействия с окружающей средой. Во многих случаях метод описывает изменения параметров РЖ как реакцию на внешние воздействия окружающей среды. Функция обычно включает в себя действие объекта, приводящее к результату. Аргументом функции обычно является значение внешнего воздействия на РЖ или значение параметров РЖ в определенные моменты времени. Методы определяют динамику внутренних состояний РЖ, а функция - внешние воздействия, вызванные этой динамикой.

Функциональные атрибуты РЖ – это методы и функции, определяющие ее поведение. Структура формальной модели всех этих действий представляет собой отношение “причина – следствие”. Причиной обычно является действие или условие, а следствием – результат действия или обусловленное значение атрибута. В общем случае схема этой модели выглядит следующим образом:

где – это аргументы, *Y* –функция, а символ *f* указывает на тип операции с аргументами. Аргументами таких моделей обычно являются параметры объектов РЖ.

**4.4. Постановка задачи оценки состояния рабочей жидкости**

Рассматривая наиболее важные аспекты процесса отражения или отображения, в данной работе основное внимание уделяется системе, осуществляющей мониторинг и диагностику функционального состояния РЖ. Поскольку функционирование РЖ охватывает множество общих ситуаций, которые возникают часто, эффективность функции РЖ будет выше, если она будет подготовлена к переходу в наиболее вероятную ситуацию. Для этого РЖ должна содержать соответствующие внутренние связи дополнительных компонентов, а также компонентов, которые не могут реализовать данные функциональные состояния. Функциональные состояния и образы могут быть активированы путем прямого взаимодействия с объектами в окружающей среде или через промежуточные объекты, обладающие лишь свойствами исходных объектов, которые могут стимулировать начальные стадии функциональных состояний РЖ, т.е. путем предоставления информации. В нашей работе мы будем говорить об образах самих функциональных состояний, а также об образах структур, связывающих эти состояния в законченную комбинаторную функцию.

Задача отображения решается, как правило, встроенными системами контроля и диагностики (ВСКД). При создании таких систем, способных функционировать в РЖ, необходимо учитывать, как динамический характер ГС, так и динамический характер ВСКД. РЖ - это, прежде всего, динамическая система, в которой все процессы развиваются во времени, а все объекты, вовлеченные в ситуацию, обладают только им присущими динамическими свойствами. В РЖ могут действовать некоторые заранее неизвестные внешние силы, независящие от ВСКД, поэтому результат работы ВСКД может не совпадать с ожидаемым эффектом.

В математическом плане задача формирования функции ВСКД в реальной динамической среде может быть выражена в виде задачи оптимального управления. Задача оптимального управления в общем случае включает в себя задачу преобразования динамики объекта, описываемого системой дифференциальных уравнений, из одного начального состояния в другое и нахождения вектора, управляющего функцией и принимающего экстремальное (оптимальное) значение. Если в данной формулировке под объектом управления мы будем понимать систему “ВСКД – РЖ”, а под управлениями ее действия, то мы получим задачу поведения ВСКД с учетом динамики системы “ВСКД – РЖ”. Сформулируем задачу функционирования ВСКД в терминах оптимального управления.

Пусть ВСКД, состояние которой описывается набором *R* параметров , функционирует в некоторой среде, состояние которой описывается набором *B* параметров . Пусть, кроме того, ВСКД может выполнять некоторые действия из набора , в результате влияния которых могут изменяться, как параметры состояния среды, так и параметры состояния самой ВСКД. В общем случае это влияние может быть описано системой дифференциальных уравнений вида

(41)

где – переменные состояния системы “ВСКД–РЖ”, являющиеся объединением параметров и ; – нелинейные функции переменных состояния и действий ВСКД. Здесь и далее *S*, *D* – векторы переменных состояния системы робот-среда и действий ВСКД соответственно. Очевидно, что

При этом на возможные состояния системы “ВСКД–РЖ”, а также на возможность применения того или иного действия в конкретной ситуации могут налагаться некоторые ограничения, в общем случае представляемые в виде неравенств

(42)

(43)

где (S), – некоторые нелинейные функции.

Цель функционирования ВСКД теперь можно представить как преобразование системы “ВСКД–РЖ” из текущего состояния в целевое состояние .

С учетом поставленной задачей и уравнений (41) – (43) необходимо иметь ввиду следующее очень важное обстоятельство. ВСКД, как правило, функционирует в заранее неизвестной среде, в которой могут действовать заранее неизвестные силы или появляться заранее неизвестные объекты. Поэтому в текущий момент времени ВСКД доступна лишь накопленная к этому моменту информация о РЖ, а также информация о текущей ситуации, получаемая ей с помощью датчиковых систем. В то же время, информация о последующих, в особенности отдаленных в будущем состояниях системы “ВСКД – РЖ”, заранее неизвестна и не может быть получена на основе предыдущей или текущей информации. Однако ВСКД всегда располагает определенной информацией о конечной цели.

Другими словами, ВСКД в любой ситуации располагает достаточно точной информацией о состоянии системы “ВСКД – РЖ” на некотором ближайшем интервале времени в будущем, так сказать “информацией на ближайшую перспективу”, и менее надежной информацией о последующих состояниях системы “ВСКД – РЖ”.

Следовательно, если в текущий момент времени *t0* сформировать модель ситуации в виде системы (41) – (43), то эта модель будет соответствовать действительной ситуации в системе “ВСКД – РЖ” в течение некоторого ограниченного интервала времени. Соответственно и решение задачи (41) – (43), полученное на основе этой модели, через некоторое время также не будет соответствовать реальной ситуации в системе “ВСКД – РЖ”, т.е. может оказаться неоптимальным или вообще нереальным.

Итак, как показано выше, первой проблемой, возникающей при создании ВСКД на основе сформулированного подхода, является проблема формирования динамической модели ситуации в виде отношений (41) – (43) на основе накопленной и текущей информации. Рассмотрим решение этой проблемы.

Остановимся на формировании моделей объектов, участвующих в определении состояния РЖ. Задачу формирования математической модели системы “ВСКД – РЖ” рассмотрим на основе накопленной ранее информации и текущей информации, поступающей от датчиковой системы ВСКД. В соответствии с информацией о типах объектов, получаемых с помощью датчиковой системы ВСКД, из указанной базы знаний извлекаются обобщенные динамические модели этих объектов.

Исходя из полученной информации, обобщенный образ рассматриваемого вида можно интерпретировать как абстракцию в стандартном логическом смысле. Если содержание обобщенного образа - это перечень свойств, представленных таким образом, то чем более обобщен образ, тем меньше свойств он представляет, и тем хуже его содержание. Однако это обеднение приводит к тому, что обобщенные образы ассоциируются по сходству с более конкретными объектами и их образами, что повышает их способность выступать в качестве "олицетворителя" ассоциированной категории конкретных образов для опосредованных актов взаимодействия с окружающей средой (РЖ: результат категории конкретных образов, с которыми они ассоциируются). Это и есть увеличение объема данного обобщенного образа.

В соответствии с информацией о типах объектов, получаемый с помощью датчиков системы ВСКД, из заданной базы знаний извлекаются обобщенные динамические модели этих объектов. В результате выполнения этих процедур определяется набор отдельных динамических моделей, участвующих в текущей ситуации в среде, которая затем связывается в общую модель системы “ВСКД – РЖ”.

Следует учесть, что часть образов, участвующих в ситуации могут играть пассивную роль, т.е. не оказывать влияния на решение поставленной перед ВСКД задачи. Поэтому из множества объектов, участвующих в текущей ситуации, сначала выделяются те объекты, которые оказывают существенное влияние на решение поставленной задачи, а затем производится объединение их моделей с моделью самого ВСКД в общую динамическую модель ситуации в системе “ВСКД – РЖ”.

В процессе функционирования ВСКД даже в условиях такой сложноорганизованной среды как РЖ какие-то связи остаются неизменными. Другие связи наоборот непрерывно изменяются, возникают или перестают функционировать, поэтому математическая модель в системе “ВСКД – РЖ” в общем случае должна содержать две части: одну часть априори известную (эталон РЖ) и другую - создаваемую в каждой ситуации вновь (результат текущих измерений). В связи с этим ВСКД должна обладать следующими возможностями: хранить модели постоянных или достаточно стабильных связей; хранить обобщенные модели объектов, которые в общем случае могут участвовать в ситуациях в среде; формировать модели новых переменных связей на основе базы данных и информации, поступающей от датчиков и регистрирующих систем; объединять имеющиеся модели отдельных динамических моделей в единую динамическую модель системы “ВСКД – среда” с учетом естественных и других видов ограничений.



Рисунок 9 - Структурная схема ВСКД

Для придания ВСКД этих возможностей необходимо соответствующее алгоритмическое обеспечение и примеры его применения. Представление ВСКД и среды как совокупности взаимосвязанных известных и неизвестных элементов позволяет учесть априорную информацию и значительно снизить объем и время выполнения вычислительных операций, необходимых для идентификации элементов ВСКД и окружающей его среды.

Рассмотрим представление априорных моделей ВСКД. Отдельные элементы ВСКД и среды, являющиеся динамическими звеньями, естественным образом описываются обычными моделями, используемыми в теории динамических систем. В дальнейшем будем предполагать, что используемые для описания элементов систем модели любых типов дают достаточно полное описание элементов системы.

Остановимся на определении параметров модели известной структуры (РЖ). Структура модели РЖ считается известной, если известен тип динамических звеньев, входящий в состав данной модели объекта, и способ соединения их дуг с другом, т.е. реализуется метод построения конфигураций из заданного набора образующих. Задачу определения параметров моделей с известной структурой будем называть параметрической идентификацией или просто идентификацией. Для повышения точности будем применять многократное вычисление оценок с последующим усреднением.

## **4.5. Мониторинг и диагностика характеристик рабочей жидкости на основе нейронных сетей**

В последние несколько десятилетий широко изучалась диагностика РЖ и был разработан ряд ее методов. В зависимости от используемых подходов предлагаемые методы можно разделить на три группы: основанные на моделях, управления данными и гибридные. Наиболее широко применяемыми методами в диагностике состояния РЖ являются: анализ РЖ и его производные, фильтр Калмана и его производные, искусственные нейронные сети и их производные, генетические алгоритмы, методы нечеткой логики и байесовских сетей.

Методы диагностики различаются по своей способности:

1. справиться с нелинейностью работы РЖ;
2. представлять точные результаты с минимально возможным количеством датчиков;
3. обеспечивать проведение измерений;
4. работать с одновременно возникающими неисправностями;
5. выполнять диагностику в реальном времени с высокой вычислительной эффективностью;
6. различать быструю и постепенную деградацию;
7. выполнять качественную и количественную диагностику нарушений РЖ;
8. быстро обнаруживать неисправности с незначительными ложными тревогами из-за шума измерений;
9. предоставлять легко интерпретируемые результаты.

В этом контексте проведенные исследования внесли значительный вклад. Однако методы в каждой категории по-прежнему имеют свои преимущества и ограничения.

Методы управления данными выгодны при отсутствии точной математической модели или подробных экспертных знаний о РЖ. Кроме того, они более предпочтительны с точки зрения снижения требований к датчикам, устойчивости к эффектам неопределенности измерений и возможности одновременной диагностики состояния РЖ.

Решение на основе моделей больше всего подходят к интерпретации поведения РЖ, поскольку они учитывают реальную физику функционирования ГС и вопросы динамики РЖ. Более того, когда для диагностики нарушений необходимы сдвиги базовой линии, обновление модели может быть выполнено с меньшими затратами и усилиями, чем переобучение методом управления данными. Методы на основе моделей имеют некоторые недостатки в точности из-за неопределенности измерений и эффектов размытия модели. С другой стороны, методам управления данными не хватает интерпретируемости их внутренней работы, и они требуют большого количества данных для обучения, а процесс обучения может занимать чрезвычайно много времени.

Гибридные методы, применяющие совместный подход к решению проблем, показали многообещающую эффективность в случае, когда методы интегрированы на основе их взаимодополняющих преимуществ.

Быстрое развитие методов обучения открывает расширенный доступ к исследованиям для решения вопросов эффективного определения состояния РЖ и технологий управления этим состоянием. В последние десятилетия методы глубокого обучения привлекли большое внимание во многих прикладных областях, включая распознавание образов и компьютерное зрение. В последнее время наблюдается быстрый рост использования сверточных нейронных сетей для диагностики ГС ВС, обусловленный их мощными возможностями для изучения признаков и классификации.

Метод обнаружения и локализации нарушений в РЖ с использованием модульных сверточных сетей основан на физике системы мониторинга тенденций надежности функционирования ГС ВС. Система мониторинга тенденций использовалась для регистрации изменений в РЖ из-за деградации для установления нового базового уровня когда это необходимо и для создания сигнатур ошибок. Система обнаружения и локализации нарушений в РЖ была обучена поэтапному обнаружению и классификации нарушений в РЖ на уровне компонентов с использованием сигнатур нарушений, полученных из физической части ГС ВС.

Эффективное ТО критически важных для полета компонентов РЖ играет важную роль в машиностроении.

ТО по состоянию является ключевым достижением в этой области, когда действия по ТО выполняются на основе фактических данных о существующем состоянии работоспособности. Потенциальное повреждение компонентов РЖ из-за загрязнения, эрозии, коррозии и увеличения зазоров в агрегатах ГС ВС могут быть обнаружены и изолированы до того, как они станут достаточно серьезными. Для этого требуется релевантная и достаточная измерительная информация, основанная на результатах анализа компонентов загрязнения РЖ.

В последние годы наблюдается быстрый рост использования сверточных нейронных сетей (CNN) для диагностики большого количества сложных систем машиностроения. В этой части работы предлагается новый модульный метод, базирующийся на модульных сетях Мак-Каллока – Питса интегрированной системы мониторинга тенденций, основанный на исчислении высказываний с использованием определенных событий, представляемых модульной активностью, описываемой таблицами входа. Модульная сеть общего типа, включающая более простые сети, представляет конечный автомат, реализующий события, находящиеся в момент *t1* в некотором состоянии *B1*, и представленный состоянием, существующим в момент *t*. Использование введенных Мак-Каллоком понятий гибкого и сложного модуля позволяет получить сложные модули для решения задач оценки состояния РЖ.

Как показывает накопленный к настоящему моменту опыт оценивания состояния, решение всего комплекса задач в реальном времени возможно на базе применения семейства нейронных сетей, среди которых следует выделить: LeNET, AlexNet, VGGNet и GoogLeNet. Изучение признаков и классификация с помощью них позволяет надеяться на решение поставленной задачи.

Использование иерархических сетей также является обычной современной практикой классификации изображений, поскольку они позволяют фиксировать взаимосвязи признаков между группами и подгруппами контролируемых и диагностируемых состояний РЖ.

В области диагностики РЖ использование CNN для классификации неисправностей было определено их способностью к изучению функций и распознаванию изображений посредством имитации обработки изображений. Для преобразования сигнальных данных в изображениях используются вейвлет-преобразование и быстрое преобразование Фурье.

Типовая архитектура CNN (рисунок 10) для решения сложных задач оценивания состояния РЖ состоит из входного уровня, сверточного уровня, уровня активации, уровня объединения, полносвязного уровня и выходного уровня.

Информация поступает от входного уровня, который представляет собой систему встроенных датчиков, результаты измерения которых проходят через наборы уровней с рядом операций, а затем дает качественный или количественный результат в зависимости от своей цели. Изучение признаков и классификация – это два подраздела структуры CNN, где первый используется для извлечения наиболее полезных признаков из входных данных, а второй отображает извлеченные признаки как конченый результат. Сверточные слои генерируют несколько карт РЖ (химический анализ, анализ загрязнения, классификация размеров элементов загрязнения и классы чистоты). Объединяющий слой является слоем, в котором параметры состояния РЖ уменьшаются по размерам. Выходной уровень выполняет заключительную операцию в модели CNN. Он вычисляет вероятностные значения, чтобы принять классовое решение о том, какому классу принадлежат входные данные.



Рисунок 10 - Типовая архитектура CNN

Входной уровень определения частоты РЖ предлагается реализовать на базе портативного счетчика частиц РЖ Icount Laser CM20, а для химического анализа использовать данные лабораторных исследований состояния РЖ.

**4.6. Синтез структуры системы оценивания состояния рабочей жидкости**

Одной из центральных задач оценивания состояния РЖ является задача формирования алгоритмов объективной классификации, в основе которой лежат три вида алгоритмов:

1. алгоритмы последовательной классификации;
2. алгоритм параллельной классификации;
3. классификация на незаданное число классов.

Для решения конкретных задач оценки и оценивания состояния РЖ в работе использована комбинаторная теория образов У. Гренандера, предусматривающая структурное объединение.

Основной целью теории, рассмотренной в подразделе 4.5, является представление событий путем построения модульных сетей, которые описываются таблицами входа (таблица 6) и показывают состояние, например, загрязнение РЖ или результаты ее химического анализа, получаемые с помощью этих сетей, объединенных в нейроподобную сеть передаточных функций динамических звеньев.

Таблица 6 – Пример таблицы входа

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | m1 | m2 | m3 | m4 | m5 |
| t-1  t-2  t-3 | 1  1  0 | 1  1  1 | 0  1  1 | 1  0  0 | 0  0  1 |

Отдельные образующие БСКД и РЖ, являющиеся динамическими звеньями, описываются обычными моделями, используемыми в теории динамических систем. В общем случае, для априорных представлений образующих как передаточных функций, используются одномерные динамические звенья известного вида:

, (44)

где *y(p), g(p)* – изображения по Лапласу выходной и входной величин; *n, m* – степени полиномов знаменателя и числителя соответственно (число *n* обычно называется порядком передаточной функции); – числовые параметры модели.

Основным условием, накладываемым обычно на передаточные функции реальных динамических звеньев, является неравенство

Одним из основных параметров передаточной функции (ПФ) является степень ее знаменателя. Для описания динамических звеньев чаще всего используются ПФ, где *n=1, 2,* поскольку более сложные модели (44) можно всегда заменить некоторой совокупностью ПФ первого и второго порядка.

При этом образующие ВСКД и РЖ известны, представляются простейшими динамическими звеньями с заданными параметрами, полученными из технических требований к РЖ, которые представлены ниже:

* 1. Продукт должен представлять собой огнестойкую жидкость на основе фосфатных эфиров для гидравлических трансмиссий. Его химический состав (добавки, загрязняющие вещества) и внутренние физико-химические свойства должны строго соответствовать требованиям спецификации.
  2. Изготовитель должен гарантировать постоянную доступность гидравлической жидкости. Поставляемый продукт должен быть того же качества, что и квалифицированный продукт, и его состав не должен быть изменен без предварительного согласия эксплуатанта.
  3. Все поставляемые гидравлические жидкости должны быть полностью совместимы с любой другой жидкостью на основе эфиров фосфатов, уже прошедшей квалификацию, независимо от пропорций смеси
  4. Типы жидкостей, подпадающие под действие данной спецификации, перечисляются в специальной таблице с их соответствующими свойствами.
  5. Основные физические и химические свойства жидкости, на которую распространяется данная спецификация, перечисляются в специальной таблице (ее пример - технический паспорт на РЖ типа NSA307110 приведен ниже в таблицах 7 и 8).
  6. Должны быть перечислены квалифицированные производители и продукция.
  7. Лаборатории производителя РЖ должны быть сертифицированы ISO и оценены эксплуатантом.

Таблица 7 - Технический паспорт гидравлической жидкости NSA307110

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Свойство** | **Единица измерения** | **Состояние** | **Требования** | | **Метод(ы) испытания** | |  |
| **Символ** | **тип IV** | **тип V** | **Ссылка** | **Другой** |
| Абсолютная кинематическая вязкость |  | -54 °C/-65 °F | ВД: <2 900  НД : < 2 000 | НД : <2 000 | ISO 3104 | ASTMD 445 |
| +38 °C/+100 °F  +99 cC/+210 °F | g [9.00 ; 12.50] e [3.00 ; 4.00] | |
| Содержание воды | % |  | < 0,20 | | ISO 12937 | ASTMD 6304 |
| Плотность | kg.m-3  "p" | (+23 ± 3) °C | 990 to 1 066 | 970 to 1 020 | ISO 3675 | ASTMD 1298 |
| Индекс кислотности | mg KOH per g. of fluid  "Al" |  | <0.15 | < 0.10 | ISO 6618 | ASTMD 974 |
| Электрическая проводимость | См.cm-1  "Y" |  | >0.30 | | NSA307110 | |
| Химический состав | Cl  p.p.m. | хлор | < 50 | < 30 |
| p.p.m. = частей на миллион 10'° | | |
| Температура застывания | °C/°F |  | < -62/-80 | | ISO 3016 | ASTMD 97 |
| Температура вспышки | >+160/+320 | | ISO 2592 | ASTMD 92 |
| Температура воспламенения | >+177/+350 | |
| Температура самовоспламенения | > +400 / +752 | | NSA307110 | |
| Воспламеняемость | Циклы  Точки  Точки |  | Проверка зажигания на трубоочистителе> 25  Испытание на зажигание под давлением kh > 10  Проверка зажигания на горячем элементе km > 10 | | NSA307110 | |
| Состояние цвета |  |  | Фиолетовый  Четкий внешний вид | | NSA307110 | |
| Адиабатический объемный модуль упругости | Pa | +25 to +120 °C | > 14 500.10s | | NSA307110 | |
| Тепловое расширение | °C-1  “ос" | +25 to  +99 °C | < 1.1 O'3 | | ASTM  D 941 | ASTM  D 1217 |
| Загрязнение твердыми частицами | Класс | NF L 41-101 | < 7 | | NF  L41-102 | ARP/AS  598 |
| Гравиметрический анализ | mg | for  100 cm3 | Не указан | < 1 | ARP 785 |
| Индекс фильтруемости | "Fl" |  | e [1.00 ; 1.60] | | NSA307110 | |
| Пенообразование | cm3 | +24 °C  +93 °C  +24 °C | Через 5 мин  <250  < 150  <450 | Упорство   * 100 sec. * 50 sec. * 250 sec. | ISO  6247 | ASTM  D 892 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Размер частиц (1)** | **Размер частиц (2)** | **Класс 8** | **Класс 9** |
| 5 до 15 микрон | 6 до 14 микрон | 64000 | 128000 |
| 15 до 25 микрон | 14 до 21 микрон | 11400 | 22800 |
| 25 до 50 микрон | 21 до 38 микрон | 2025 | 4050 |
| 50 до 100 микрон | 38 до 70 микрон | 360 | 720 |
| > 100 микрон | > 70 микрон | 64 | 128 |

Таблица 8 - Анализ загрязнения с подсчетом частиц (справочный список максимальных пределов классов 8 и 9 спецификации NSA 307110)

Размер частиц (1) - диапазон размеров, количество микроскопических частиц для самого большого размера по проекции частицы, измеренного в соответствии с AS598 или ISO 4407.

Размер частиц (2) - диапазон размеров, определенный в соответствии с ISO 11171 оптическим или электронным микроскопом с программным обеспечением для анализа изображений, для эквивалентного диаметра проецируемой области частицы.

Значения из (1) и (2) учитываются по-разному.

Можно выполнить подсчет частиц с помощью лазерного анализатора частиц LPA2 в качестве альтернативы описанной процедуры. Использование LPA2 возможно для измерения количества частиц в пределах класса 8.

Выполняемые процедуры:

1. если анализ пробы имеет загрязнение в максимальных пределах, указанных в таблице 8 (не выше значений класса 9), дополнительные действия по ТО не требуются;
2. если уровень загрязнения пробы жидкости превышает значения, указанные в таблице 8 (выше значений класса 9), тогда:

**-** Если загрязнена ТОЛЬКО ОДНА система: при необходимости и если все эксплуатационные испытания органов управления полетом, приведенные для этого случая в регламенте, завершены, можно временно допустить самолет до полетов максимум на два дня или 36 часов полета (что происходит быстрее), чтобы вернуться на основную базу для ТО.

**-** Если загрязнено БОЛЕЕ ОДНОЙ системы: необходимо выполнить одну из следующих процедур: замену или очистку жидкости.

Если результат химического анализа жидкости не соответствует допустимым пределам, то возможны дополнительные временные разрешения на допуск ВС к полетам, которые описаны данными, приведенными в таблице 9.

Таблица 9 - Дополнительные временные разрешения на допуск ВС к полетам по результату химического анализа жидкости

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметры гидравлической жидкости** | **В пределах обслуживания** | **Применение корректирующих действий** | **Толерантность** | **Разрешенные временные рамки** |
| Кислотное число | максимум  1.0 mg KOH/g | немедленно | 1.0 … 3.5mg  KOH/g | смотрите доп. таблицу по ТО |
| Плотность | 970 … 1066 kg/m3 | немедленно | непригодный | меньше, чем 600 FH или 750 FC, что происходит быстрее |
| Содержание воды | рекомендуется 0,5%  максимум 0,8% | немедленно | 0.8% …1.0% | меньше, чем 600 FH или 750 FC, что происходит быстрее |
| Содержание воды | рекомендуется 0,5%  максимум 0,8% | немедленно | 1.0% … 1.5% | 7 календарных дней |
| Вязкость | 6.0 … 12.5 CT | немедленно | При 38 0C:  5.5 … 6.0 CT | 10 календарных дней |

В качестве динамических звеньев при синтезе модульных сетей используются следующие виды:

Дифференцирующее звено:

. (45)

Инерционное звено:

, (46)

. (47)

В случае, если звено имеет несколько входов и (или) выходов, то его моделью в классе ПФ является передаточная функция матричного типа. Элементами этой матрицы являются обычные (скалярные) ПФ вида (45) – (47). При этом число строк матрицы *W(p)* равно числу выходов, а число столбцов матрицы *W(p)* – числу входов данного звена. Для повышения точности применяются многократные вычисления оценок с последующим усреднением.

Случайный входной сигнал *g(t)* может быть естественным, внешним для данного элемента воздействия, действующим в процессе функционирования ВСКД. Однако он может быть и специально сформирован для цели идентификации параметров элементов ВСКД.

Построение моделей образующих с априори неизвестной структурой является наиболее сложной задачей общей, проблемой моделирования динамических систем.

При этом основной проблемой формирования моделей с априори неизвестной структурой в рамках предположения о линейности последней является задача определение порядка исследуемого элемента на основе обработки экспериментальных данных.

Как показывает анализ, одним из наиболее перспективных направлений решения данной проблемы является развитие методов моделирования на основе матриц Ганкеля. Матрицы Ганкеля позволяют по результатам наблюдений (измерений) установить не только порядок системы, но и ее математическую модель в форме уравнения вход-выход или в переменных состояниях. Это позволяет, с одной стороны, при достаточно большом числе данных наблюдений осуществлять сглаживание ошибок измерений, а с другой – своевременно корректировать модель системы по мере изменения ситуации.

Математическая обработка матриц Ганкеля, составленных из результатов измерений выходного сигнала свободной системы, позволяет установить уравнения данной системы. При этом ранг матрицы Ганкеля оказывается равным числу составляющих системы, возбужденных существующими начальными условиями. Связанная система (сеть) отличается от свободной лишь тем, что возбуждается не только начальными значениями переменных состояния, но и внешними воздействиями. Следовательно, если входное воздействие способно возбудить все составляющие данной системы, то, анализируя соответствующую матрицу Ганкеля, можно получить представление о математической модели исследуемой системы.

Для проверки принципа модульных сетей был использован портативный счетчик частиц Icount Laser CM20.

**4.7. Выводы по главе**

На основе современных технологий была успешно решена задача практической реализации системы контроля качества РЖ в рамках упреждающего обслуживания, которая позволяет оценивать состояние РЖ в реальном масштабе времени. Это дало возможность отслеживать процесс ухудшения работы ГС ВС во времени и выявлять функциональные симптомы, проявляющиеся на ранних стадиях отказа.

Полученные с помощью ВСКД результаты позволяют оптимизировать выбор времени контроля состояния РЖ для упреждающего обслуживания ГС ВС, что в свою очередь, позволяет значительно сократить время и стоимость реагирования на проблемы обычного обслуживания (снятие агрегатов, их ремонт, замена изношенного компонента и др.).

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

На основе выполненного диссертационного исследования автором получены следующие основные результаты.

1. Проведен анализ теории и практики оценивания состояния РЖ сложных гидросистем изделий машиностроения в процесс их эксплуатации. Сделан вывод о необходимости разработки системы для оперативного оценивания состояния РЖ, что позволит реализовать на практике упреждающий метод технического обслуживания ГС ВС.

2. На основе предложенного в рамках точного формализма теории синтеза образов нового подхода к описанию состояния РЖ создана универсальная модель описательного языка, учитывающая различные языки подзадач описания изменения параметров и показателей функционирования, характеризующих состояние РЖ ГС ВС, с учетом разнообразия её характеристик.

3. Решена задача распознавания образов состояния РЖ ГС ВС путем определения принадлежности её текущего состояния к заданному множеству значений параметров и показателей для их автоматической идентификации в информационно-измерительных системах, построен интерпретатор, позволяющий решить задачу определения состояния РЖ методом «сравнения с эталоном».

4. С использованием методов теории искусственного интеллекта создана встроенная система контроля и диагностики ГС ВС, реализующая оперативное оценивание состояния РЖ и использующая принцип модульных сетей для отражения основных ее параметров. Данная информационно-измерительная система позволяет на практике реализовать упреждающий метод технического обслуживания гидросистем ВС за счет оценивания состояния РЖ в реальном масштабе времени, что существенно сокращает временные и финансовые затраты на ТО ГС ВС.

# **Список литературы**

1. Сиротин, Н.Н. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / Н.Н. Сиротин, Ю.М. Коровкин. - М.: Машиностроение, 1979. 272 с.

2. Shaoping Wang, Mileta Tomovic, Hong Liu. Commercial aircraft hydraulic systems / Amsterdam: Academic Press, 2015. 276 р.

3. Jiwei Wang. Hydraulic Transmission[M]. China Machinery Industry Press, 2018.

4. Linjun Yang, Xiaofeng Wang. Talk about related accidents caused by AOA caused by two consecutive accidents of 737max-8[J]. Science and Technology Wind, 2019(28):233-245.

5. Mesli-Kesraoui, Ouissem Towards a Model-Based Approach to Support Physical Test Process of Aircraft Hydraulic Systems // Lecture notes in computer science. 2021. Number 12732; pp 33-40.

6. Чиликин А.А., Трушин Н.Н., Сравнительный анализ современных методов диагностики состояния гидравлических систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. вып. 3.

7. Wenguang Zhang, a, GuoMin LIN, Analysis of Aircraft Hydraulic System Failures, Materials Science, Computer and Information Technology, 2014.

8. Berri, Pier Carlo Digital twins for prognostics of electro-hydraulic actuators: novel simplified fluid dynamic models for aerospace valves // IOP conference series. Materials science and engineering. 2022. Volume 1226: Issue 1.

9. Кудерко Д.А., Целищев В.А., Целищев Д.В. Перспективы развития приводов рулевых поверхностей гражданского самолета // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2021. № 67. С. 70-84.

10. Кузнецов В.Е., Хань Н.Д., Лукичев А.Н. Cистема синхронизации сил разнородных рулевых приводов с общим органом управления // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2020. Т. 1. С. 102-106.

11. Rakov V.A. Lightning, the science. part 2: current and electromagnetics // Elektrichestvo. 2021. № 6. рр. 4-11.

12. Ковалев, М.А. Методы и средства контроля и испытания гидросистем летательных аппаратов на основе мониторинга загрязнения рабочей жидкости / М. А. Ковалев // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций [Электронный ресурс] : материалы Всерос. науч.-техн. конф., 10-12 мая 2011 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т) ; [под ред. М. Н. Пиганова]. - 2011. - С. 119-131.

13. Mehmood, Zahid Multiaxial, stress mapping and fatigue failure prediction of aircraft hydraulic pipes // Engineering failure analysis. 2021. Vol 121; рр 14-23.

14. Логвинов Л.М. Встроенный контроль техническрго состояния гидросистем по чистоте рабочих жидкостей при эксплуатации оборудования // Тезисы докл. на ВНТК по проблемам совершенствования технического обслуживания и ремонта оборудования. - Пенза 1990. С. 56-58.

15. Brutto, Cristian A semi‐implicit finite volume scheme for a simplified hydrostatic model for fluid‐structure interaction // International journal for numerical methods in fluids. 2023. Volume 95: Number 1; pp 107-142.

16. Control of capillary driven fluid flows for safe operation of spacecraft fluid supply systems using artificial porous media // Acta astronautica. 2022. Volume 194; pp 544-548.

17. SAE Aerospace Information Report(AIR)[R]. Aerospace-Commerical Aircraft Hydraulic Systems, 2000.

18. Логвинов Л.М. Приборы автоматического контроля загрязнения жидкостей гидросистем летательных аппаратов // Авиационная промышленность. 1984. № 7, с. 34-36.

19. Lovrec, Darko Application Areas of Ionic Hydraulic Fluids // Chemical engineering & technology. 2023. Volume 46: Number 1; pp 14-20.

20. Красная Л.В., Приваленко А.Н., Поплавский И.В., Овдиенко И.В., Бородин Н.В., Зуева В.Д. Разработка метода оценки изменения состояния гидравлических жидкостей в процессе эксплуатации и испытаний с помощью ИК-спектроскопии на примере гидравлической жидкости АСГИМ // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2020. № 11. С. 30-36.

21. Fei Ding. Research on Comprehensive Management Technology of Large Passenger Aircraft Hydraulic System [D]. Zhejiang University, 2010.

22. Аскар К. Современные проблемы гидравлической системы A320 // Вестник Академии гражданской авиации. 2020. № 2 (17). С. 142-145.

23. Dolgov, O. Development of a typical structural diagram of the hydraulic system of short-haul passenger aircraft // Transportation research procedia. 2022. Volume 63; pp. 1639-1659.

24. Капитан A320. Как устроена гидросистема самолета? Часть 1. 13 July 2021.

25. Airbus SAS. 2008 г. Учебное пособие Lufthansa, 2017 г.

26. Ковалёв М.А., Бородкин Г.В., Хабло И.И. Метод построения диагностической модели гидравлических систем летательных аппаратов в аналитическом виде // Вестник СГАУ. - 2011. - №6 (30). - С.107-113.

27. Dong M., He D., Banerjee P., Keller J. Equipment health diagnosis and prognosis using hidden semi-Markov models. Int J Adv Manuf Technol (2006), 30(7–8):738–749.

28. Park M. Fatigue failure of a hydraulic filter head. Eng Fail Anal (2003), 9(4):435–450.

29. Матвеенко, A.M. Проектирование гидравлических систем летательных аппара- тов [Текст] / A.M. Матвеенко, И.И. Зверев. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.

30. Tracked Changes. Hydraulic fluid power. Multi-pass method of evaluating filtration performance of a filter element under cyclic flow conditions. London: British Standards Institution, 2023. 265 р.

31. Алгазин С.Д. О табулировании собственных частот тяжелой жидкости в цилиндрическом сосуде // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 39. С. 50-59.

32. Браженко В.Н., Мочалин Е.В., Цай Ц.Ч. Влияние механических примесей в рабочей жидкости на износ и заедание золотниковых пар гидроприводов авиационной техники // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 6. С. 711-716.

33. Lee JC, Shin HM, Tessmann RK, An investigation of roll-off cleanliness for hydraulic systems and its application to a tractor. Biosyst Eng, (2007), 96(1):19–27.

34. Singh M., Lathkar G.S., Basu S.K. Failure prevention of hydraulic system based on oil contamination. J Inst Eng (India): Series (2012), C 93(3):269–274.

35. Ren-cai Zhang, Xiang Yu, Yun-long Hu, Hong-jiao Zang, Wen Shu, Active control of hydraulic oil contamination to extend the service life of aviation hydraulic system, Int J Adv Manuf Technol (2018) 96:1693–1704.

36. Ремень В.И., Бугаенко В.В., Квенцель А.Л. Гидравлический привод спуско - подъемного устройства // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2021. № 11 (53). С. 89-93.

37. Сафронова Е.И., Митягин В.А., Маньшев Д.А., Поплавский И.В. Прогнозная модель срока смены масла АМГ-10 при его применении в гидравлической системе самолета // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2022. № 4. С. 136-153.

38. Стасюк И.О., Савин В.В. К вопросу о гидравлических сопротивлениях ступеней лопастных насосов // Территория Нефтегаз. 2022. № 11-12. С. 78-86.

39. Труханов К.А. Уравнение движения рабочей среды. многофазные газожидкостные смеси. кавитация и гидраты в приводе. передача информации по гидравлическому каналу связи // Справочник. Инженерный журнал. 2022. № 9. С. 1-24.

40. Rudd, N. Accelerated degradation of aircraft propeller sealing elements in synthetic hydraulic fluid // Paper. 199th Meeting. 2021; pp. 57-66.

41. Hutchison, M. System Integration in Aircraft Environment - Hydraulic Performances through Coupled Simulations // SAE technical paper series. 2020. Section 1: Number 4; pp 89-97.

42. Федоров В.С., Герасимов С.Н., Бутькина М.О., Шаура А.С. Выбор гидравлической рабочей жидкости для условий эксплуатации технологических машин при низких температурах // Механики XXI века. 2021. № 20. С. 44-49.

43. Башта Т.М., Бабанская В.Д., Головко Ю.С. и др. Надежность гидравлических систем воздушных судов / Под ред. Т.М.Башты. М.: Транспорт, 1986.

44. Ковалев М.А. Упреждающее обслуживание гидросистем на основе анализа параметров частиц загрязнения рабочей жидкости. Авиационная и ракетно-космическая техника, 2009. С. 51-56.

45. Чернышев В.Д. Роль гидравлических систем в машиностроении // Научно Исследовательский Центр «Science Discovery». 2022. № 11. С. 114-117.

46. Чжен Х.Ц., Чэнь Ху., Сян Лю., Цзо Ч.Г., Лю Шу.Х. Нестабильности кавитационного течения в канале вентури с учетом термодинамического эффекта // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28. № 4. С. 599-614.

47. Шавалеев Р.Р., Елизаров Д.В., Елизаров В.И. Экспериментальное исследование и моделирование массопереноса в слое насадки «Инжехим-12» при ректификации смеси этанол-вода // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22. № 4. С. 103-106.

48. Шахов Д.С., Михайлов В.П., Базиненков А.М., Жуков М.Е. Вакуумный двух координатный механизм перемещений с электро-реологической регулировкой скорости // Наноиндустрия. 2022. Т. 15. № 2 (112). С. 144-149.

49. Desta Abebe Bekele, Koptev A.N., Koptev K.V. Universal Model for Representing the Problem of Situational Calculation of the Working Fluid State // Components of Scientific and Technological Progress 2022. - № 12 (78). P. 11-16.

50. Husnić, Ž. Aircraft hydraulic axial piston pump fundamental pulsation and simulation / Ž. Husnić // IOP conference series. Materials science and engineering. – 2021. – Vol. 1208. – Iss. 1.

51. Desta Abebe Bekele, Kovalev M.A., Development of a Model of Descriptive Languages for Recognizing the State of the Working Fluid of Aircraft Hydraulic Systems // Components of Scientific and Technological Progress 2022. — № 7 (73). — рр. 11-16.

52. Liu, ChanghuiAn integrated method for variation pattern recognition of BIW OCMM online measurement data // International journal of production research. 2022. Volume 60: Number 6; pp. 1932-1953.

53. Гренандер У. Лекции по теории образов. Том 1. Синтез образов, Пер. с англ. И. Гуревича, Т. Дадашева ; Под ред. Ю. Журавлева. - Москва : Мир, 1979-1983.

54. Pavilidis, T., Structural Pattern Recognition, Springer-Verlag, New York, 1977.

55. Yang, Ming Nonconvex 3D array image data recovery and pattern recognition under tensor framework // Pattern recognition. 2022. Volume 122; рр. 103-112.

56. Карпенко А.С. Логики Лукасевича и простые числа. - М: Москва, издательство “Наука”, 2000. - 317 с.

57. Митягин В.А., Поплавский И.В., Сафронова Е.И. Оценка стабильности рабочих жидкостей на гидравлическом стенде // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2019. № 3 (296). С. 165-173.

58. Ручкин В.Н., Фулин В.А. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы: [учебное пособие]. - СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 238 с.

59. Мендельсон Э. Введение в математическую логику. - М.: Издательство «НАУКА», 1976. 320 с.

60. Такеути Г. Теория доказательств. - М.: Мир, 1978. 412 с.

61. Бенерджи Р. Теория решения задач [Текст]: Подход к созданию искусств. интеллекта / Перевод с англ. С.П. Чеботарева ; Под ред. Ю. В. Буркина. - Москва: Мир, 1972. - 224 с.

62. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. - Санкт-Петербург: Питер, 2001. 384 с.

63. https://www.techtarget.com/whatis/definition/evolutionary-computation.

64. Марка Д.А., МакГоуен К. Методология структурного анализа и проектирования. - М.: МетаТехнология, 1993.

65. Бовшовский С.З., Кунцман В.А., Мурог И.А. Математическое и физическое моделирование теплогидравлического потока рабочей жидкости гидравлического рулевого усилителя // Инновационные научные исследования. 2022. № 11-4 (23). С. 38-52.

66. Дударовская О.Г. Математическая модель турбулентного смешения жидкостей с дисперсной фазой в смесителях насадочного типа // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2019. Т. 4. № 4 (14). С. 36-43.

67. Ермаков С.В., Грачев К.В., Сиухин М.В. Сравнение разных способов моделирования демпфирующего устройства гидравлического цилиндра // Политехнический молодежный журнал. 2022. № 5 (70).

68. Элиенс А. Принципы объектно-ориентированной разработки программ. - М.: Изд. дом «Вильямс», 2002.

69. Демидов А.И., Бобарика И.О., Гусев И.Н. Уравнения связи физических и геометрических параметров произвольной разветвленной гидросистемы в общем виде // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 5 (710). С. 58-66.

70. Yang, Liu Discriminative Transfer Learning for Driving Pattern Recognition in Unlabeled Scenes // IEEE transactions on cybernetics. 2022. Volume 52: Number 3; pp. 1429-1442.

71. Han, H. Proceed From Known to Unknown: Jamming Pattern Recognition Under Open-Set Setting // IEEE wireless communications letters. 2022. Volume 11: Number 4; pp. 693-697.

72. Yang, Ming Nonconvex 3D array image data recovery and pattern recognition under tensor framework // Pattern recognition. 2022. Volume 122; рр 103-112.

73. Хохлова М.Н. Теория эволюционного моделирования, с.6-17.

74. Букатова И.Л. Эволюционное моделирование и его приложения. - МОСКВА 1979, с 36-58.

75. https://www.techtarget.com/whatis/definition/evolutionary-computation.

76. Маньшев Д.А., Сафронова Е.И. Обоснование методического подхода к оценке стабильности эксплуатационных свойств гидравлических жидкостей при применении в военной авиационной технике // Евразийский союз ученых. 2020. № 11-7 (80). С. 40-47.

77. Мякотных А.А., Князькина В.И., Шибанов Д.А. Экспериментальная оценка загрязнения рабочей жидкости трансмиссии на изменение акустического сигнала насоса при его работе // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2020. Т. 1. С. 369-375.

78. Черкасова Т.Г., Ахремкова Ю.С. Метрологическое обеспечение измерений и контроля качества гидравлических жидкостей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 2 (132). С. 25-31.

79. Ning, H. Applications of level set method in computational fluid dynamics: a review // International journal of hydromechatronics. 2023. Volume 6: Issue 1; pp. 1-33.

80. Yang, L. Discriminative Transfer Learning for Driving Pattern Recognition in Unlabeled Scenes // IEEE transactions on cybernetics. 2022. Volume 52: Number 3; pp. 1429-1442.

81. Han, H. Proceed From Known to Unknown: Jamming Pattern Recognition Under Open-Set Setting // IEEE wireless communications letters. 2022. Volume 11: Number 4; pp. 693-697.

82. Liu, Changhui. An integrated method for variation pattern recognition of BIW OCMM online measurement data // International journal of production research. 2022. Volume 60: Number 6; pp. 1932-1953.

83. Yang, Ming Nonconvex 3D array image data recovery and pattern recognition under tensor framework // Pattern recognition. 2022. Volume 122; рр. 103-112.

84. Davies E.R., Matthew A. Turk. San Diego CA. Advanced methods and deep learning in computer vision: Elsevier Academic Press, 2022. 187 р.