

*На правах рукописи*

*Т.Кру-*

**Круглова Татьяна Николаевна**

**МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
СИСТЕМ ПРИВОДОВ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ  
ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**

Специальность 2.5.2 – Машиноведение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Новочеркасск 2024



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время всё более широкое распространение в технических объектах и в технологическом оборудовании транспортного и грузоподъемного машиностроения, приборостроения, медицины, строительства, автомобилестроения, сельского хозяйства и в средствах вооружения приобретают системы взаимосвязанных устройств (приводов) передающих движения одному или нескольким звеньям в составе проектируемых машин и механизмов. К числу основополагающих приводов, формирующих подобные перспективные системы, следует, в первую очередь, отнести электрические, пневматические и гидравлические преобразующие (передаточные) механизмы движения.

Установлено, что различные типы машин и механизмов с параллельной кинематической структурой (МПКС) обладают повышенной точностью программных движений, высокой грузоподъемностью и маневренностью, а также конструктивной гибкостью. Обязательным условием корректного функционирования МПКС является согласованная работа всех исполнительных приводов, что предопределяет необходимость ужесточения требований, предъявляемых к эксплуатационной надежности элементов и узлов МПКС. Частичный отказ в общей системе приводов может стать причиной выхода из строя всего МПКС, а именно, привести к искажению координат местоположения рабочего органа, падению перемещаемого груза, искривлению или разрушению возводимой конструкции, повреждению дополнительных и вспомогательных механизмов и устройств, производственному браку промышленной продукции и другим негативным последствиям, наносящим существенный экономический ущерб эксплуатирующему МПКС предприятию. Поэтому проблема обеспечения эксплуатационной надежности системы исполнительных приводов МПКС исключительно востребована к разрешению. Перспективным вариантом решения данной проблемы является исследование методов оперативной оценки технического состояния приводов машин и механизмов и разработка средств мониторинга, встроенных в исполнительные приводы и осуществляющих измерение, регистрацию и анализ диагностируемых параметров в режиме

реального времени с целью поиска местоположения возникающих дефектов в элементах и узлах системы приводов и оптимизации режимов эксплуатации МПКС. Возможность реализации подобного подхода к решению проблемы обеспечения эксплуатационной надежности исполнительных приводов предопределяется применением современных киберфизических систем, основанных на «бесшовной» интеграции вычислительных ресурсов и физических процессов посредством создания адекватных информационно-технологических моделей процедуры измерения и контроля параметров с использованием стандартных интернет-протоколов постоянного обмена информацией об эксплуатационных параметрах МПКС. Самонастройка режимов функционирования системы исполнительных приводов, и её адаптация к изменяющимся условиям эксплуатации обеспечивается применением структурного моделирования на основе метода операционного интегрального преобразования Лапласа с учетом деградации технического состояния элементов и узлов системы. Таким образом, разработка общей методологии оценки технического состояния систем приводов МПКС с последующей коррекцией режима их эксплуатации весьма актуальна и имеет важное хозяйственное значение.

**Степень разработанности научной проблемы.** Разработкой техники на основе МПКС занимаются крупные компании в Японии (Shimizu, Kajima, Fujita, Fanuc), США (3D Robotics, Construction Robotics, Built Robotics), Китае (Country Garden, Built Robotics), Европе (Kuka, Herrenknecht, Liebherr) и других странах мира. Вопросам синтеза МПКС посвящены работы ведущих мировых ученых X. Kong, В. В. Бушуева, J. Merlet, В. А. Глазунова, J. Angeles, Ф. М. Диментберга, А. И. Корендясева, Е. И. Юревича, А. С. Ющенко, S. Briot, М. З. Коловского, В. Л. Афолина, V. Arakelian, В. М. Герасуна, В. Л. Жавнера, А. Ф. Крайнева, С. Л. Зенкевича, G. Gogu, С. Goselin, А. Ш. Колискова, А. Н. Смоленцева, Б. Л. Саламандры, А. В. Сергеева, И. А. Несмиянова, В. А. Смирнова, П. В. Подзорова, С. В. Хейло, В. Е. Павловского, В. И. Пындака, Л. А. Рыбак, Л. И. Тывеса и многих других. Успешно решены задачи кинематики и динамики МПКС, разработаны различные методы управления их точным программным движением. Полученные результаты позволили значительно расширить сферу применения МПКС, повысить скорость и

точность выполнения разнообразных технологических операций. Установлено, что качество и точность отработки программных движений МПКС напрямую зависят от исправности его исполнительных приводов, однако единая методология оценки технического состояния данного класса механизмов с возможностью адаптации к изменению технического состояния систем приводов в настоящее время отсутствует.

**Научно-техническая гипотеза**, положенная в основу выполнения диссертационной работы, состоит в предположении, что исследование и применение киберфизических систем оценки технического состояния исполнительных приводов предопределяет возможность оптимизации режимов эксплуатации МПКС, а разработка методологии оценки технического состояния системы приводов машин обеспечивает повышение производительности, долговечности и надежности эксплуатации исполнительных механизмов, существенно сократит число отказов оборудования и, тем самым, повысит эффективность работы МПКС.

**Объектом исследования** являются системы приводов машин и механизмов с параллельной кинематической структурой.

**Предмет исследования** – методы оценки технического состояния системы приводов машин и механизмов с параллельной кинематической структурой.

**Цель исследования:** повышение эксплуатационной надежности и эффективности функционирования систем приводов машин и механизмов с параллельной кинематической структурой.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать структуру и принципы действия систем, построенных на основе МПКС, изучить методы оценки текущего и прогнозного технического состояния приводов и исследовать динамические процессы в МПКС.
2. Разработать архитектуру системы мониторинга технического состояния исполнительных приводов МПКС.
3. Исследовать зависимость и закономерности определения текущего и прогнозного технического состояния различных систем исполнительных приводов МПКС в режиме реального времени.

4. Разработать метод оценки текущего и прогнозного технического состояния приводов МПКС.

5. Исследовать методы и средства повышения надежности МПКС и предложить критерии выбора режима их эксплуатации с учетом технического состояния систем исполнительных приводов.

6. Исследовать и разработать метод синтеза отказоустойчивой системы приводов МПКС на основе критериев выбора режима эксплуатации с учетом технического состояния и режима нагружения исполнительных приводов.

7. Исследовать и разработать метод управления МПКС с учетом технического состояния исполнительных приводов.

8. Исследовать принципы структурирования киберфизических систем оценки технического состояния приводов МПКС и разработать рекомендации по проектированию отказоустойчивых МПКС на основе киберфизических систем оценки технического состояния исполнительных приводов.

**Соответствие паспорту специальности** - содержание диссертации соответствует п. 5 «Методы исследования и оценки технического состояния объектов машиностроения, в том числе на основе компьютерного моделирования» паспорта научной специальности 2.5.2 – «Машиноведение» (технические науки).

**Научная новизна результатов исследования:**

1. Сформулированные принципы выбора режима эксплуатации МПКС отличаются введением в расчетные выражения управляющих сил интегральных коэффициентов, учитывающих техническое состояние, текущие и дополнительные нагрузки на приводы системы.

2. Впервые предложенная архитектура системы оценки технического состояния МПКС в режиме реального времени, реализующей сбор и обработку диагностической информации методами и средствами искусственного интеллекта, отличается киберфизическим принципом построения на основе установленной взаимосвязи пяти уровней реализации функциональной структуры средств (Патенты №139162, №112405, №2289802).

3. Впервые предложенный метод оценки технического состояния, реализующий поиск неисправностей и прогнозирования отказа системы приводов МПКС в режиме реального времени, отличается использованием установленной закономерной взаимосвязи коэффициентов вейвлет-преобразования сигналов тока и/или вибрации различных исполнительных приводов с техническим состоянием МПКС и нейросетевой экстраполяции (Патент № 2799489).

4. Разработанный метод проектирования отказоустойчивых МПКС отличается учетом граничных условий статической устойчивости, управляемости, режима нагружения и технического состояния систем исполнительных приводов.

5. Разработанный метод синтеза отказоустойчивых систем приводов отличается определением текущей и дополнительной нагрузок на исполнительные приводы и выбором режима их дальнейшей эксплуатации с учетом критериев оптимизации с применением методов искусственного интеллекта.

6. Усовершенствованный метод управления МПКС отличается учетом технического состояния исполнительных приводов для выполнения заданного закона управления механизмом при изменении внешней нагрузки на приводы системы.

7. Разработанные принципы структурирования киберфизических систем оценки технического состояния исполнительных приводов отличаются наличием двух функциональных уровней, реализующих сбор, обработку и хранение диагностической информации, а также принятие решения по выбору режима эксплуатации МПКС для реализации заданного технологического процесса в зависимости от фактического и прогнозного состояния систем исполнительных приводов.

**Теоретическая значимость.** Теоретическая значимость заключается в разработке методологии оценки технического состояния систем приводов МПКС как совокупности методов, основанных на киберфизических подходах, обеспечивающих: выбор режима эксплуатации МПКС с учетом технического состояния, текущей и дополнительной нагрузки на приводы системы, позволяющий скорректировать режим работы механизма и выполнить заданный закон управления при частичном отказе системы приводов; оценку текущего и прогнозного технического состояния систем приводов МПКС в режиме реального времени; определение текущей и дополнительной

нагрузок при частичном отказе системы приводов МПКС; принятие решения по выбору режима эксплуатации МПКС с частичным отказом в системе исполнительных приводов; управление исполнительными звеньями МПКС с учетом технического состояния систем приводов и внешней нагрузки для обеспечения заданного закона движения механизма.

**Практическая значимость.** Решена важная для развития отечественного машиностроения проблема, направленная на разработку методологии оценки технического состояния с целью повышения эффективности функционирования, совершенствования существующих и создания новых более долговечных и экономичных МПКС. Решение поставленной задачи позволяет: определить техническое состояние систем приводов в процессе эксплуатации без применения сложных громоздких вычислительных средств в режиме реального времени; определить текущую внешнюю нагрузку на исполнительные приводы системы; выполнить совместный анализ технического состояния приводов МПКС, определить дополнительную нагрузку на каждый исправный привод и принять решение о целесообразности изменения режима эксплуатации оборудования; выполнить перераспределение нагрузок, скорректировав значения управляющих сил и скорость движения звеньев при частичном отказе системы приводов МПКС. Применение предложенной методологии позволит повысить коэффициент технического использования оборудования на 16 % и избежать аварийных остановок технологического процесса.

Научно-техническая новизна и практическая значимость достигнутых результатов исследования подтверждена патентами на изобретения и полезные модели.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач использовались современные научные достижения отрасли знаний о методах проектирования систем приводов, кинематического и динамического анализа механизмов, о методах исследования и оценки технического состояния объектов машиностроения, о методах создания машин и механизмов на основе киберфизических эффектов, а также о методах математического анализа, численной оценки и расчета параметров, математического, полунатурного и компьютерного моделирования с учетом общепринятых



допущений в части линеаризации динамических процессов, теории планирования эксперимента и статистической обработки данных. Для научно-практической реализации результатов теоретического исследования объекта диссертационной работы, а также разработанных алгоритмов и программ для ЭВМ применялись современные методы объектно-ориентированного программирования на языках *C*, *C++* и *Java* на базе программных комплексов *Matlab*, и средств автоматизированного проектирования КОМПАС-3D. Экспериментальные исследования, регистрация и обработка данных выполнены на аттестованном испытательном, контрольно-измерительном и информационно-технологическом оборудовании с использованием лицензированных аппаратно-программных комплексов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Сформулированные принципы выбора режима эксплуатации обеспечивают возможность реализации требуемого закона управления МПКС при частичном отказе системы приводов.
2. Архитектура системы оценки технического состояния приводов МПКС на основе киберфизического принципа построения обеспечивает возможность оценки текущего и прогнозного технического состояния с погрешностью не более 10 %, а также принятия решения по выбору режима эксплуатации в реальном времени.
3. Метод оценки технического состояния, основанный на установленной закономерности взаимосвязи между коэффициентами вейвлет-преобразования сигналов тока и/или вибрации и техническим состоянием приводов и нейросетевой экстраполяции, обеспечивает возможность поиска неисправностей с достоверностью до 93% и прогнозирования остаточного ресурса систем приводов МПКС с погрешностью не более 10% в режиме реального времени.
4. Предложенные критерии выбора режима эксплуатации МПКС, содержащие граничные условия по управляемости, статической устойчивости, режиму нагружения и технического состояния, обеспечивают возможность разработки отказоустойчивой системы приводов МПКС.

5. Метод синтеза отказоустойчивых систем приводов обеспечивает возможность выбора режима эксплуатации и перераспределения нагрузок на исполнительные приводы, предопределяя повышение коэффициента технического использования МПКС на 16%.

6. Метод управления МПКС, с учетом технического состояния исполнительных приводов, обеспечивает выполнение требуемого закона управления при частичном отказе системы приводов.

7. Принципы организации двухуровневой киберфизической системы оценки технического состояния исполнительных приводов обеспечивают возможность сбора, обработки и хранения диагностической информации и принятие достоверного решения по выбору режима эксплуатации МПКС в зависимости от фактического и прогнозного состояния исполнительных приводов.

**Достоверность результатов исследования и рекомендаций** основана на корректном использовании математической теории надежности и диагностики технических систем, интеллектуального анализа данных и оптимизации; на экспериментальных исследованиях, выполненных на стендах и опытных образцах в лабораторных и производственных условиях, а также на апробации и обсуждении результатов на национальных, всероссийских и международных конференциях и семинарах, подтверждена экспертизой научных статей в ведущих российских и международных изданиях.

**Апробация и внедрение результатов исследования.** Результаты диссертационных исследований были представлены на: международной научной практической конференции «Современные проблемы строительства: постановка задач и пути их решения (МРС-2022, г. Курск); международных симпозиумах автоматизации и роботизации в строительстве (ISARC 2020, Китаюсю, Япония), (ISARC 2019, Банф, Канада), (ISARC 2018, Берлин, Германия); международных конференциях по инженерным системам (ICES 2020, Москва); международной мультikonференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям (FarEastCon 2019 - 2020, г. Владивосток); 1-й Международной научно-практической конференции «Прорывные технологии и коммуникации в промышленности», 2018 г., г. Волгоград; VI Международной

научной конференции IPICSE-2018, г. Москва; 10-й Международной конференции «Автоматизированный электропривод» (ICERPDS-2018), г. Новочеркасск; конференции «Креативное строительство 2018», 2018 г., Любляна (Словения); Международной научно-технической конференции «Динамика в технических системах (DTS-2017)», г. Ростов-на-Дону; Международных научно-технических конференциях «Пром-Инжиниринг (ICIE)», 2015-2021 г.г., г. Новочеркасск и многих других конференциях.

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении следующих научно-исследовательских работ: государственное задание № 2.2.2.3/9083 «Метод интеллектуального диагностирования технического состояния электрооборудования»; государственное задание № 8.750.2016/ДААД «Метод интеллектуального контроля технического состояния объектов по результатам диагностирования и прогнозирования»; грант РФФИ «мол-а-вед» №183820188 «Разработка и исследование средств интеллектуального моделирования и синтеза траекторий технологических процессов электроэнергетических сетей»; государственное задание № 8.13428.2019/13.2. «Киберфизическая система диагностирования электрических двигателей».

Научно-прикладные результаты диссертационного исследования приняты к практическому использованию следующими предприятиями и организациями: ООО «ПК Новочеркасский электровозостроительный завод» для оценки технического состояния систем приводов электровозов 2(3,4) ЭС5К, 2(3) ЭС4К, 2(3) ЭС5С, НП-1, НПМ2М, ЭП1М, ЭП20; ООО Проектно-техническое бюро «Волгоградгражданстрой» при диагностировании и прогнозировании технического состояния систем приводов строительной техники; ООО «Ассоциация Экотехмониторинг» при проектировании отказоустойчивой машиностроительной техники; ООО "Аграрум-техника" для диагностирования систем гидравлических приводов универсальных сеялок прямого посева VITON-I, VITON-I Plus и VITON-II в процессе эксплуатации; ООО фирма «Пластик Энтерпрайз» для оценки технического состояния систем электрических приводов оборудования химических производств; ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова в учебном процессе для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника».

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы представлено в 127 публикациях, из них – в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и в научных журналах, включенных в международную базу цитирования SCOPUS – 34, в материалах конференций, включенных в базу научного цитирования РИНЦ – 57 статей. Получено 2 патента РФ на изобретения и 2 патента РФ на полезные модели. По теме диссертации опубликована монография.

**Личный вклад в науку.** Научные проблемы и задачи, подлежащие решению в диссертационной работе, а также достигнутые теоретические, прикладные и опытно-внедренческие результаты исследования сформулированы и обоснованы соискателем лично. Информационно-патентные исследования объекта и предмета научной работы, а также структурно-функциональная разработка средств технического оснащения и планов проведения экспериментальных исследований выполнены при непосредственном участии соискателя ученой степени. Соавторы отдельных результатов выполненных научно-практических работ отмечены в ссылках на совместные публикации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа включает введение, 7 глав, заключение, список литературы и 2 приложения, содержит 149 рисунков и 40 таблиц. Объем основного текста диссертации 296 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, описаны объект и предмет исследований. Сформулированы цель и задачи исследования, новизна, теоретическая и практическая значимость работы, применяемые методы решения. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведена степень достоверности полученных результатов, сведения об апробации, основные публикации по результатам работы.

**В первой главе** "Области применения и существующие методы оценки технического состояния систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры" рассмотрены основные сферы применения МПКС и выполнен критический анализ существующих методов оценки технического состояния их систем приводов.

Установлено, что для корректного функционирования МПКС необходимо обеспечить исправную и согласованную работу системы исполнительных приводов с применением непрерывного мониторинга их технического состояния и последующей коррекцией режима эксплуатации оборудования. Реализация данного подхода планируется с применением киберфизических систем, предполагающих синтез методов оценки технического состояния, удовлетворяющих требованиям возможности выявления неисправностей на ранней стадии развития, определения текущей нагрузки на привод при минимальном количестве измеряемых параметров, простоты их измерения и анализа в режиме реального времени. Анализ известных методов оценки текущего технического состояния исполнительных приводов показал их разрозненный характер, сложность измерения и оценки результатов диагностирования, невозможность применения в режиме реального времени. В наибольшей степени сформулированным требованиям удовлетворяют методы диагностирования основанные на исследовании тока (для электроприводов), вибрации и давления (для гидроприводов). Известный метод диагностирования по параметрам тока и/или вибрации основан на Фурье-разложении сигналов и последующем анализе их амплитудно-частотного спектра весьма трудоемок и не предусматривает возможность выделения информации об изменении внешней нагрузки, что может стать причиной ложного диагноза. Поэтому необходимо провести поисковые исследования альтернативных методов анализа тока и/или вибрации приводов, которые позволят определить их техническое состояние и внешнюю нагрузку в режиме реального времени. Анализ существующих методов прогнозирования показал целесообразность применения распознавания образов или статистической классификации, позволяющих отнести исследуемый объект к одному из заданных классов диагнозов. Реализация данного подхода целесообразна с применением нейронных сетей в режиме реального времени.

**Во второй главе** "Динамический анализ и принципы выбора режима эксплуатации механизмов параллельной кинематической структуры при частичном отказе их исполнительных приводов" рассмотрена динамика МПКС двух наиболее распространенных кинематических структур с шестью активными независимыми кинематическими цепями (рисунок 1).

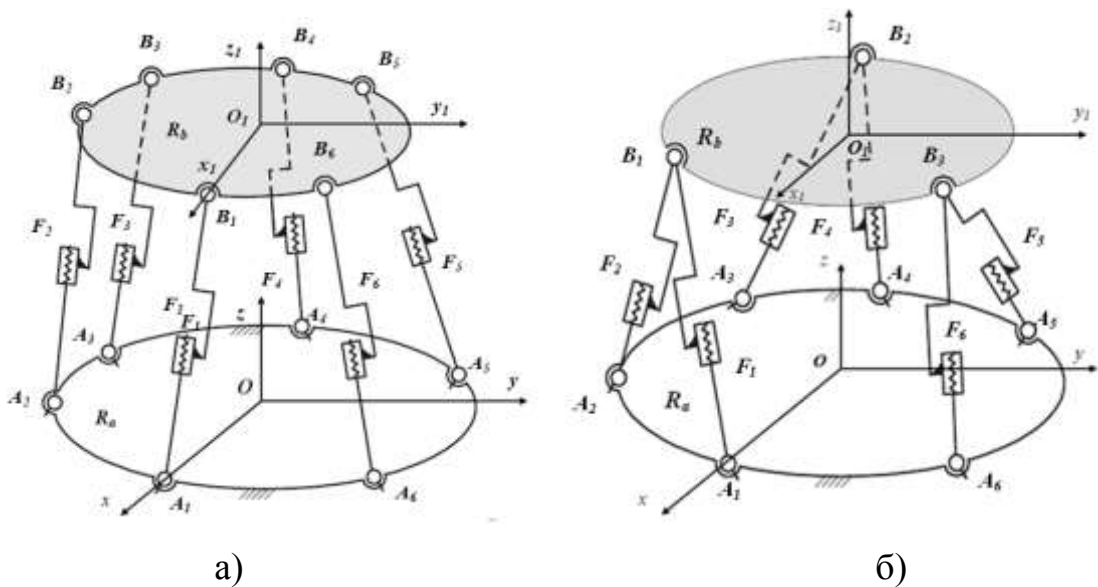


Рисунок 1 – Структура МПКС: а – с параллельными кинематическими цепями;  
б – со сходящимися кинематическими цепями

Для каждой кинематической структуры получена система уравнений Лагранжа второго рода, описывающая взаимосвязь управляющих сил  $F_i$  и обобщенных координат платформы: высоты подъема  $h$  и угла наклона  $\varphi$ .

Управление платформой реализуется путем изменения соответствующих управляющих сил  $F_i = F_{ст} + \Delta F_i$ , где  $F_{ст}$  – статическая сила, позволяющая поддерживать платформу в равновесии при отсутствии движения;  $\Delta F_i$  – динамическая управляющая сила, обеспечивающая перемещение звеньев согласно требуемому закону движения  $u(t)_{зад}$ . При частичном отказе МПКС неисправные приводы не могут перемещать внешнюю нагрузку, а, следовательно, возникает задача ее перераспределения на соседние исправные приводы, то есть для каждого исправного привода необходимо определить скорректированную управляющую силу

$$F_i^* = F_{ст} K_{инт} + \Delta F_i, \quad (1)$$

где  $K_{инт}$  – интегральный коэффициент, учитывающий техническое состояние, текущую и дополнительную нагрузку на привод.

Следовательно, для коррекции режима эксплуатации МПКС при частичном отказе в системе приводов необходимо для каждого исправного привода определить  $K_{инт}$ .

В третьей главе "Принципы построения систем оценки технического состояния приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры" предложена архитектура системы оценки технического состояния исполнительных приводов МПКС (рисунок 2). Система построена по киберфизическому принципу, имеет пять функциональных уровней, выполняющих сбор, обработку и хранение диагностической информации, оценку технического состояния в режиме реального времени, а также необходимые изменения режима эксплуатации МПКС в случае частичного отказа в системе приводов.

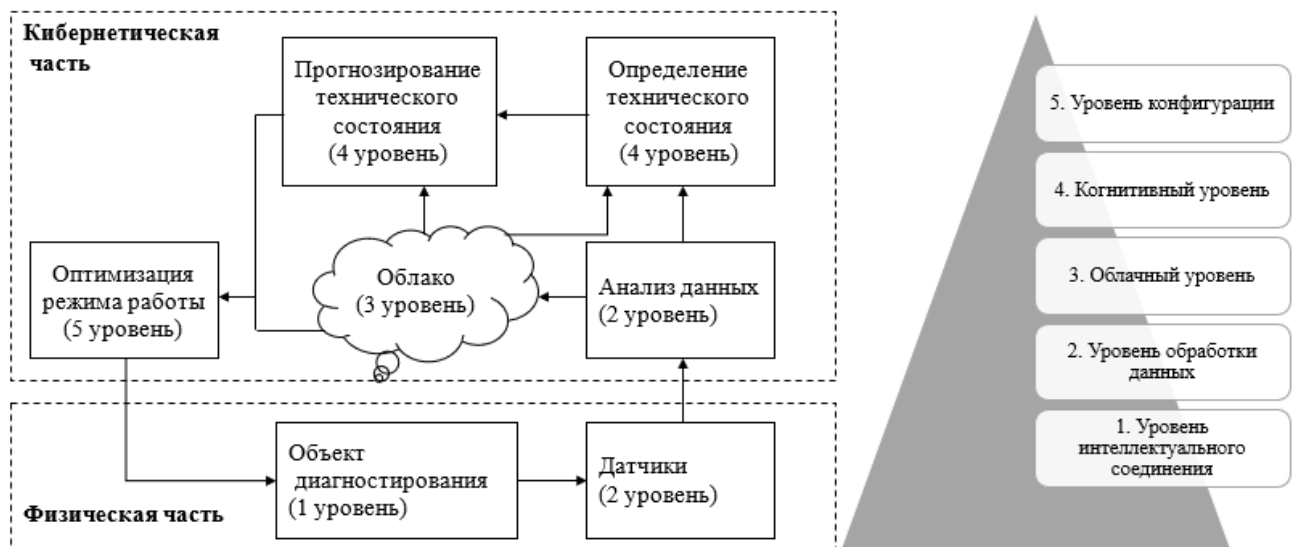


Рисунок 2 – Архитектура системы оценки технического состояния исполнительных приводов МПКС

Все уровни системы функционируют синхронно в режиме реального времени, что существенно ускоряет процесс обработки информации и исключает простои из-за отсутствия ресурсов.

Четвертая глава "Метод оценки технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры" посвящена разработке метода оценки текущего и прогнозного технического состояния систем приводов МПКС по параметрам тока и/или вибрации. Проведена серия поисковых исследований методов анализа данных параметров с помощью вейвлет-преобразования в режиме реального времени для различных типов приводов при различных скоростях вращения и внешних нагрузках. Для каждого привода рассчитаны собственные частоты Фурье-преобразования и найдены соответствующие им характерные масштабы вейвлета.

Измеренные сигналы разложены в рассчитанном диапазоне масштабов и произведен сравнительный анализ полученных графических зависимостей. В результате установлена закономерность (рисунок 3), справедливая для всех основных неисправностей электрических и гидравлических приводов.

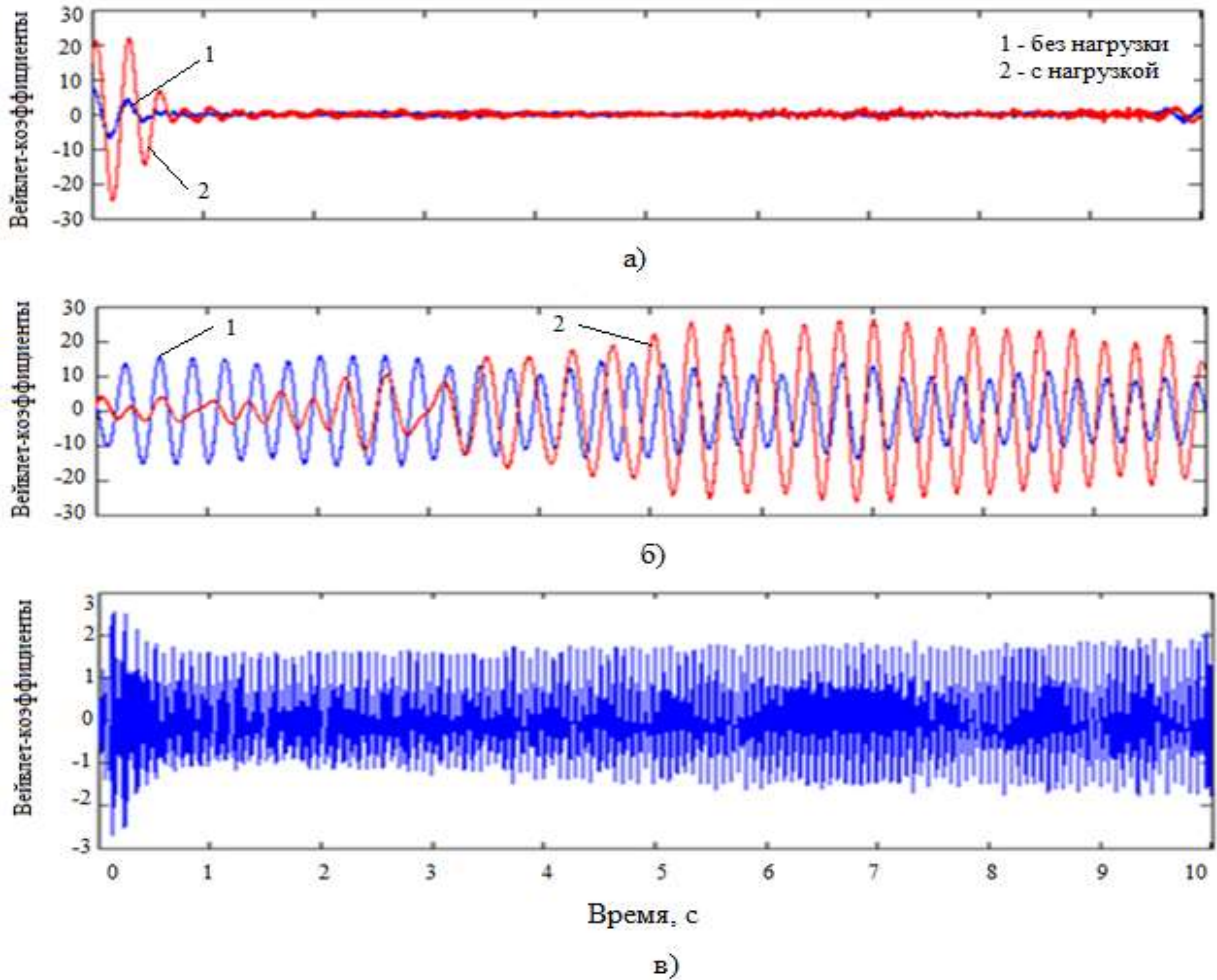


Рисунок 3 – Вейвлет-коэффициенты непрерывного диагностического сигнала:

а – характерный масштаб исправного привода; б – характерный масштаб неисправного привода; в – нехарактерный масштаб

График вейвлет-коэффициентов исправных приводов имеет затухающие колебания (см. рисунок 3, а), неисправного привода – имеет незатухающие колебания, амплитуда которых увеличивается с ростом нагрузки на привод (см. рисунок 3, б). График вейвлет-коэффициентов на нехарактерном масштабе для исправного и неисправного привода идентичен: имеет высокую плотность и малые значения вейвлет-коэффициентов, сигнал является регулярным и полностью повторяется с определенной частотой следования (см. рисунок 3, в).



Для формализации полученной закономерности использовано преобразование Гильберта, позволяющее сформировать из анализируемого сигнала действительной функции времени  $\psi_{ab}(t)$  сигнал  $s(t) = \psi_{ab}(t) + j \cdot \hat{\psi}_{ab}(t)$ , из которого можно найти мгновенную амплитуду (оггибающую сигнала)

$$A(t) = |s(t)| = \sqrt{\psi_{ab}^2(t) + \hat{\psi}_{ab}^2(t)},$$

где  $\hat{\psi}_{ab}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\psi_{ab}(\tau)}{t-\tau} d\tau = \Gamma[\psi_{ab}(t)]$  – аналитически сопряженный сигнал действительной функции  $\psi_{ab}(t)$ .

Поскольку график оггибающей имеет три характерные особенности: является нисходящим, линейным или восходящим, то изменение амплитуды вейвлет-коэффициентов во времени может быть описано полином первой степени:

$$A(t) = k \cdot t + b.$$

Анализ коэффициентов  $k$  и  $b$  показал, что исправному приводу соответствуют значения  $k < 0$  и нисходящая аппроксимирующая прямая. У неисправного привода  $k \geq 0$  и восходящая прямая. Коэффициент  $b$  всегда положителен. Увеличение нагрузки на исправный привод приводит к увеличению коэффициента  $b$  и уменьшению  $k$ . У неисправного привода рост нагрузки приведет к увеличению обоих коэффициентов. Для определения технического состояния привода достаточно определить знак коэффициентов  $k$  на всех характерных масштабах.

В диссертационной работе предложен метод оценки прогнозного технического состояния приводов МПКС с применением нейронных сетей. Процесс прогнозирования имеет иерархическую структуру (рисунок 4) и реализуется на трех уровнях: определение значения коэффициентов  $k$  в следующий период эксплуатации; расчет коэффициентов развития неисправностей  $K_{FAULT_j} = \max(k_i)$ ; определение технического состояния привода в следующий момент эксплуатации  $K_{МОТОР} = \max(K_{FAULT_j})$ .

Для реализации долгосрочного прогнозирования разработана иерархическая нейронная сеть с гибкой обратной связью (см. рисунок 4, пунктирная линия), передающей результат прогнозирования значения коэффициента  $k$  на вход сети первого уровня.

Данная обратная связь активируется только в случае, если спрогнозированное значение  $K_{МОТОР} < 0$ . Результат долгосрочного прогнозирования в формате периода сохранения работоспособности  $T$  позволит оптимизировать режим эксплуатации, избежать внезапного отказа приводов и длительного простоя МПКС.

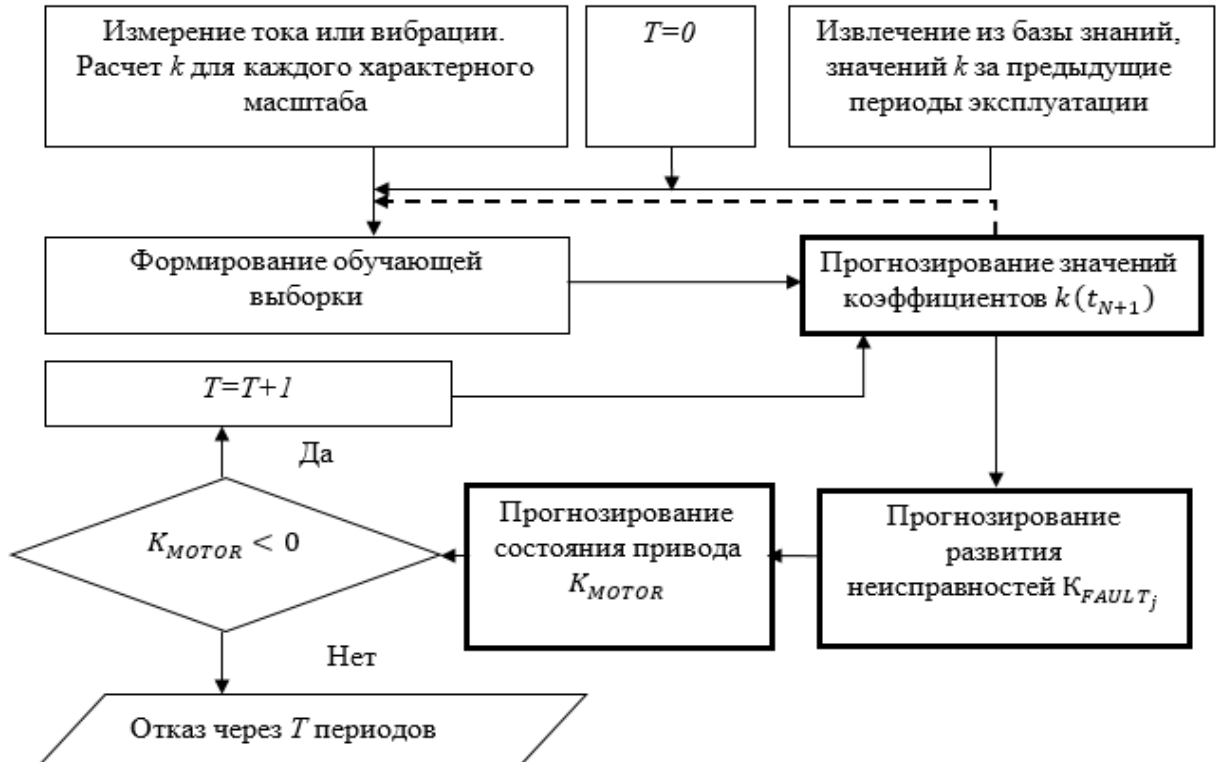


Рисунок 4 – Структура реализации метода долгосрочного прогнозирования технического состояния исполнительных приводов МПКС

**Пятая глава** "Метод синтеза отказоустойчивых машин и механизмов параллельной кинематической структуры" посвящена разработке метода проектирования отказоустойчивых МПКС, обеспечивающих минимизацию разницы между суммарными нагрузками всех приводов и приводов, находящихся в исправном состоянии.

Для повышения надежности МПКС предлагается применять нагрузочное резервирование систем приводов. Количественную оценку изменения надежности целесообразно выполнять с применением комплексного показателя – коэффициента технического использования.

Для двух классических кинематических структур (см. рисунок 1) разработан метод проектирования отказоустойчивых МПКС, предусматривающий введение

целевой функции для выбора режима эксплуатации механизма при частичном отказе в системе исполнительных приводов.

Для МПКС с параллельными кинематическими цепями (см. рисунок 1, а) данная функция имеет вид:

$$\theta = f(\text{Load}_{\text{пр}i}, \Delta\text{Load}_{\text{пр}j}^*) \rightarrow 0 \left\{ \begin{array}{l} n_{\text{кр}}^* < n^* \leq n; \\ u(t) = u(t)_{\text{зад}} | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n]; \\ I_{\text{тек}}(p_{\text{тек}}) \leq I_{\text{max}}(p_{\text{max}}) | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n]; \\ T > 0 | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n], \end{array} \right.$$

где  $n, n^*, n_{\text{кр}}^*$  – проектное, текущее и критическое количество приводов в МПКС;  $I_{\text{тек}}, I_{\text{max}}$  – текущее и максимальное значение тока;  $p_{\text{тек}}, p_{\text{max}}$  – текущее и максимальное значение давления.

МПКС со сходящимися кинематическими цепями (см. рисунок 1, б) имеет большую жесткость, поэтому отказ части приводов не приведет к деформации его звеньев, следовательно, целевая оптимизационная функция примет следующий вид:

$$\theta = f(\text{Load}_{\text{пр}i}, \Delta\text{Load}_{\text{пр}j}^*) \rightarrow 0 \left\{ \begin{array}{l} u(t) = u(t)_{\text{зад}} | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n]; \\ I_{\text{тек}}(p_{\text{тек}}) \leq 0,5 \cdot I_{\text{max}}(p_{\text{max}}) | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n], \\ T > 0 | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n]. \end{array} \right.$$

Введенная целевая функция зависит от текущей  $\text{Load}_{\text{пр}i}$  и дополнительной  $\Delta\text{Load}_{\text{пр}j}^*$  нагрузок на исполнительные приводы и имеет граничные условия по статической устойчивости (для МПКС с параллельными кинематическими цепями), управляемости, режиму нагружения и техническому состоянию систем исполнительных приводов. Для синтеза отказоустойчивых систем приводов МПКС необходимо определить текущую и дополнительную нагрузки на каждый привод системы.

Текущий уровень нагрузки на электропривод определяется с помощью нечеткой логической модели, имеющей два входа и один выход. Исходными данными являются относительные коэффициенты:

$$\Delta k = (k - k_0) \cdot (k_0(K_T - 1))^{-1}; \quad \Delta b = (b - b_0) \cdot (b_0(K_T - 1))^{-1},$$

где  $k_0, b_0$  – коэффициенты прямой, аппроксимирующей огибающие для заведомо исправного ненагруженного привода;  $k, b$  – текущие значения коэффициентов;  $K_T$  – перегрузочная способность привода по току.

Поскольку  $\Delta k \in [0,1]$ ,  $\Delta b \in [0, 1]$ , то для каждого входного параметра на интервале  $[0 1]$  задаются соответствующие функции принадлежности. Выходной параметр  $Load_{пр_i}$  показывает коэффициент нагрузки на привод на интервале  $[0 1]$ . Взаимосвязи между введенными множествами описываются следующими нечеткими правилами:

$$R_1: \text{ если } k \text{ есть } k_0 \text{ и } b \text{ есть } b_0, \text{ то } Load_{пр_i} = l_1;$$

$$R_2: \text{ если } k \text{ есть } k_{max} \text{ и } b \text{ есть } b_{max}, \text{ то } Load_{пр_i} = l_2.$$

Для определения значения выходной переменной используется  $n$  - входной алгоритм нечеткого логического вывода *Takagi – Sugeno*.

Текущая нагрузка гидравлический привод МПКС может быть найдена по формуле

$$Load_{пр_i} = p_{тек} \cdot (p_{max})^{-1}.$$

Если количество исправных приводов МПКС с параллельными кинематическими цепями (см. рисунок 1, а)  $n^* < n$ , то возникает необходимость перераспределения нагрузки, которая может быть выражена из соотношения

$$\Delta Load_{пр_j}^* = \sum_{i=1}^n Load_{пр_i} \cdot (n - n^*) \cdot n^{-1}.$$

В общем случае дополнительная нагрузка на приводы зависит от коэффициента изменения нагрузки  $L_{ch}$ , учитывающего количество и взаимное расположение исправных приводов, определяемого с помощью аппарата нечеткой логики. Для каждого входа на интервале  $[0 1]$  задаются Z- и S- образные функции принадлежности, описывающие техническое состояние каждого привода МПКС таким образом, чтобы исправному состоянию соответствовало значение «1», неисправному – «0». Выходами модели являются искомые  $L_{ch}$  на каждый привод МПКС. Взаимосвязь между введенными множествами записывается в виде базы знаний, фрагмент которой приведен в таблице 1.

Для расчета коэффициента изменения нагрузки на исполнительные приводы МПКС использован алгоритм *Mamdani*. Объединив две разработанные модели, получим модель перераспределения нагрузок на исправные приводы МПКС (см. рисунок 1, а) с учетом их взаимного расположения (рисунок 5).

Таблица 1 – Нечеткая база знаний модели расчета коэффициента дополнительной нагрузки

Номер привода								Коэффициент изменения нагрузки на привод							
1	2	3	4	5	6	...	n	1	2	3	4	5	6	...	n
1	1	1	1	1	1	...	...	0	0	0	0	0	0	...	...
1	0	1	1	1	1	...	...	0.5	0	0.5	0	0	0	...	...
1	0	1	0	1	1	...	...	0.5	0	1	0	0,5	0	...	...
....	.....	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Дополнительной нагрузка на каждый исправный привод МПКС определяется по формуле  $\Delta Load_{прj}^* = L_{chj} \cdot Load_{прi}$ .

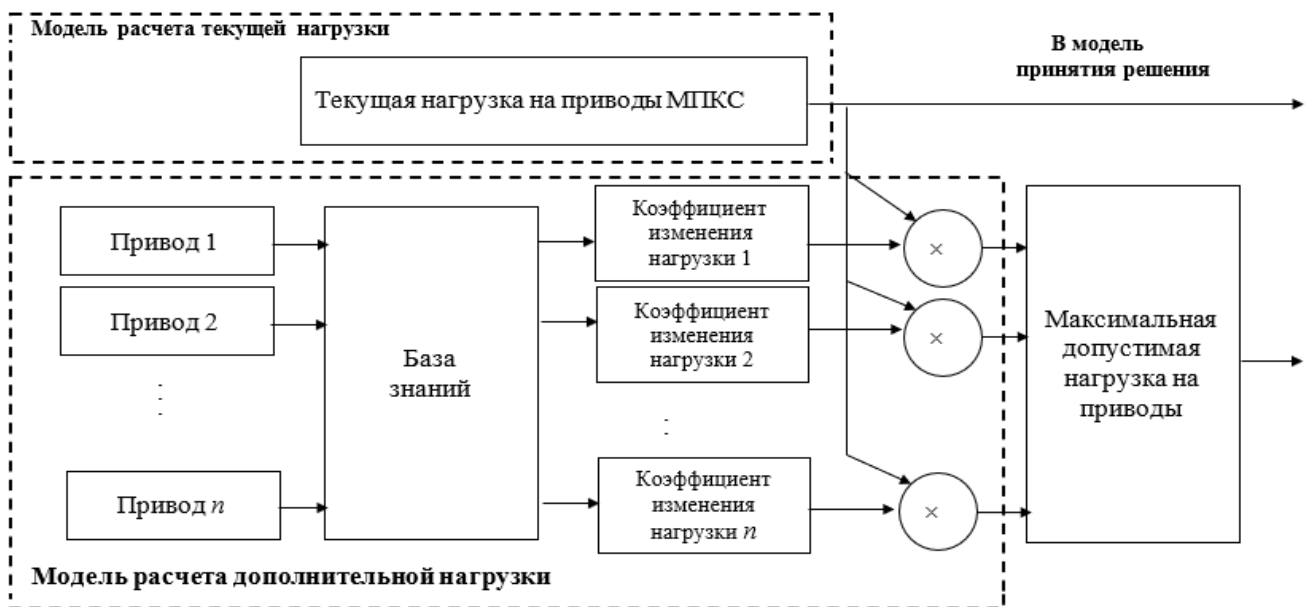


Рисунок 5 – Структура модели перераспределения нагрузок на приводы МПКС с параллельными кинематическими цепями

Перераспределение нагрузки на приводы МПКС со сходящимися кинематическими цепями (см. рисунок 1, б) зависит от места расположения неисправного привода. При отказе одного из приводов кинематических цепей, сходящихся в одном узле, всю его нагрузку должен взять привод другой кинематической цепи, входящей в эту же точку:  $\Delta Load_{прj}^* = Load_{прi}$ .

Для каждой из рассмотренных кинематических структур МПКС (см. рисунок 1) разработаны модели принятия решения по выбору их дальнейшего режима эксплуатации.

Исходными данными для МПКС первой конфигурации являются: средняя текущая нагрузка на приводы МПКС; максимальная дополнительная нагрузка на приводы; минимальный прогнозный срок исправной работы приводов. Нечеткая база знаний, описывающая взаимосвязь между введенными входными терм-множествами и выходом, представлена в таблице 2. Поиск решения выполняется с помощью алгоритма нечеткого логического вывода *Mamdani*.

Таблица 2 – Таблица истинности нечеткой модели принятия решения для МПКС с параллельными кинематическими цепями

Текущая нагрузка на каждый привод	Увеличение нагрузки на привод, %		
	менее 20	30-40	более 50
Прогнозный срок исправной работы 1 месяц			
Менее 30	+1	+1	-1
50	+1	0	-1
Более 60	-1	-1	-1
Прогнозный срок исправной работы 3 месяца			
Менее 30	+1	+1	-1
50	+1	0	-1
Более 60	0	-1	-1
Прогнозный срок исправной работы 6 месяцев и более			
Менее 30	+1	+1	-1
50	+1	+1	-1
Более 60	+1	-1	-1

Структура модели принятия решения для МПКС со сходящимися кинематическими звеньями (см. рисунок 1, б) имеет два функциональных уровня: узел (шарнир) и МПКС в целом (см. рисунок б).

Для первого уровня моделируется нечеткая логическая система *Mamdani*, содержащая два входа (техническое состояние приводов узла) и один выход (выбранный режим эксплуатации узла). Исправному приводу соответствует значение входа «1», неисправному – «0». Выход модели: «-1» – необходимо прекратить эксплуатацию; «0» – эксплуатация в текущем режиме; «1» – необходимо увеличить нагрузку на исправный привод, согласно принятому принципу резервирования, в два раза. Нечеткая база знаний данной подмодели приведена в таблице 3.

Аналогичный расчет выполняется для каждого узла (шарнира) МПКС.



Рисунок 6 – Структура нечеткой модели принятия решения по выбору режима эксплуатации системы приводов МПКС со сходящимися кинематическими цепями

Таблица 3 – База знаний нечеткой подмодели принятия решения о выборе режима эксплуатации приводов узла

Техническое состояние привода в узле		Выбранный режим эксплуатации узла (шарнира)
Привод 1	Привод 2	
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	-1

Выходы полученных подмоделей узлов подаются на вход модели *Mamdani* верхнего уровня, выходом которой является окончательное решение о коррекции режима работы МПКС. Нечеткая база знаний для модели принятия решения верхнего уровня приведена в таблице 4.

Таблица 4 – База знаний нечеткой подмодели принятия решения по выбору режима эксплуатации МПКС со сходящимися кинематическими цепями

Решение по эксплуатации узла				Выбранный режим эксплуатации МПКС
Узел 1	Узел 2	...	Узел n/2	
1	0	...	0	1
-1	1	...	0	-1
0	0	...	0	0

Результат принятия решения для обеих кинематических структур представлен в виде коэффициента  $D \in [-1,1]$ . Если  $D > 0$ , то нагрузку на приводы МПКС

необходимо увеличить на величину дополнительной нагрузки  $\Delta Load_{прj}^*$ , рассчитанной с помощью соответствующей модели. Если  $D = 0$ , то изменение режима работы не требуется, при  $D < 0$  эксплуатацию МПКС необходимо прекратить. На основе сформулированных критериев, моделей определения текущих и дополнительных нагрузок и принятия решения разработаны алгоритмы выбора режима эксплуатации систем приводов МПКС различной кинематической структуры.

В случае принятия положительного решения необходимо выполнить коррекцию режима эксплуатации МПКС, вычислив для каждого исправного привода  $K_{инт}$ , и соответствующие управляющие силы  $F_i^*$  согласно (1). Управление приводами МПКС выполняется отдельно и строится по принципу обратной связи по положению звена. При частичном отказе происходит увеличение момента сопротивления  $M_c$  исправных приводов, а, следовательно, снижение скорости движения звеньев. Разработка системы управления по возмущению позволит исключить снижение скорости ниже допустимого предела и более эффективно реализовать  $u(t)_{зад}$ . Для синтеза регулятора по нагрузке необходимо найти корректирующую функцию  $U_n = f(M_c)$ . Согласно разработанным моделям, перераспределенная нагрузка на каждую  $j$ -ю стойку МПКС  $Load_{прj} = Load_{прi}(1 + L_{chj})$ . Поскольку  $Load_{прi} \sim F_{стi}$ , то

$$K_{инт} = 1 + L_{chj}.$$

Момент сопротивления привода звена МПКС  $M_{c_j}$  зависит от момента сопротивления двигателя  $M_{c\_ном}$ , редуктора и винтовой передачи. Также существенное влияние оказывают углы наклона стоек к горизонтали ( $\gamma_i$ ) и вертикали  $\alpha_i$ . Поэтому при расчете  $M_{c_j}$  необходимо ввести коэффициент увеличения момента сопротивления  $K_{мс} = f(\gamma_i, \alpha_i)$ , зависящего от данных углов:

$$M_{c_j}(L_{chj}) = M_{c\_ном} (1 + L_{chj}) \cdot K_{мс} = M_{c\_ном} \cdot K_{инт} \cdot K_{мс}.$$

Корректирующая функция по моменту нагрузки системы управления скоростью звена МПКС имеет следующий вид:

$$U_n = f(M_{c_j}) = f(L_{chj}) = 1 + K_{пр} \cdot L_{chj}^{-1},$$



где  $K_{пр} = const$  – конструктивный коэффициент, зависящий от параметров привода и проектной скорости звена.

Модернизированная локальная система управления приводом звена МПКС с коррекцией по изменению нагрузки представлена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Модернизированная локальная система управления приводом звена МПКС с коррекцией внешней нагрузки

На каждой винтовой передаче МПКС устанавливается датчик момента сопротивления  $M_{cj}$ , результаты измерения которого поступают в киберфизическую систему, где реализуется оценка технического состояния, текущей и дополнительной нагрузки на каждый привод, а также принятие решения о выборе режима эксплуатации МПКС. При положительном решении для каждого привода рассчитывается корректирующая функция  $U_n$ , значение которой умножается на выходной параметр регулятора положения стойки, корректируя скорость ее движения. При отказе привода или отрицательном решении по оптимизации киберфизическая система подает сигнал на отключение привода.

**В шестой главе** "Принципы структурирования киберфизических систем оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры" разработаны принципы структурирования систем оценки технического состояния приводов МПКС, обеспечивающие измерение текущих значений тока и/или вибрации и их анализ с помощью предложенных методов оценки

технического состояния. Результатом работы системы является определение текущего и прогнозного значения приводов МПКС с указанием возникших неисправностей и/или количества периодов сохранения работоспособности. Разработаны принципы структурирования отказоустойчивой системы приводов МПКС с учетом их технического состояния, реализуемые в блоке «Принятие решения» киберфизической системы. Предложена двухуровневая архитектура киберфизической системы оценки технического состояния приводов МПКС, в которой основную функцию выполняет встроенное программное обеспечение. Реализованы принципы параллелизма и синхронизации, обеспечено минимальное количество переходов между уровнями системы. Основная вычислительная функция располагается на нижнем уровне (приводе), сопряженном с объектом диагностирования. На верхний уровень (системы) передается минимальный объем информации, что позволяет избежать задержек и реализовать принятие решения и изменение режима эксплуатации в режиме реального времени с применением облачного сервиса или персонального компьютера.

**В седьмой главе** "Экспериментальные исследования моделей и методов оценки технического состояния и синтеза отказоустойчивых приводов механизмов параллельной кинематической структуры" выполнено исследование системы оценки технического состояния приводов МПКС в производственных условиях.

Экспериментальный стенд состоит из четырех электромеханических домкратов и наборной деревянной платформы, жестко соединенной со стойками. На домкратах установлены приводы постоянного тока типа KY110AS0415-15B 2008, 2010, 2015 и 2017 годов выпуска, имеющие различные сроки эксплуатации, вращающиеся с частотой 25 об/с. Установка была приведена в пошаговое движение со скоростью 1 см/мин, произведено измерение и анализ тока четырех приводов согласно предложенному методу диагностирования. Установлено, что коэффициенты  $k < 0$  на всех характерных масштабах, следовательно, все приводы исправны. Далее в один из приводов введена искусственная неисправность, выполнен анализ тока данного привода с помощью предложенного метода. Получено, что для масштабов 135, 203, 271, характерных для

неисправностей статора,  $k > 0$ , что свидетельствует о наличии данной неисправности. Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают работоспособность и эффективность предложенного метода диагностирования.

Прогнозирование технического состояния выполнено по результатам ежегодных измерений токового сигнала привода KY110AS0415-15B-D2-2000 в течение восьми лет эксплуатации. Полученные сигналы обработаны с помощью предложенного метода диагностирования, найдены коэффициенты прямой, аппроксимирующей огибающие для каждого масштаба, и рассчитано время наступления неисправности, когда  $k \approx 0$ . Значения  $k$  за первые пять лет поданы на входы нейронной сети и выполнено долгосрочное прогнозирование технического состояния. Сравнительный анализ результатов диагностирования и прогнозирования технического состояния показал, что отказ привода произошел раньше по прогнозу, чем по факту, что позволит не допустить внезапный отказ оборудования. Погрешность прогнозирования на первый период эксплуатации составляет 1,7%, на второй – 2,2%, а на третий, где произошел отказ – 9,3%.

Для анализа текущей нагрузки на приводы произведены измерения и выполнен анализ параметров прямой, аппроксимирующей огибающие коэффициентов вейвлет-преобразования на характерных масштабах для заведомо исправного привода, работающего в номинальном режиме. В качестве эталонных данных использованы результаты первого замера токового сигнала данных приводов при их установке на электромеханические домкраты.

В результате расчета получено, что средняя нагрузка на все приводы примерно одинаковая и составляет 29,52% от максимальной. Задачей эксперимента являлось исследование поведения системы при перераспределении нагрузки на две соседние стойки (рисунок 8).

В результате принятия решения получено, что текущую нагрузку на первый и третий приводы можно увеличить на 14,76%.

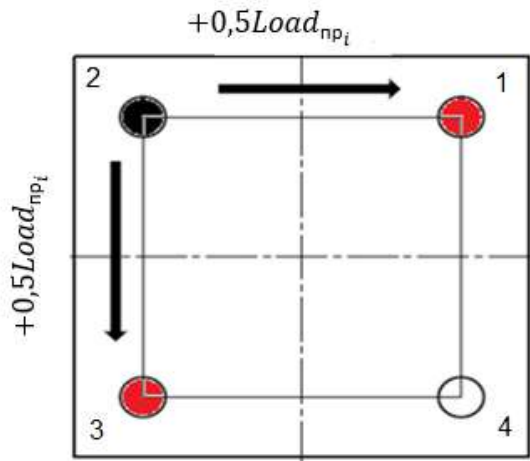


Рисунок 8 – Расположение неисправного привода и возможный вариант коррекции работы МПКС

Анализ механических и электромеханических характеристик приводов показал, что все три выбранные режима эксплуатации являются допустимыми, не приводят к динамическим перегрузкам и преждевременному отказу приводов, что позволяет обеспечить надежное функционирование МПКС при проведении ремонтных работ.

Выполнены экспериментальные исследования метода управления МПКС с учетом технического состояния системы приводов. При использовании существующей локальной системы управления звеном МПКС по положению отключение одного из приводов привело к существенному снижению скорости соседних стоек и наклону платформы на  $3^\circ$  за минуту. Для коррекции скорости движения звеньев МПКС выполнен расчет корректирующей функции  $U_n$  и соответствующее увеличение управляющего напряжения  $U_{пр} = U_9^{пер} \cdot U_n$ . В результате коррекции произошло выравнивание положения платформы и ее равномерный подъем с заданной скоростью, что свидетельствует от работоспособности метода управления.

В диссертационной работе выполнен анализ эффективности и достоверности методов оценки технического состояния. Установлено, что применение методологии оценки технического состояния систем приводов МПКС позволит повысить коэффициент технического использования оборудования на 16%. Достоверность диагностирования не менее 93%, погрешность долгосрочного прогнозирования не превышает 10% и может быть снижена за счет переобучения нейронной сети с добавлением текущих значений диагностических параметров в обучающую выборку. Сформулированы рекомендации по проектированию отказоустойчивых МПКС, предусматривающие разблокировку дефектных стоек и коррекцию режима эксплуатации согласно предложенной методологии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена важная для развития отечественного машиностроения научно-техническая проблема совершенствования систем приводов МПКС, связанная с разработкой, созданием и внедрением в промышленности методологии оценки их технического состояния. Основные результаты и итоги выполненных исследований состоят в следующем:

1. На основе анализа структуры и принципа действия МПКС показана проблема повышения безотказности систем их приводов. Обоснована актуальность разработки методологии оценки технического состояния систем приводов и корректировки режима эксплуатации МПКС в режиме реального времени без применения сложных, громоздких измерительных средств и возможность ее реализации на основе киберфизического принципа построения.

2. Анализ существующих методов оценки технического состояния электрических и гидравлических приводов МПКС показал отсутствие системного подхода и унифицированных методов оценки текущего технического состояния, поиска и локализации возникших дефектов, а также прогнозирования времени и причины отказа. Обоснована необходимость решения проблемы и выбран набор диагностических параметров и методологические подходы.

3. Исследование динамических процессов в МПКС позволили сформулировать принципы выбора режима эксплуатации МПКС при частичном отказе систем приводов, предусматривающие введение в расчетные выражения управляющих сил интегральных коэффициентов, учитывающих техническое состояние, текущие и дополнительные внешние нагрузки.

4. Предложена архитектура системы оценки технического состояния, построенная по киберфизическому принципу, базирующаяся на:

– принципах оценки технического состояния, реализующих анализ сигнала тока и/или вибрации привода с использованием сочетания традиционных математических методов и искусственных нейронных сетей в режиме реального времени;

– принципах построения отказоустойчивой системы приводов МПКС на основе нагрузочного резервирования и интеллектуальной оптимизации режима эксплуатации с учетом текущей и дополнительной нагрузки на каждый привод.

5. Исследованы зависимости и установлена закономерная взаимосвязь между коэффициентами вейвлет-преобразования сигналов тока и/или вибрации на характерных масштабах с техническим состоянием и внешней нагрузкой на привод МПКС стала основой для разработки:

- моделей определения текущего технического состояния, внешней нагрузки и поиска неисправностей приводов МПКС в режиме реального времени;
- моделей краткосрочного и долгосрочного прогнозирования технического состояния и развития дефектов;
- метода оценки технического состояния исполнительных приводов МПКС, реализующего диагностирование с достоверностью не менее 93% и долгосрочное прогнозирование с погрешностью не более 10%.

6. Анализ способов повышения надежности МПКС показал целесообразность применения нагрузочного резервирования систем приводов. Данное заключение позволило:

- сформулировать критерии выбора режима эксплуатации МПКС, учитывающие граничные условия надежности, статической устойчивости, нагрузки и управляемости системы;
- разработать модели оценки текущей и дополнительной нагрузок при частичном отказе системы приводов МПКС;
- разработать модель принятия решения по выбору режима эксплуатации МПКС с частичным отказом систем приводов;
- разработать метод синтеза отказоустойчивых систем приводов, объединяющий модели расчета текущей и дополнительной нагрузок с моделью интеллектуального принятия решения и оптимизации режима эксплуатации МПКС.

7. Предложен метод управления МПКС, обеспечивающий заданный закон движения звеньев механизма при изменении внешней нагрузки вследствие частичного отказа в системе исполнительных приводов.

8. Сформулированы принципы структурирования киберфизических систем, объединяющих предложенные методы оценки технического состояния, синтеза отказоустойчивой системы приводов и управления МПКС в единую методологию оценки технического состояния систем приводов МПКС. Разработаны рекомендации по проектированию отказоустойчивых МПКС на основе киберфизических систем оценки технического состояния исполнительных приводов.

9. Проведенные экспериментальные исследования показали:

– адекватность предложенных моделей оценки технического состояния, точность определения текущего и прогнозного состояния привода, а также поиска возникших неисправностей составляет не менее 90%;

– адекватность предложенных моделей расчета текущей и дополнительной нагрузок, а также выбора режима эксплуатации МПКС различной кинематической структуры при частичном отказе в системе исполнительных приводов;

– введенная корректирующая функция обеспечивает заданную скорость перемещения при изменении внешней нагрузки на сервоприводы МПКС при их частичном отказе.

10. Внедрение методологии оценки технического состояния систем приводов МПКС повышает коэффициент технического использования оборудования на 16% за счет применения высокоточных методов диагностирования и прогнозирования в режиме реального времени.

Таким образом, на основе современных научных достижений отрасли знаний, а также методов проектирования систем приводов, кинематического и динамического анализа механизмов, исследования и оценки технического состояния объектов машиностроения, создания машин и механизмов на основе киберфизических эффектов, математического анализа, численной оценки и расчета параметров, математического, полунатурного и компьютерного моделирования, теории планирования эксперимента и статистической обработки данных разработан комплексный подход, направленный на совершенствование существующих и создание новых отказоустойчивых систем приводов МПКС.

Внедрение результатов работы в производство позволило получить годовой экономический эффект от 0,9 до 1,5 млн. рублей для каждого предприятия за счёт повышения экономичности и долговечности эксплуатации системы приводов. Наряду с этим снизились затраты времени на поиск и устранение неисправности на 20%.

Дальнейшим развитием тематики научного направления является создание и исследование промышленных образцов и серийного производства отказоустойчивых систем приводов для МПКС, эксплуатируемых в тяжёлых аварийно-опасных условиях, включая задачи разработки специализированных модулей оценки технического состояния приводов конкретных видов и образцов техники.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в Перечень ВАК**

1. **Круглова, Т. Н.** Динамика механизмов параллельной кинематической структуры при частичном отказе их исполнительных приводов / Т. Н. Круглова. – Текст: непосредственный // Изв. вузов. Сев. - Кавк. регион. Техн. науки. – 2022. – №3. – С. 64 – 70. – К2.
2. **Круглова, Т. Н.** Долгосрочное прогнозирование технического состояния систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры / Т. Н. Круглова. – Текст: непосредственный // Изв. Тульского гос. ун-та. Техн. науки. – 2022. – №3 – С. 28–33. – К2.
3. **Круглова, Т. Н.** Метод технического диагностирования электрических приводов механизмов параллельной кинематической структуры / Т. Н. Круглова. – Текст: непосредственный // Изв. вузов. Сев.- Кавк. регион. Техн. науки. – 2021. – №3. – С. 35–40. – К2.
4. **Круглова, Т. Н.** Метод оценки текущей и дополнительной нагрузки на систему электрических приводов механизмов параллельной кинематической структуры / Т. Н. Круглова. – Текст: непосредственный // Advanced Engineering Research. – 2021. – Т. 21. – № 3. – С. 268–274. – К1.
5. **Круглова, Т. Н.** Принципы проектирования отказоустойчивых систем гидравлических приводов механизмов параллельной кинематической структуры /



Т. Н. Круглова. – Текст: непосредственный // Изв. Тульского гос. ун-та. Техн. науки. – 2021. – №9 – С. 412–416. – К2.

6. **Круглова, Т. Н.** Принципы организации киберфизического взаимодействия систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры / Т. Н. Круглова – Текст: непосредственный // Изв. вузов. Сев. - Кавк. регион. Техн. науки. – 2021. – № 4. – С37–42. – К2.

7. **Круглова, Т. Н.** Техническое обслуживание технологических машин на базе цифровизации / А. К. Тугенгольд, Н. Р. Волошин, А. Р. Юсупов, Т. Н. Круглова. – Текст: непосредственный // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 19, №1. – С. 74–80. – К1.

8. **Круглова, Т. Н.** Оценка эффективности различных методов анализа временных диагностических сигналов / Т. Н. Круглова, Д. Н. Шурыгин, Д. А. Литвин [и др.]. – Текст: непосредственный // Современные наукоемкие технологии. - 2016. - Ч.2. – № 8. – С. 237–241.– К1.

9. **Круглова, Т. Н.** Применение аппарата нечеткой логики для диагностирования высоковольтных мехатронных модулей по результатам анализа электроразрядной активности / Т. Н. Круглова, И. В. Ярошенко. – Текст: непосредственный // Изв. вузов. Сев. – Кавк. регион. Техн. науки. – 2014. – № 3. – С. 7–11. – К2.

10. **Круглова, Т. Н.** Модели и методы диагностирования и прогнозирования технического состояния модулей движения мехатронных систем / Н. А. Глебов, Т. Н. Круглова. – Текст: непосредственный // Изв. вузов. Сев. - Кавк. регион. Техн. науки. – 2013. – № 5. – С. 3–8. – К2.

11. **Круглова, Т. Н.** Диагностирование технического состояния электропривода на основе применения вейвлет преобразования / А. Г. Булгаков, Т. Н. Круглова. – Текст: непосредственный // Бюллетень строительной техники. – 2019. – № 8 (1020). – С. 46 – 50. – К2.

12. **Круглова, Т. Н.** Интеллектуальный метод неразрушающего контроля состояния изоляции обмоток турбогенератора по параметру электроразрядной активности / Т. Н. Круглова, И. В. Ярошенко, Н. Н. Работалов. – Текст: непосредственный // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2018. – № 6 (84). – С. 44 – 49. – К1.

13. **Круглова, Т. Н.** Комплексная диагностика мощных электродвигателей / Т. Н. Круглова, И. В. Ярошенко [и др.]. – Текст: непосредственный // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2016. – №4. – С. 33 - 38. – К3.

14. **Круглова, Т. Н.** Методы и подходы определения технического состояния цифровых электроподстанций / В. И. Дубров, Р. Г. Оганян [и др.]. – Текст: непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9. – С. 16 – 20. – К1.

15. **Круглова, Т. Н.** Интеллектуальный метод диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов, эксплуатируемых в экстремальных условиях / Т. Н. Круглова. – Текст: непосредственный // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 3. – С. 47–51. – К1.

16. **Круглова, Т. Н.** Применение аппарата нечеткой логики и нейронных сетей для управления техническим состоянием модулей движения технологического оборудования / Т. Н. Круглова. –Текст: непосредственный // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2010. – № 8. – С. 28–35. – К2.

**Статьи в изданиях, включенных в базы данных Web of Science и Scopus**

17. **Kruglova, T. N.** Design of a Fault-Tolerant Sliding Formwork Complex/ Т. N. Kruglova. – Текст: непосредственный // Lecture Notes in Mechanical Engineering: Springer, 2022. – Vol. 1. – P. 166–173. – Q4.

18. **Kruglova, T. N.** Mechatronic Sliding Formwork Complex Operating Mode Optimization Using its Servos Technical Condition / A. G. Bulgakov, T. Bock, T. N. Kruglova. – Текст: электронный // Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. –2021. – Dubai. – P. 683–687: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48961626> (дата обращения: 09.08.2022). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

19. **Kruglova, T. N.** Cyber-physical System for Diagnosing and Predicting Technical Condition of Servo-drives of Mechatronic Sliding Complex during Construction of High-rise Monolithic Buildings / A. G. Bulgakov, T. N. Kruglova, T. Bock. – Текст: электронный // 37th International Symposium on Automation and Robotics in

Construction, (ISARC 2020). – 2020. – Kitakyushu, Japan. – P. 339– 346: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46878281> (дата обращения: 09.08.2022). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

20. **Kruglova, T.** Operation Mode Optimization for Monolithic Construction Mechatronic Complex According Technical Condition of its Servos / V. Travush, V. Erofeev, A. Bulgakov, T. Kruglova. – Текст: электронный // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok: IEEE, 2020. – 5 p: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45024142> (дата обращения: 09.08.2022). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

21. **Kruglova, T.** Cyber-physical predictive diagnostics system for servos of mobile construction robots / V. Travush, V. Erofeev, A. Bulgakov, T. Kruglova [и др.]. – Текст: электронный // Journal of Physics: Conference Series – 2020. – Vol. 1687 – № 012014. – 10 p: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45083110> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

22. **Kruglova, T. N.** Ontology of experiment planning for obtaining a probabilistic model of single-phase electricity consumers / V. A. Mokhov, D. V. Shaikhutdinov, T. N. Kruglova [и др.]. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 976 (1): – № 012019: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45049754> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

23. **Kruglova, T. N.** Fuzzy logic and Neural Networks for Insulation Fault Diagnosis in Construction Robots Drives / A. G. Bulgakov, T. N. Kruglova, T. Bock. – Текст: электронный // CCC 2019: Creative Construction Conference 2019. – Budapest, Hungary – 2019. – P. 55 – 60: сайт. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6916571> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Электронная библиотека IEEEExplore.

24. **Kruglova, T.** Cyber-physical System of the Mobile Robot's Optimal Trajectory Planning with taking into account Electric Motors Deterioration / T. Kruglova, I. Schmelev [и др.]. – Текст: электронный // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2019. – Vladivostok:

сайт. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8934193> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Электронная библиотека IEEEExplore.

25. **Kruglova, T.** Intelligent Electro-Pneumatic Module for Industrial Robots / N. Glebov, T. Kruglova, M. Shoshiashvili. – Текст: электронный // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2019. – Vladivostok: сайт. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8934864> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Электронная библиотека IEEEExplore.

26. **Kruglova, T.** Formulation of the Optimization Problem of the Cyber-Physical Diagnosis System Configuration Level for Construction Mobile Robots / A. Bulgakov, T. Kruglova, T. Bock. – Текст: электронный // Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. – 2019. – Banff. – P. 704 – 708: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41633530> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

27. **Kruglova, T. N.** Agent-based approach for analysis of electricity distribution technological processes in power systems / S. S. Kostinskiy, V. A. Mokhov, T. N. Kruglova, [и др.]. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 483. – № 012080: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38665767> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

28. **Kruglova, T. N.** Optimal technological process planning approach based on the state of mechatronic systems / V. A. Mokhov, T. N. Kruglova, [и др.]. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 483: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38665728> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

29. **Kruglova, T.** Synthesis of the AC and DC Drives Fault Diagnosis Method for the Cyber-physical Systems of Building Robots / A. Bulgakov, T. Kruglova, T. Bock. – Текст: электронный // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 251: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38634160> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

30. **Kruglova, T.** Signal-based Intelligent Diagnostic Method for BLDC Motors / T. Kruglova, I. Shmelev [и др.]. – Текст: электронный // 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems. – 2018. – Novocherkassk: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38648050> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

31. **Kruglova, T.** Cyber-Physical System of Intelligent Diagnosis of Generator Winding Insulation / T. Kruglova, I. Yaroshenko, N. Rabotalov. – Текст: электронный // Proceedings – 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018. – 2018. – Moscow: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41709366> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

32. **Kruglova, T.** Cyber-physical System of Diagnosing Electric Drives of Building Robots / A. Bulgakov, T. Kruglova, T. Bock. – Текст: электронный // ISARC 2018 – 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and International AEC/FM Hackathon: The Future of Building Things. – 2018. – Berlin: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35737512> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

33. **Kruglova, T. N.** Intelligent method of Electric drive diagnostic with due Account for its operation mode / A. G. Bulgakov, T. N. Kruglova. – Текст: электронный // Journal of Applied Engineering Science. – 2017. – Vol. 15(4). – P. 426 – 432: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35518806> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU. – Q2.

34. **Kruglova, T.** Intelligent Method for Fault Finding of Electric Drive Based on Wavelet Analysis of its Electrical and Mechanical Parameters / A. Bulgakov, T. Kruglova. – Текст: электронный // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 929-935: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=31068851> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

35. **Kruglova, T.** Artificial Intelligence Method for Electric Drives Mode Operating and Technical Condition Determination / T. Kruglova, A. Bulgakov [и др.]. – Текст:

электронный // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 132: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=31046404> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

36. **Kruglova, T. N.** Smart sensorless prediction diagnosis of electric drives/ T. N. Kruglova, N. A. Glebov, M. E. Shoshiashvili. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87(3): сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=31136071> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

37. **Kruglova, T. N.** Forecasting of the electrical actuators condition using stators current signals / T. N. Kruglova, I. V. Yaroshenko [и др.]. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177(1): сайт. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012140> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

38. **Kruglova, T. N.** Wavelet analysis for fault diagnosis of electrical machines using current signals / T. N. Kruglova. – Текст: электронный // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016.– Proceedings. – 2016. – Chelyabinsk: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=31021455> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

39. **Kruglova, T.** Intelligent Sensorless Fault Diagnosis of Mechatronics Module Wavelet Transformation Based / T. Kruglova, D. Shaykhutdinov, [и др.]. – Текст: электронный // Asian Journal of Information Technology. - 2016. - Vol. 15, Is. 22. - P. 4694 – 4697: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29475042> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

40. **Kruglova, T. N.** Intelligent Diagnosis of the Electrical Equipment Technical Condition / T. N. Kruglova. – Текст: электронный // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 219 – 224: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27088198> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

### Патенты РФ о регистрации авторских прав

41. Патент №2799489 Российская Федерация МПК G01R 31/34, G06F 11/277. Способ определения технического состояния электрических и гидравлических приводов: №2022123058: заявл. 08.09.2022: опубл. 05.07.2023 / Т. Н. Круглова: заявитель ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова. – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.

42. Патент №139162 Российская Федерация МПК G01H15/00. Устройство интеллектуального диагностирования мехатронного объекта: № 2013149912: заявл. 07.11.2013: опубл. 10.04.2014 / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов: заявитель ЮРПТУ (НПИ) имени М. И. Платова. – 7с.: ил. – Текст: непосредственный.

43. Патент №112405 Российская Федерация МПК G01H 17/00, G01M 13/00 Устройство диагностирования и прогнозирования технического состояния модуля движения: № 201128329 заявл. 08.07.2011; опубл. 10.01.2012 / Н. А. Глебов, Т. Н. Круглова: заявитель ЮРГТУ (НПИ). – 10 с.: ил. – Текст: непосредственный.

44. Патент №2289802 Российская Федерация МПКG01M 13/00. Устройство виброакустической диагностики циклически функционирующих объектов: №2005125483: заявл. 10.08.2005: опубл. 20.12.2006 / Н. А. Глебов, Т. Н. Круглова, заявитель ЮРГТУ (НПИ). – 12 с.: ил. – Текст: непосредственный.

### Монография

45. **Круглова, Т. Н.** Диагностирование и прогнозирование технического состояния мехатронных модулей движения технологического оборудования: монография / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2011. – 119 с. – ISBN 978-5-9997-0171-8. – Текст: непосредственный.

**Круглова Татьяна Николаевна**  
**МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**  
**СИСТЕМ ПРИВОДОВ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**  
**ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**

Подписано в печать

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л.. Тираж 100 экз. Заказ.

---

Издательство ЮРГПУ (НПИ)  
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132