

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова»

На правах рукописи



Круглова Татьяна Николаевна

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

Специальность 2.5.2 – Машиноведение

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Шошиашвили Михаил Элгуджевич

Новочеркасск 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	7
Глава 1 Области применения и существующие методы оценки технического состояния систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры	17
1.1 Области применения механизмов параллельной кинематической структуры и актуальность оценки технического состояния системы их приводов	17
1.2 Анализ существующих методов оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры	30
1.2.1 Анализ методов оценки текущего технического состояния электромеханических исполнительных приводов МПКС	30
1.2.2 Анализ методов оценки текущего технического состояния гидравлических приводов МПКС	40
1.2.3 Анализ существующих методов оценки прогнозного технического состояния систем приводов МПКС	44
1.3 Выводы по главе 1	46
Глава 2 Динамический анализ и принципы выбора режима эксплуатации механизмов параллельной кинематической структуры при частичном отказе исполнительных приводов.....	47
2.1 Динамика управляемой платформы механизма параллельной кинематической структуры с независимыми параллельными звеньями	48
2.2 Динамика управляемой платформы МПКС со сходящимися кинематическими цепями.....	55

2.3 Принципы выбора режима эксплуатации механизмов параллельной кинематической структуры при частичном отказе систем приводов	64
2.4 Выводы по главе 2	68
Глава 3 Принципы построения систем оценки технического состояния приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры	69
3.1 Требования, предъявляемые к системам оценки технического состояния приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры	69
3.2 Принципы построения систем оценки технического состояния исполнительных приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры	75
3.3 Принципы построения систем оценки технического состояния машин и механизмов параллельной кинематической структуры.....	80
3.4 Принципы синтеза отказоустойчивых систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры	82
3.5 Принципы построения информационной части системы оценки технического состояния приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры	85
3.6 Выводы по главе 3	90
Глава 4 Метод оценки технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры	91
4.1 Принципы моделирования технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры.....	91
4.2 Метод оценки текущего технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры.....	92
4.2.1 Экспериментальные исследования электрических приводов при различной нагрузке по параметру тока	94

4.2.2 Экспериментальные исследования электрических приводов с неисправностью механических элементов исполнительного оборудования по параметру питающего тока	103
4.2.3 Экспериментальные исследования электрических приводов по вибрации.....	110
4.2.4 Экспериментальные исследования гидравлических приводов по вибрации.....	116
4.3 Модель оценки текущего состояния систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры.....	121
4.4 Метод и алгоритм оценки текущего технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры.....	132
4.5 Принципы прогнозирования технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры.....	134
4.6 Модель и метод прогнозирования технического состояния исполнительных приводов механизмов параллельной кинематической структуры	136
4.7 Выводы по главе 4.....	142
 Глава 5 Метод синтеза отказоустойчивых машин и механизмов параллельной кинематической структуры	 143
5.1 Анализ способов повышения надежности механизмов параллельной кинематической структуры.....	143
5.2 Критерии выбора режима эксплуатации механизмов параллельной кинематической структуры с учетом технического состояния системы приводов.....	151
5.3 Метод синтеза отказоустойчивых систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры	157
5.3.1 Модель и метод расчета текущей нагрузки на приводы МПКС.....	157
5.3.2 Модель и метод определения дополнительной нагрузки на приводы МПКС	160
5.3.3 Выбор режима эксплуатации системы приводов МПКС.....	169

5.4 Метод управления механизмами параллельной кинематической структуры с учетом технического состояния системы исполнительных приводов	183
5.5 Выводы по главе 5	191
Глава 6 Принципы структурирования киберфизических систем оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры	192
6.1 Синтез системы оценки технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры.....	192
6.2 Синтез отказоустойчивой системы приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры	196
6.3 Синтез интеллектуальной системы управления движением механизмов параллельной кинематической структуры при частичном отказе в системе приводов.....	199
6.4 Синтез архитектуры киберфизической системы оценки технического состояния исполнительных приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры.....	201
6.5 Синтез алгоритмов функционирования киберфизической системы оценки технического состояния отказоустойчивых машин и механизмов параллельной кинематической структуры.....	205
6.6 Выводы по главе 6	211
Глава 7 Экспериментальные исследования моделей и методов оценки технического состояния и синтеза отказоустойчивых приводов механизмов параллельной кинематической структуры	212
7.1 Исследование метода оценки технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры.....	213

7.2 Исследование метода синтеза отказоустойчивых систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры.....	223
7.3 Экспериментальные исследования метода управления механизмами параллельной кинематической структуры при частичном отказе системы исполнительных приводов	232
7.4 Анализ эффективности применения методологии оценки технического состояния отказоустойчивой системы приводов механизмов параллельной кинематической структуры	237
7.5 Рекомендации по проектированию отказоустойчивой системы приводов механизмов параллельной кинематической структуры	242
7.6 Выводы по главе 7	249
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	251
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	255
Приложение А. Программные модули киберфизической системы оценки технического состояния отказоустойчивой системы приводов механизмов параллельной кинематической структуры	297
Приложение Б. Акты внедрения результатов диссертационного исследования.....	312

Введение

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 опе-

ративной 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 способа 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. Корендяева, Е. И. Юревича, А. С. Ющенко, S. Briot, М. З. Коловского, В. Л. Афонина, 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 обработки 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 обеспечит 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, от-

личается 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 методах, 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 предоставляет возможность:

- 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, теории конечных элементов, 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 (MPC-2022, г. Курск); международных симпозиумах автоматизации и роботизации в строительстве (ISARC 2020, Китакусю, 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» (ICEPDS-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.

Глава 1 Области применения и существующие методы оценки технического состояния систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры

1.1 Области применения механизмов параллельной кинематической структуры и актуальность оценки технического состояния системы их приводов

При выполнении технологических операций в различных отраслях промышленности возникает необходимость монтажа (демонтажа), подъема, крепления и перемещения грузов, ремонта, погрузки (разгрузки) тяжелых крупногабаритных предметов. Для решения этих задач разработаны и широко используются различные виды грузоподъемных механизмов, выбор которых осуществляется в зависимости от конкретного технологического процесса, требуемой грузоподъемности, высоты подъема и направления перемещения транспортируемого объекта. С конструктивной точки зрения все подъемные механизмы можно разделить на оборудование, находящееся над грузом или под грузом.

К первому классу относятся монтажные блоки (см. рисунок 1.1, а), лебедки (см. рисунок 1.1, б), тали (см. рисунок 1.1, в), а также различные конструкции подъемных кранов (см. рисунок 1.2.).

В состав монтажного блока (см. рисунок 1.1, а) входят колесо со шкивом и трос. Данные механизмы могут использоваться как самостоятельно, так и в качестве части более сложных подъемных систем (тельферов, талей). Широко применяются полиспасты – система из нескольких тросов и шкивов, функционирующая как рычажный механизм, грузоподъемность которого зависит от материала используемого троса. Лебедки (см. рисунок 1.1, б) широко применяются в строительной и производственной сфере, а также в быту при подъеме или подтягивании грузов. Лебедки могут быть ручные и электрические (см. таблица 1.1).

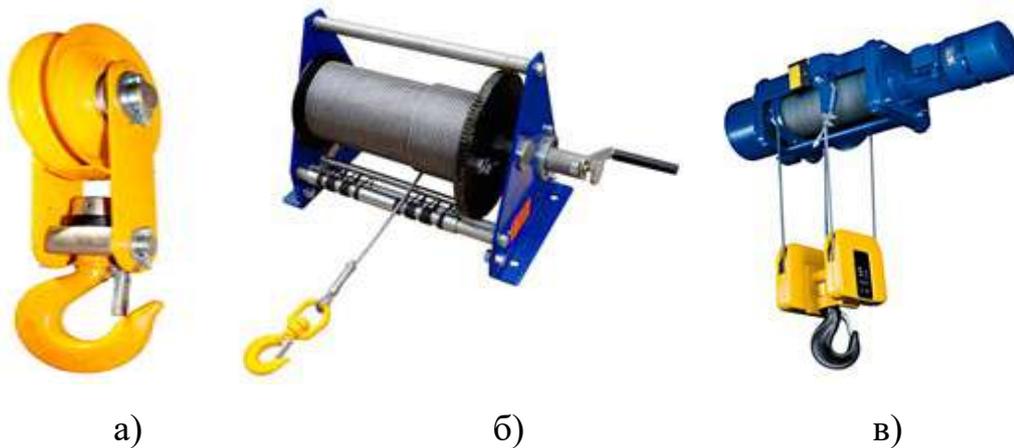


Рисунок 1.1 – Виды грузоподъемного подвешного оборудования

Таблица 1.1 – Классификация лебедок

Тип лебедки	Конструктивные особенности
Барабанные	Груз перемещается с помощью троса, намотанного на лебедку. Высота подъема ограничена длиной веревки
Рычажные	Перемещение груза с помощью рычага-рукоятки. Отсутствие ограничений по высоте подъема, компактность
Червячные	Роль барабана выполняет «винт Архимеда»
Электрические (тельферы)	Любой вид механической лебедки с электроприводом предоставляет возможность существенно ускорить подъем
Автомобильные	Стандартные и ATV модели

Ручные и электрические тали (см. рисунок 1.1, в) могут использоваться самостоятельно или в составе других подъемных установок. Ручные варианты талей могут быть шестеренчатыми, барабанными или червячными. Шестеренчатые ручные устройства предназначены для подъема грузов вверх, когда оператор находится внизу в месте фиксации груза. Данный тип талей чаще всего применяется в помещениях со значительной высотой перекрытий. В барабанных таях вращение передается на барабан, к которому прикреплен трос, перемещающий груз. Такой способ подъема предоставляет возможность использовать таль в условиях ограниченного пространства (ямах, колодцах и т. п.). Оснащение талей электрическим приводом предоставит возможность обеспечить более высокую производительность и скорость выполнения работ.

Тельферы – канатные и цепные электрические тали, имеющие стационарное

или передвижное исполнение, применяются самостоятельно или в составе башенных, козловых (см. рисунок 1.2) и мостовых кранов.



Рисунок 1.2 – Башенный и козловой подъемные краны

Существует большое количество разнообразных конструкций кранов (см. таблица 1.2), которые применяются на крупных промышленных предприятиях, масштабных стройках, а также для ремонтных и монтажных работ. Краны могут быть смонтированы на различных платформах, что предоставляет возможность их адаптировать для различных условий эксплуатации и перемещать большие грузы в труднодоступных местах, в том числе при стесненных условиях.

Таблица 1.2 – Классификация подъемных кранов

Тип крана	Конструктивные особенности	Область применения
Пролетные	Козловые, мостовые, кабельные	Полигоны, склады, площадки укрупненной сборки, строительство и т.д.
Консольные	Настенные, передвижные, колонные	Промышленные предприятия различного назначения, строительные площадки, обслуживание инженерных коммуникаций, транспортировка грузов, ремонтные работы и т.д.
Гидравлические	Гаражные	Автомастерские
Портальные		В условиях складов и производственных объектов
Вышки ТУРА		Строительство, ремонт, отделка, монтаж и т.д.

Ко второму классу подъемных установок относятся механизмы, осуществляющие подъем и удержание груза снизу. Самыми простыми и распространенными видами оборудования данного класса являются домкраты с ручным или машинным приводом (см. таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Классификация подъемных домкратов

Тип домкрата	Грузоподъемность	Высота подъема	Конструктивные особенности
Гидравлические	5–200 т	До 0,4 м	Плавный подъем, легкий ход, надежная фиксация
Реечные электрические	Не более 6 т	До 0,6 м	Реечная передача, подъем с земли (пола), выполнение ремонтных и монтажных работ
Винтовые электрические	До 50 т	До 0,4 м	Принцип действия – «винт-гайка». Подставка для удержания объекта в процессе ремонта или строительства

В отличие от рассмотренных выше устройств домкраты располагаются под грузом, что предоставляет возможность исключить необходимость его крепежа в процессе подъема. Системы на основе подъемных домкратов (см. рисунок 1.3) широко применяются в машиностроении, автомобилестроении, а также при выполнении ремонтных и монтажных работ.



Рисунок 1.3 – Подъемники канавные гидравлические домкраты

В случае необходимости подъема и удержания в горизонтальном положении крупногабаритного груза с помощью одного домкрата возникает необходимость применения и согласования работы нескольких одинаковых механизмов (см. рисунки 1.4, 1.5).



Рисунок 1.4 – Подъем вагона с помощью системы электромеханических путевых домкратов



Рисунок 1.5 – Система гидравлических домкратов в строительстве

При проектировании таких подъемных систем важно правильно выбрать количество, грузоподъемность и места установки подъемных домкратов таким образом, чтобы масса груза распределялась примерно равномерно [1, 2]. В случае невы-

полнения данных условий может произойти отказ домкратов и падение груза. Рассмотренная система подъемных домкратов взаимодействует непосредственно с перемещаемым объектом, что существенно ограничивает сферу применения данного способа подъема. В частности, такой метод неприменим для подъема мягких и хрупких грузов, взаимодействие с которыми могут нарушить их целостность [1-3].

Альтернативным методом подъема является установка грузов на специализированную платформу, приводимую в движение системой домкратов. Примером такой платформы является ножничный подъемник (см. рисунок 1.6). Данное мобильное приспособление предоставляет возможность поднимать и перемещать грузы и людей в вертикальной плоскости, что находит широкое применение при погрузочно-разгрузочных, монтажных, строительных, отделочных и других видах перемещений. Подъемник состоит из грузовой площадки, перемещающейся в вертикальном направлении, и опоры, складывающейся крест-накрест [4, 5]. Также в состав конструкции входит устройство, регулирующее высоту подъема, скорость движения платформы, обеспечивающее плавность остановки и аварийное опускание рабочей поверхности, а также защиту системы приводов от их перегрузки [6, 7].



Рисунок 1.6 – Ножничная подъемная платформа

В качестве системы исполнительных приводов ножничного подъемника использован гидравлический привод, включающий насос, а также электрический или дизельный привод. Вертикальное перемещение осуществляется с применением си-

стемы гидроцилиндров и рычагов. Маслостанция подает рабочую жидкость в гидравлические цилиндры, приводя подъемный стол в движение [8]. Существуют стационарные, передвижные и самоходные конструкции, что существенно расширяет сферу их применения. Достоинствами ножничного подъемника являются высокая грузоподъемность, простота монтажа, функциональная надежность, удобство транспортировки, легкость обслуживания и безопасность использования. Однако на эксплуатацию данного типа подъемников существенное влияние оказывает размер и положение груза на подъемной площадке. Номинальная грузоподъемность может быть обеспечена только при равномерном распределении груза по площади платформы. Если груз занимает половину подъемника по длине, то его вес не должен превышать 50 % общей грузоподъемности, а если груз занимает половину площади платформы по ширине, то его вес должен быть не более 33 % общей грузоподъемности [9-11]. В процессе выполнения погрузочно-разгрузочных работ ножничного подъемника необходимо избегать нагрузок на платформу в горизонтальной плоскости, так как они могут стать причиной отказа системы приводов подъемника [12-13].

Другой вариант конструкции подъемной платформы основан на использовании параллельно расположенных стоек с электромеханическими или гидравлическими подъемными домкратами. Такие механизмы нашли широкое применение в различных областях промышленности, например, скользящая опалубка (см. рисунок 1.7), используемая в составе комплекса монолитного строительства [14-16], а также стационарные и мобильные подъемные столы (см. рисунок 1.8).

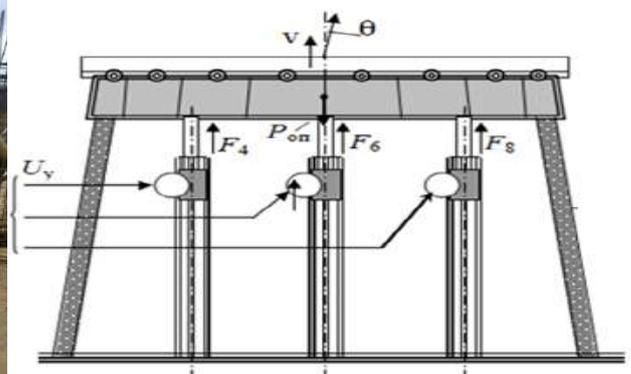


Рисунок 1.7 – Система подъемных домкратов скользящей опалубки

В приведенной конструкции каждая подъемная стойка имеет собственный электрический или гидравлический привод, что существенно повышает ее грузоподъемность. Стойки проектируются на равном расстоянии друг относительно друга, что предоставляет возможность более равномерно распределить нагрузку на них [17].



Рисунок 1.8 – Подъемный стол на основе винтовых домкратов

«Данный тип конструкции относится к механизмам параллельной кинематической структуры, в которых основание и выходное звено связаны двумя и более кинематическими цепями» [18]. «Классическим примером таких структур является платформа Гью-Стюарта, стойки которой закреплены шарнирами, имеющими не менее двух степеней подвижности» [19]. «Изменяя длину стоек с помощью линейных электрических или гидравлических приводов, можно управлять перемещением и ориентацией платформы в пространстве» [19-21]. «Число степеней подвижности платформы определяется количеством управляемых стоек. Наиболее распространены платформы с тремя (трипод) или шестью (гексапод) степенями подвижности (см. рисунок 1.9)» [22]. «Если все стойки платформы перемещаются синхронно с одинаковой скоростью, то она совершает вертикальное перемещение. Если одни стойки удлиняются, а другие укорачиваются, то платформа меняет свою пространственную ориентацию. Число степеней подвижности и максимальный угол наклона зависят от конструктивных параметров платформы» [23].

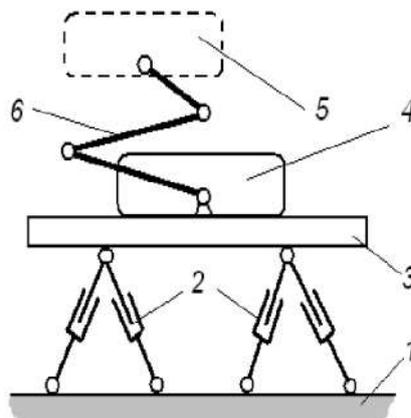


Рисунок 1.9 – Конструкции платформы Гью-Стюарта: а – трипод, б – гексапод

Применение различных модификаций платформы Гью-Стюарта предоставляет возможность не только поднять груз вертикально вверх (см. рисунок 1.10, а), но и переместить его в заданную точку пространства посредством автоматического расчёта координат исполнительного механизма (см. рисунок 1.10, б) [24-28].



а)



- 1 - основание;
- 2 - актуаторы;
- 3 - платформа;
- 4 - груз;
- 5 - требуемое положение груза;
- 6 - измеритель координат

б)

Рисунок 1.10 – Платформа для подъема (а) и позиционирования груза (б)

Механизмы параллельной кинематической структуры – это класс машин, системы приводов которых осуществляют совместное выполнение необходимой тех-

нологической операции. Использование закрытых кинематических схем существенно повышает грузоподъемность, жесткость, точность программных движений и гибкость механизмов, что предопределяет возможность существенного расширения сферы их применения в машиностроении, приборостроении, автомобилестроении, медицине, авиации, станкостроении, сельском хозяйстве и других отраслях промышленности (рисунки 1.11 – 1.15) [10-32].



Рисунок 1.11 – Тренажеры на базе механизмов параллельной кинематической структуры

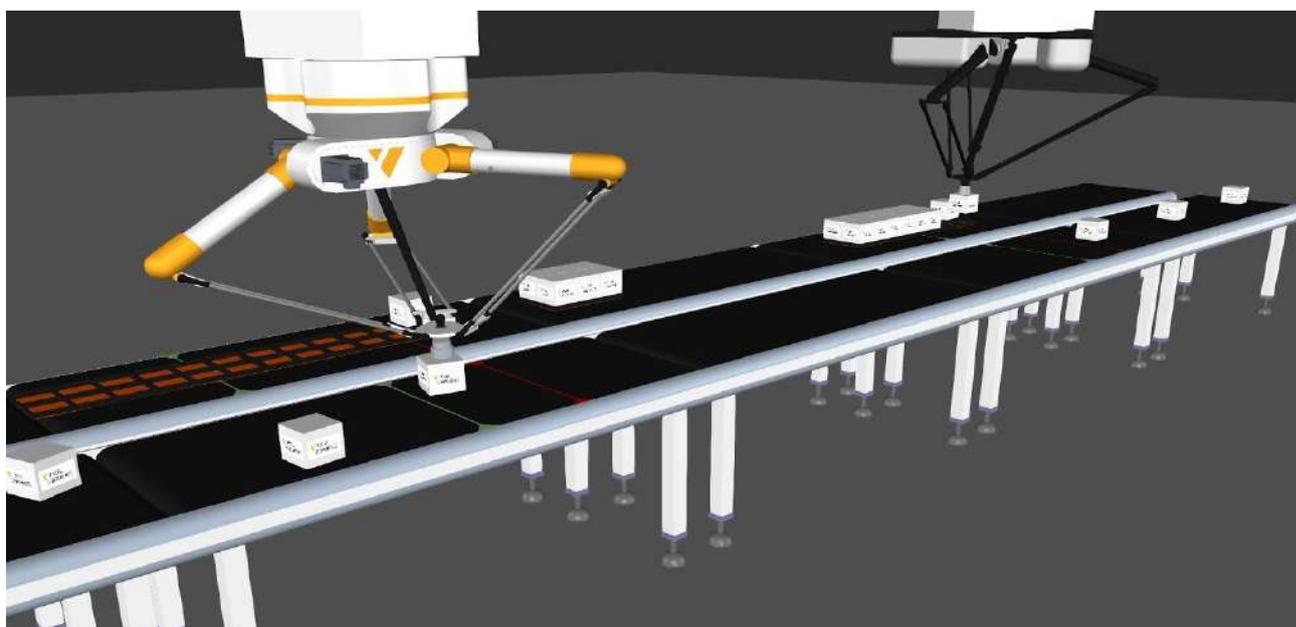


Рисунок 1.12 – Роботы на базе механизмов параллельной кинематической структуры



Рисунок 1.13 – Механизм параллельной структуры в качестве навесного оборудования для сельскохозяйственной техники



Рисунок 1.14 – Станок на базе МПКС



Рисунок 1.15 – Параллельный механизм для измерения координат

Проектированием и исследованием МПКС занимаются значительное число ученых в России и зарубежом. Кинематика и динамика конструкций параллельной кинематической структуры подробно описаны в работах Х. 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. Афонина, V. Arakelian, В. М. Герасуна, В. Л. Жавнера, А. Ф Крайнева, С. Л. Зенкевича, G. Gogu, C. Goselin и др.

Научные работы А. Ш. Колискова, А. Н. Смоленцева, Б. Л. Саламандры, А. В. Сергеева, В. В. Жоги, И. А. Несмиянова, В. А. Смирнова, П. В. Подзорова, В. Е. Павловского, В. И. Пындака, Л. А. Рыбак, Л. И. Тывеса посвящены разработке методов анализа и синтеза МПКС, а также способам управления их точным программным движением.

Проведено большое количество исследований, направленных на повышение эффективности работы МПКС [15-39]. Установлено, что основным условием корректного функционирования данного типа механизмов является исправная, согласованная работа системы их исполнительных приводов [40-43], в случае частичного отказа которых может произойти заклинивание стоек МПКС и, как следствие, падение перемещаемого груза, искривление возводимого здания и/или сооружения, брак в процессе обработки и прочие последствия, наносящие существенный экономический ущерб. В настоящее время задача обеспечения высокой эксплуатационной надежности систем приводов МПКС является весьма актуальной и практически не изученной.

Перспективным способом к решению данной проблемы является управление МПКС с учетом технического состояния исполнительных приводов, что предполагает разработку системы мониторинга технического состояния объекта. Элементы системы должны быть встроены в корпус всех исполнительных приводов МПКС, осуществлять измерение и анализ диагностической информации в режиме реального времени, определять текущее и прогнозное состояние, а также поиск возникших неисправностей и коррекция режима эксплуатации параллельного механизма. Реализовать данный способ предоставит возможность применение киберфизического принципа построения систем, предусматривающего «бесшовную» интеграцию вычислительных ресурсов и физических объектов, предоставляющих возмож-

ность посредством стандартных интернет-протоколов реализовать постоянный обмен информацией о параметрах работы исполнительных приводов для последующей самонастройки и адаптации МПКС к изменению технического состояния его исполнительных приводов. Поэтому разработка методологии оценки технического состояния с последующим выбором режима эксплуатации МПКС весьма актуальна и имеет важное хозяйственное значение.

В процессе разработки методологии 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 возможности повышения надежности МПКС и предложить критерии выбора режима их эксплуатации с учетом технического состояния систем исполнительных приводов.
6. Разработать метод синтеза отказоустойчивой системы приводов МПКС на основе критериев выбора режима эксплуатации с учетом технического состояния и режима нагружения исполнительных приводов.
7. 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.

1.2 Анализ существующих методов оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры

Современные МПКС базируются на использовании электромеханических и гидравлических систем приводов, осуществляющих перемещение стоек платформы. Для решения задач исследования необходимо изучить устройство, принцип действия и известные методы оценки их технического состояния более детально.

1.2.1 Анализ методов оценки текущего технического состояния электромеханических исполнительных приводов МПКС

Большинство систем приводов МПКС работают с применением электрической энергии и основаны на электрических сервоприводах, укомплектованных цифровыми системами регулирования, которые обеспечивают более высокую точность позиционирования платформы, быстрый реверс и высокую производительность системы [44-48]. Электромеханический сервопривод включает датчики положения, скорости или усилия и блок управления приводом для автоматического поддержания эксплуатационных параметров, сравнения текущих показаний датчиков с заданным внешним значением управляемого параметра и осуществляет его необходимую коррекцию по обратной связи [49]. Управляющий блок является сервоусилителем, частотным преобразователем или индивидуальным инвертором в зависимости от конструктивных особенностей конкретной электрической машины. Для обеспечения плавного разгона или торможения, а также предотвращения чрезмерных динамических нагрузок на двигателе используется система управления на базе микроконтроллеров, что существенно повышает точность позиционирования выходного вала и уменьшения нагрузок на привод. Двигатели, используемые в сервоприводе, обладают изоляцией и подшипниками, рассчитанными на более высокую температуру по сравнению с общепромышленными электроприводами [50,

51]. При проектировании МПКС используются сервоприводы постоянного и переменного тока (см. рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – Классификация сервоприводов

Классическая функциональная схема сервопривода МПКС (см. рисунок 1.17) содержит электропривод М, преобразователь ПР, датчик тока ДТ, регуляторы тока РТ, скорости РС, положения РП, а также датчики скорости ДС и угла поворота вала сервопривода ДУ. В структуре электрического сервопривода могут использоваться аналоговые или цифровые электронные компоненты. Изменение скорости может быть вычислено в РП с помощью дифференцирования показаний датчика угла ДУ [51].

Сервоприводы являются синергетическим объединением электропривода, преобразователя, датчиков и регуляторов скорости, тока и положения [52]. Состав сервоприводов может существенно отличаться в зависимости от конкретного конструктивного исполнения и мощности.

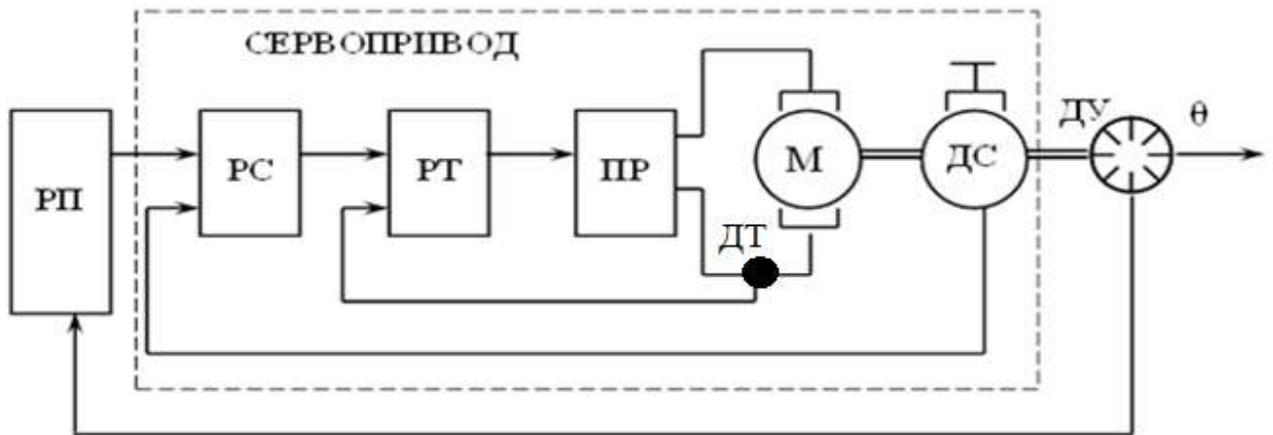


Рисунок 1.17 – Структурная схема сервопривода МПКС

В соответствии с данными, приведенными в таблице 1.4, определено, что сервопривод постоянного тока может использоваться в более мощных приводах с более высоким КПД, по сравнению с аналогичными приводами переменного тока.

Таблица 1.4 – Сравнительный анализ сервоприводов постоянного и переменного тока

Сравниваемая характеристика	Сервопривод постоянного тока	Сервопривод переменного тока
Выходная мощность, Вт	Высокая	От 0.5 до 100
Надежность	Низкая при наличии коммутатора	Высокая
КПД, %	Высокий	На 5 - 20 ниже чем у ДПТ
Срок службы зависит от	Срока службы щетки	Срока службы подшипника
Применение	В мощных приводах	В маломощных приводах

Сервоприводы являются универсальным типом электроприводов и могут быть использованы в исполнительном оборудовании любого вида и различной мощности. При их использовании гарантируется высокая точность, отсутствие механических люфтов и сбоев в электронике, предотвращение износа, теплового расширения, мгновенная индикация неисправностей электроники привода, бесшумная работа и широкий диапазон регулирования частоты вращения [53].

В МПКС наиболее применимы сервоприводы постоянного тока с электронной коммутацией в пыле- и влагозащищенном корпусе или синхронные приводы пере-

менного тока, имеющие более простую схему управления и не требующие дополнительных средств охлаждения [54].

Наличие в составе сервоприводов дополнительных датчиков и системы управления повышает их стоимость и снижает надежность. Наличие электронной составляющей в сервоприводе корректирует параметры электропривода, сглаживая характерные признаки его неисправности, тем самым затрудняя раннее обнаружение дефектов [55]. Таким образом, многие классические методы диагностирования электродвигателей становятся неэффективными для сервоприводов. Поэтому возникает проблема синтеза новых методов технического диагностирования сервоприводов. Для решения указанной проблемы необходимо выполнить критический анализ известных методов оценки технического диагностирования и оценить возможность их применения в киберфизической системе оценки технического состояния.

Теоретические основы и практические результаты по разработке методов и средств технического диагностирования отражены в работах И. А. Биргера, А. В. Мозгалевского, В. В. Ключева, Т. М. Башты, П. С. Давыдова, П. П. Пархоменко, В. А. Зорина, В. А. Жулая, Н. Г. Гринчара, Е. С. Согомояна, Е. Г. Нахапетяна, В. Д. Фельдмана, П. Н. Белянина и многих других ученых [54-83]. Требования к технологиям диагностики и управлению ресурсом сервоприводов при проведении ремонта приведены в [41-43]. В [44] показано, что определение их текущего и прогнозного состояния способствует повышению надежности и эффективности функционирования.

Предполагается, что применение методов определения текущего и прогнозного состояния исполнительных сервоприводов предоставит возможность исключить внезапный их отказ и тем самым существенно повысить коэффициент технического использования МПКС. Для определения текущего состояния сервопривода необходимо выполнить диагностику электропривода, механического устройства (редуктора), датчиков и системы управления, входящих в его состав [76]. Требования к надежности сервоприводов для ответственных объектов приведены в [77].

Классификация методов оценки технического состояния электрических сервоприводов, входящих в состав МПКС, приведена на рисунке 1.18.

Для диагностики электромеханической части сервопривода используются методы функционального диагностирования, предусматривающие анализ технического состояния в процессе эксплуатации [78, 79], в то время как состояние информационно-управляющей части определяется с помощью методов тестового диагностирования [80].



Рисунок 1.18 – Классификация методов и средств технического диагностирования электрических сервоприводов

Основным элементом сервопривода является электропривод постоянного или переменного тока, на долю которого приходится около 78 % отказов сервопривода [84-86]. Статистика отказов серводвигателей приведена в таблице 1.5.

Все неисправности электромеханической части сервопривода имеют электрическое и механическое происхождение. Наиболее распространенными электрическими причинами отказа являются неисправности ротора или статора, вызванные повреждениями изоляции их обмоток.

К распространенным механическим неисправностям относится износ подшипников и валов. Для поиска таких дефектов используются методы функционального диагностирования для выявления одной неисправности, анализа одного параметра и многопараметрические методы диагностирования.

Недостатками методов поиска одной неисправности является невозможность выявления всех известных неисправностей, жесткая привязка к конкретному типу оборудования и необходимость внесения конструктивных изменений в его устройство. Поэтому данные методы не могут быть использованы в составе киберфизической системы определения технического состояния.

Таблица 1.5 – Статистика неисправностей электромеханических приводов

Тип сервопривода	Основные неисправности сервопривода	Статистика повреждений, %
Сервопривод переменного тока	Разряд и искрение в токопроводе	40
	Разряд и искрение в изоляторе, нагрев клеммой коробки	20
	Повреждение изоляции в обмотке статора	15
	Искрение в магнитном сердечнике, нагрев зоны дефекта	10
	Износ подшипников	9
	Повреждение изоляции кабеля	4
	Искрение в обмотке ротора	2
Сервопривод постоянного тока	Дефекты коммутации	15
	Дефекты ротора	48
	Пульсация напряжения питания выпрямителя	12
	Дефекты статора	25

Большая часть методов второй группы основана на контроле параметра вибрации [79-91]. Данные методы предполагают установку датчиков вибрации на корпус электропривода и анализ полученных сигналов с помощью Фурье-преобразования [9]. Данный

тип методов предоставляет возможность по измеренной с помощью акселерометров вибрации электропривода определить характерные частоты для идентификации неисправности электромеханической части сервопривода. Достоинством данного класса методов является возможность выявления конкретных неисправностей сервопривода, исключив наложения автоколебаний системы и проблем в системе управления приводом. Недостатком данного метода является сложность анализа, невозможность его автоматизации, а также направленность только на поиск механических неисправностей системы.

Известны методы технического диагностирования на основе анализа тока электропривода [92-98]. Эти методы определяют возможность выявить неисправности как электрического, так и механического характера без применения сложных измерительных средств, исключив наложение частот автоколебаний системы, погрешностей работы системы управления от неисправностей электропривода [A99]. Существенным недостатком данных методов является сложность амплитудно-частотного анализа токового сигнала, необходимость привлечения специалиста-эксперта и невозможность реализации в рамках киберфизической системы.

Альтернативным моно-методом поиска неисправностей электропривода является контроль их технического состояния по результатам измерения температуры корпуса электропривода (тепловизионный контроль) [100]. Недостатками данного метода является невозможность раннего обнаружения широкого круга дефектов сервопривода, а также необходимость привлечения человека-оператора для измерения и анализа результатов, что не предоставляет возможность использовать данный метод в киберфизической системе диагностирования.

Разработаны методы оценки технического состояния электродвигателей, основанные на исследовании электроразрядных явлений в изоляции обмоток ротора и статора [101], предоставляющие возможность определить повреждения изоляции на стадии их зарождения. Данный класс методов основан на анализе частичного разряда (ЧР). Опыт применения анализа ЧР показывает его высокую эффективность при определении потенциальных дефектов изоляции мощных вращающихся машин [102-108]. Данный метод предоставляет возможность выявить только неисправности

изоляции, требует большого количества дорогостоящего оборудования и привлечения специалиста-эксперта для анализа результатов измерений, не может быть реализован в процессе эксплуатации, а, следовательно, не может быть использован в составе киберфизической системы оценки технического состояния. Проведенное исследование позволило установить взаимосвязь между основными неисправностями электромеханической части сервопривода и проанализированными диагностическими параметрами (см. таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Сравнительный анализ видов и количества диагностических параметров основных функциональных узлов электромеханической части сервоприводов

Неисправности	Ток	Температура	Вибрация	Частичный разряд
Электродвигатель				
Обрыв и/или замыкание одной из фаз обмотки статора	X	X		
Обрыв стержней обмотки ротора	X	X	X	
Двигатель перегружен	X	X	X	
Межвитковые замыкания обмоток статора	X	X		
Межвитковые замыкания обмоток ротора	X	X		
Поврежден подшипник двигателя	X		X	
Повреждение изоляции обмоток	X			X
Редуктор				
Ослабление обтяжки болтов	X		X	
Износ зубчатой передачи и шлицевых соединений	X	X	X	
Износ подшипников	X	X	X	
Износ осей и посадочных мест корпусов	X		X	
Дефекты регулировки и сборки зубчатых передач и подшипников	X	X	X	

Согласно приведенному анализу единственным параметром, предоставляющим возможность выявить все основные неисправности электромеханической части сервопривода, является ток электропривода. Анализ вибрации в большей сте-

пени предназначен для выявления механических дефектов и не предоставляет возможность обнаружить повреждение изоляции и замыкания обмоток электропривода на ранней стадии. Метод ЧР предоставляет возможность определить электромагнитный дефект электропривода, связанный с повреждением изоляции обмоток статора или ротора на ранней стадии и предупредить появление замыканий или обрывов обмоток [А109, А110]. К недостаткам данного метода относятся: невозможность поиска механических неисправностей сервопривода, проблема реализации в процессе функционирования оборудования, сложность измерения и анализа данного параметра. Анализ температуры предоставляет возможность выявить места локального нагрева оборудования, но не предоставляет возможность ранней идентификации и локализации причины отказа. Измерение и анализ данного параметра осуществляется бесконтактным способом оператором, что неприменимо на движущихся объектах, к которым относятся МПКС.

Результаты сравнительного анализа (см. таблица 1.7) рассмотренных моно-методов диагностирования показали, что их большая часть требует использования сложного измерительного оборудования и привлечения эксперта для интерпретации и анализа полученных результатов измерений, не предоставляя возможность определить все неисправности электромеханической части сервопривода и не могут быть реализованы в процессе эксплуатации МПКС.

Наряду с рассмотренными известны методы многопараметрической комплексной диагностики электродвигателей [111-127], предусматривающие совместный анализ нескольких перечисленных выше диагностических параметров. Такие методы широко известны и дают хорошие результаты при диагностировании стационарных электроприводов. Однако, для их реализации необходимо сложное дорогостоящее оборудование, установка которого на подвижные части МПКС может оказать существенное влияние на технологический процесс, что приводит к ограничению их применения для данного класса объектов.

Электронным компонентом сервоприводов МПКС является информационно-управляющее устройство, включающее набор датчиков для измерения текущих параметров оборудования и внешней среды и систему управления сервоприводом.

Таблица 1.7 – Сравнительный анализ моно-методов технического диагностирования сервоприводов

Диагностический параметр	Выявляемые неисправности	Метод анализа	Применяемая аппаратура
Вибрация	Механические параметры	Преобразование Фурье, анализ эксперта	Акселерометр, виброметр, осциллограф
Ток	Механические и электрические параметры	Преобразование Фурье, анализ эксперта	Возможность измерять непосредственно с обмотки привода Осциллограф
Тепловизорный контроль (Температура)	Электрические неисправностей и дефекты подшипников, сопровождающиеся нагревом корпуса	Измерения вручную, анализ с помощью человека-эксперта	Тепловизор, пирометр
Электроразрядная активность (ЧР)	Дефекты электромагнитного происхождения (нарушение изоляции)	Измерения вручную, анализ с помощью человека - эксперта	Специальные датчики и оборудование, осциллограф

Для определения технического состояния данных компонентов осуществляется методами тестового диагностирования [A128] путем сравнения фактического выходного сигнала с эталонным тестовым сигналом. Сравнительный анализ сигналов может быть осуществлен с применением аппарата нечеткой логики или нейронных сетей, предоставляет возможность определить внезапные и постепенные дефекты электронной части сервопривода. Данный класс методов предполагает остановку оборудования и подачу на него тестовых сигналов, поэтому не может быть реализован в процессе функционирования оборудования и неприменим для реализации киберфизического взаимодействия систем приводов МПКС.

Согласно статистике отказов электрических сервоприводов, наиболее уязвимым их элементом является электропривод, доля отказов которого составляет 78 % [126]. Современные сервоприводы укомплектованы системой индикации неисправностей электронной части, предоставляет возможность быстро и точно определить все ее возможные неисправности. В тоже время индикаторный анализ сервопривода не предоставляет возможность спрогнозировать время отказа, а, следовательно, предупредить

его. Поэтому задача разработки методов диагностирования технического состояния сервоприводов МКПС весьма актуальна.

Разрабатываемые методы должны удовлетворять следующим требованиям:

- возможность выявления всех электромеханических неисправностей сервопривода;
- минимальный состав измеряемых параметров;
- отсутствие громоздких дорогостоящих средств измерения;
- простота анализа измеренных диагностических параметров в режиме реального времени;
- возможность поиска неисправностей и определения внешней нагрузки на сервопривод.

Проведенный анализ показывает, что единственным методом диагностирования сервоприводов МКПС, удовлетворяющим большинству приведенных требований, является анализ тока, и предоставляющим возможность выявить как электрические, так и механические неисправности [А129, А130]. Существенный недостаток данного метода – сложность анализа амплитудно-частотного спектра, полученного в результате Фурье-разложения [9]. Поэтому необходимо провести поисковые исследования альтернативных методов анализа токового сигнала, который предоставит возможность быстро и точно идентифицировать текущее состояние сервоприводов МКПС, отличив возникшие неисправности от изменения в режиме работы [А130].

1.2.2 Анализ методов оценки текущего технического состояния гидравлических приводов МКПС

При проектировании МКПС большой грузоподъемности используются гидравлические приводы линейного движения. Такие приводы включают гидронасос, подающий рабочую жидкость в гидроцилиндр, выполняющий поступательное перемещение исполнительного механизма (платформы). Для контроля подачи рабочей жидкости к гидроцилиндру используется гидрораспределитель (см. рисунок 1.19).

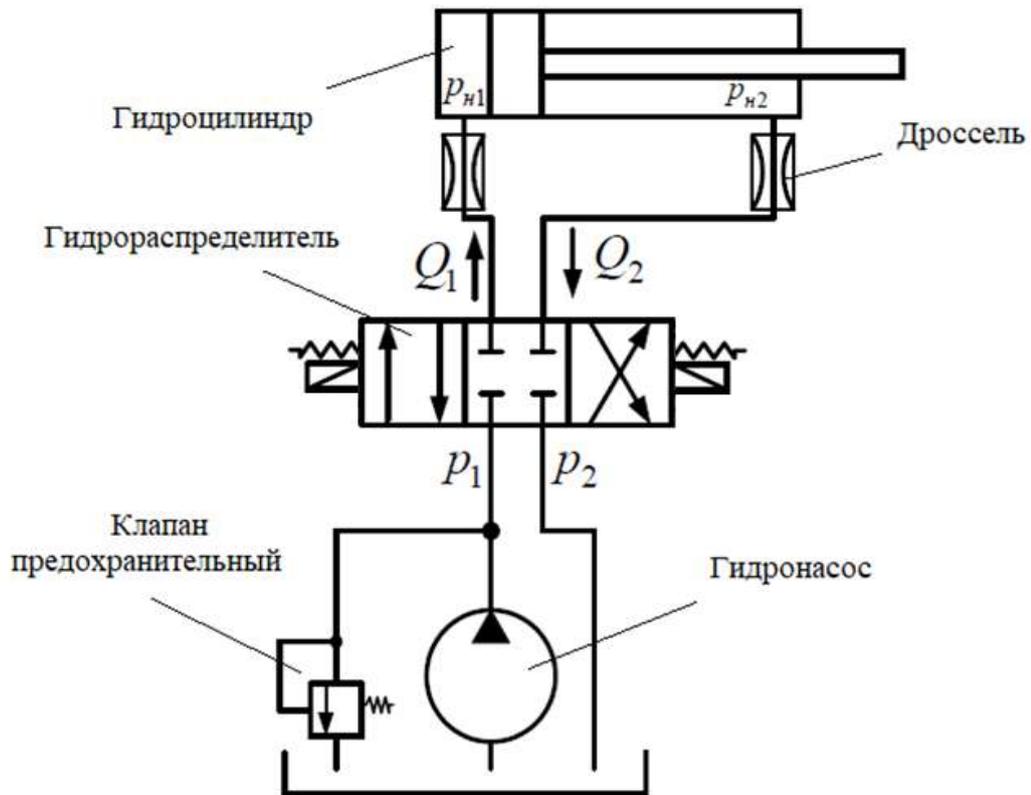


Рисунок 1.19 – Структура гидравлического привода линейного перемещения

Для защиты системы от избыточного давления используется предохранительный клапан, а для настройки сопротивления рабочей жидкости – дроссель. Для поддержания гидропривода МПКС в работоспособном состоянии целесообразно проводить контроль и оценку текущего технического состояния с применением методов диагностирования (см. рисунок 1.20) [131].

Известны три группы методов диагностирования гидроприводов: с помощью встраиваемых или накладных датчиков, а также на основе анализа качества рабочей жидкости.

Согласно критериям выбора методов оценки технического состояния, сформулированным в параграфе 1.2.1, необходимо использовать методы функционального диагностирования гидравлических приводов, функционирующие в режиме реального времени в процессе эксплуатации оборудования. Методы диагностирования на основе анализа рабочей жидкости не удовлетворяют данному требованию, поэтому не будут использоваться для диагностирования приводов МПКС.



Рисунок 1.20 – Методы технического диагностирования гидроприводов МПКС

Наиболее распространённым методом оценки технического состояния гидроприводов является статопараметрический. Данный метод основан на измерении и анализе основных параметров функционирования гидропривода: давление, подача и расход рабочей жидкости в установившемся режиме [131-132]. В процессе диагностирования вычисляется объемный КПД гидрооборудования, изменение которого показывает текущее техническое состояние и развитие дефектов каждого элемента гидросистемы со времени [133, А134-А136]. Преимуществом данного метода является его высокая точность, недостатком – трудоемкость реализации и необходимость монтажа дополнительных датчиков (манометры, расходомеры) внутри гидролиний.

Альтернативным методом диагностирования гидропривода является анализ амплитудно-фазных параметров (пульсаций давления). Метод предоставляет возможность определить состояние качающих узлов аксиально-поршневого насоса с помощью анализа осциллограммы пульсации давления в его напорной магистрали,

что предоставляет возможность определить общее техническое состояние без возможности исследования уровня износа отдельных элементов [А137].

При диагностировании гидроприводов широко применяются методы с использованием накладных датчиков.

Известен и широко применяется временной метод (временных интервалов), реализующий контроль параметров движения исполнительных элементов гидросистемы при нормируемой внешней нагрузке. Оценка технического состояния гидропривода осуществляется по результатам анализа времени выполнения рабочих операций. Достоинством данного метода является простота его реализации, недостатком – невозможность определения точного места и причины неисправности [138-140].

Известен силовой метод диагностирования гидросистем, основанный на определении усилия исполнительного механизма (гидроцилиндра). Достоинство – возможность интегральной оценки состояния всего гидропривода в целом, недостаток – невысокая точность, а также невозможность использования в процессе эксплуатации МПКС при ненормированных внешних нагрузках [141].

Одним из наиболее универсальных методов анализа технического состояния гидроприводов МПКС является виброакустическая диагностика, основанная на анализе параметров вибрации и акустического шума [142]. Данный метод используется, в основном, для гидроагрегатов с циклическими рабочими процессами, например, насосы. Достоинство метода – возможность неразрушающей оценки технического состояния и поиска неисправностей гидропривода в процессе эксплуатации, недостаток – сложность анализа измерительной информации.

Также известен тепловой (термодинамический) метод, основанный на контроле разницы температур на входе и выходе гидравлических элементов, предоставляющий возможность выявить дефектный узел, но требующий для реализации сложного высокоточного дорогостоящего оборудования [143].

Еще один метод диагностики гидроприводов – анализ переходных характеристик (волновой метод), предполагает исследование диаграмм изменения давления на различных участках гидравлической схемы после окончания переходных процессов.

Производится запись текущей ударной диаграммы гидросистемы и ее сравнение с эталонной. Метод обладает высокой точностью оценки состояния гидравлической схемы, но не может быть использован в процессе эксплуатации гидропривода.

Проведенный анализ существующих методов диагностики гидроприводов показывает, что наиболее перспективными с позиции применения для киберфизической системы оценки технического состояния приводов являются статопараметрический и виброакустический. Общую оценку состояния элементов гидравлической схемы и контроль утечек целесообразно выполнять путем контроля давления, что предполагает установку соответствующих датчиков в гидросистеме и анализ результатов измерений с помощью общепринятой методики [144] без доработок. Оценка технического состояния гидронасоса целесообразно выполнять по параметрам его вибрации. Для этого необходимо установить на его корпус датчики вибрации в трех ортогональных направлениях [145-150]. Существенным недостатком данного метода является сложность анализа результатов измерения. Поэтому необходимо разработать метод анализа вибрации гидронасоса, предоставляющий возможность оценить его текущее состояние и определить все его неисправности в процессе эксплуатации в режиме реального времени исключительно с помощью программных средств.

Анализ параметра вибрации предоставляет возможность выявить все основные неисправности гидронасоса, но не предоставляет возможность определить нагрузку на привод, поэтому необходимо дополнительно использовать параметр давления. Совместное использование данных параметров предоставит возможность определить техническое состояние и нагрузку на гидропривод.

1.2.3 Анализ существующих методов оценки прогнозного технического состояния систем приводов МПКС

Эффективность функционирования МПКС существенно возрастает, когда наряду с определением текущего технического состояния их систем приводов вычисляется время и причина возникновения отказа. Это предоставляет возможность технически

обоснованно планировать сроки профилактических работ, закупку необходимых запасных частей, а также сократить время поиска и устранения возникшей неисправности.

Выбор метода определения технического состояния в будущие периоды эксплуатации систем приводов МПКС может базироваться на различном математическом аппарате. В настоящее время известны методы аналитического и вероятностного прогнозирования, а также статистической классификации.

Метод аналитического прогнозирования предоставляет возможность получать прогнозные значения параметров в размерности, соответствующей контролируемым параметрам. Данный метод может быть применен только при известной аналитической зависимости функции изменения параметра во времени.

Метод вероятностного прогнозирования предоставляет возможность определить вероятность сохранения работоспособности систем приводов МПКС. Результатом расчетов является вероятность выхода исследуемого параметра за допустимые пределы. Как правило, использование данного класса методов предполагает расчет и анализ плотности распределения вероятности, математического ожидания или дисперсии исследуемого параметра во времени.

Метод распознавания образов или статистической классификации предоставляет возможность отнести контролируемый объект к одному из заданных классов технического состояния, принятых за эталонные образы. Отнесение объекта к установленному классу осуществляется на основе исследований закономерностей изменения параметров объекта [151-159].

В результате анализа методов (см. параграф 1.2) для диагностирования технического состояния систем приводов МПКС выбраны параметры тока и/или вибрации, для анализа которых предполагается разработать метод, предоставляющий возможность идентифицировать неисправности, отличив их от изменения нагрузки на привод. Метод прогнозирования технического состояния должен также базироваться на анализе этих параметров, выполнять классификацию технического состояния и быть реализуемым в режиме реального времени, т.е. относиться к классу методов распознавания образов. Наиболее перспективным методом прогнозирова-

ния является применение нейронных сетей [160, А161], предопределяющим возможность исследовать изменение прогнозируемой величины выбранных параметров систем приводов МПКС во времени.

1.3 Выводы по главе 1

1. Активное внедрение машин и механизмов параллельной кинематической структуры в различные сферы производства предъявляет повышенные требования к надежности их функционирования, для чего необходим контроль технического состояния систем исполнительных приводов.

2. В составе МПКС используются системы электрических и гидравлических приводов, техническое состояние которых во многом определяет их надежность и безопасность функционирования.

3. Проблема повышения эффективности функционирования систем приводов МПКС может быть решена с помощью системы оценки технического состояния, которая должна осуществлять непосредственное взаимодействие с каждым приводом МПКС в режиме реального времени, следовательно, базироваться на киберфизическом принципе построения.

4. Критический анализ основных методов оценки текущего состояния электрических и гидравлических приводов МПКС показал отсутствие системного подхода и унифицированных методов диагностирования, предоставляющих возможность без применения сложных, громоздких измерительных средств выявить основные неисправности объекта в процессе эксплуатации, поэтому задача разработки таких методов весьма актуальна.

5. Анализ существующих методов оценки прогнозного технического состояния показал целесообразность применения методов распознавания образов или статистической классификации, предоставляющих возможность отнести исследуемый объект к одному из заданных классов технического состояния. Для реализации краткосрочного и долгосрочного прогнозирования с помощью данного метода целесообразно применение искусственных нейронных сетей.

Глава 2 Динамический анализ и принципы выбора режима эксплуатации механизмов параллельной кинематической структуры при частичном отказе исполнительных приводов

При управлении МПКС возникает необходимость решения прямой и обратной задачи динамики [19]. Решение прямой задачи динамики предполагает нахождение сил, развиваемых исполнительными приводами для обеспечения заданного движения управляемой платформы [20], а обратной – по известным силам, приложенным к подвижной нагруженной платформе, определить закон программного движения МПКС [21, 22].

Классическим примером МПКС является платформа Гью-Стюарта [23], неподвижное основание которой соединено с подвижной платформой несколькими стойками регулируемой длины, каждая из которых закреплена шарниром, имеющим две и более степени подвижности. Управление таким механизмом предполагает синхронное изменение длин управляемых кинематических цепей МПКС по заданному закону, что предоставляет возможность одновременно регулировать перемещение и пространственную ориентацию подвижной платформы [19]. При появлении неисправностей часть приводов не будет создавать требуемое усилие для программного движения, что неизбежно приведет к аварийной остановке механизма. При решении данной проблемы возникает необходимость принятия решения о возможности его дальнейшей эксплуатации, а также выбора режима эксплуатации механизма для реализации заданного технологического процесса. Для этого необходимо вывести уравнения динамики МПКС с частичным отказом системы исполнительных приводов, предоставляющие возможность корректировать управляющие силы в зависимости от технического состояния исполнительных приводов. Решение данной задачи рассмотрено на примере двух наиболее распространенных кинематических структур.

2.1 Динамика управляемой платформы механизма параллельной кинематической структуры с независимыми параллельными звеньями

Одним из наиболее распространенных типов МПКС является гексапод с различными схемами соединения звеньев [10-27, 162]. На рисунке 2.1 представлен пример МПКС с шестью параллельными независимыми кинематическими цепями.

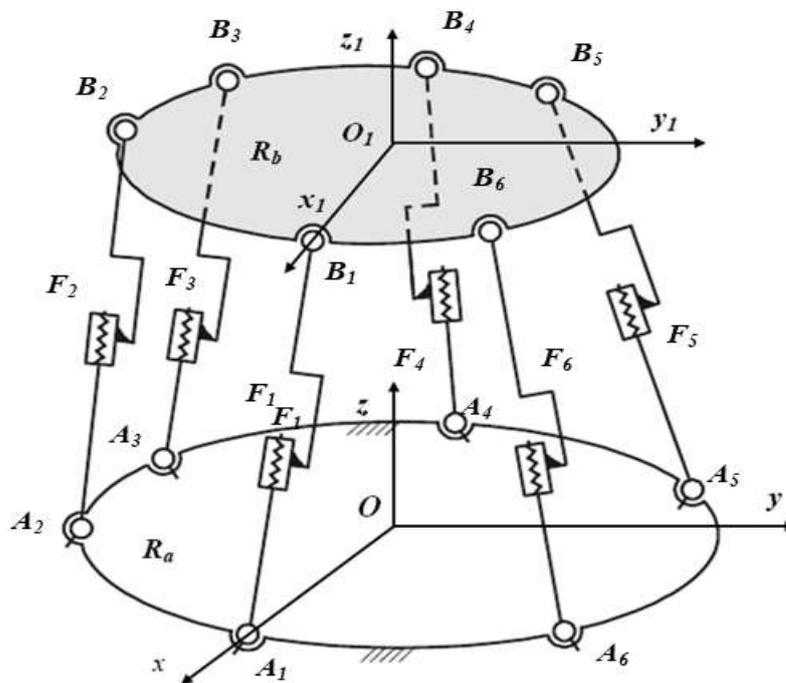


Рисунок 2.1 – Механизм с параллельными независимыми кинематическими цепями

Пусть на платформе массой m установлен дополнительный груз массой m_0 , сосредоточенной в ее центре O_1 . Тогда эквивалентная статическая нагрузка, действующая на платформу, определяется согласно (2.1):

$$Q_{\text{ст}} = (m + m_0)g. \quad (2.1)$$

Рассматриваемый МПКС имеет неподвижное основание радиусом R_a и подвижную платформу радиусом R_b , связанную с основанием шестью активными не-

зависимыми стойками (см. рисунок 2.1). Пусть $Oxyz$ – неподвижная система координат, связанная с центром основания радиусом R_a , $O_1x_1y_1z_1$ – система координат, связанная с центром подвижной платформы радиусом R_b .

На горизонтальном неподвижном основании платформы равномерно распределены шесть шарниров A_i , $i=1, \dots, 6$, образующих правильный шестиугольник со стороной R_a и центром в точке O (см. рисунок 2.2, а). На подвижной платформе радиусом R_b и массой m установлено шесть равномерно распределенных шарниров B_j ($j=1, 6$), образующих правильный шестиугольник с центром масс в центре этого шестиугольника O_1 (см. рисунок 2.2, б).

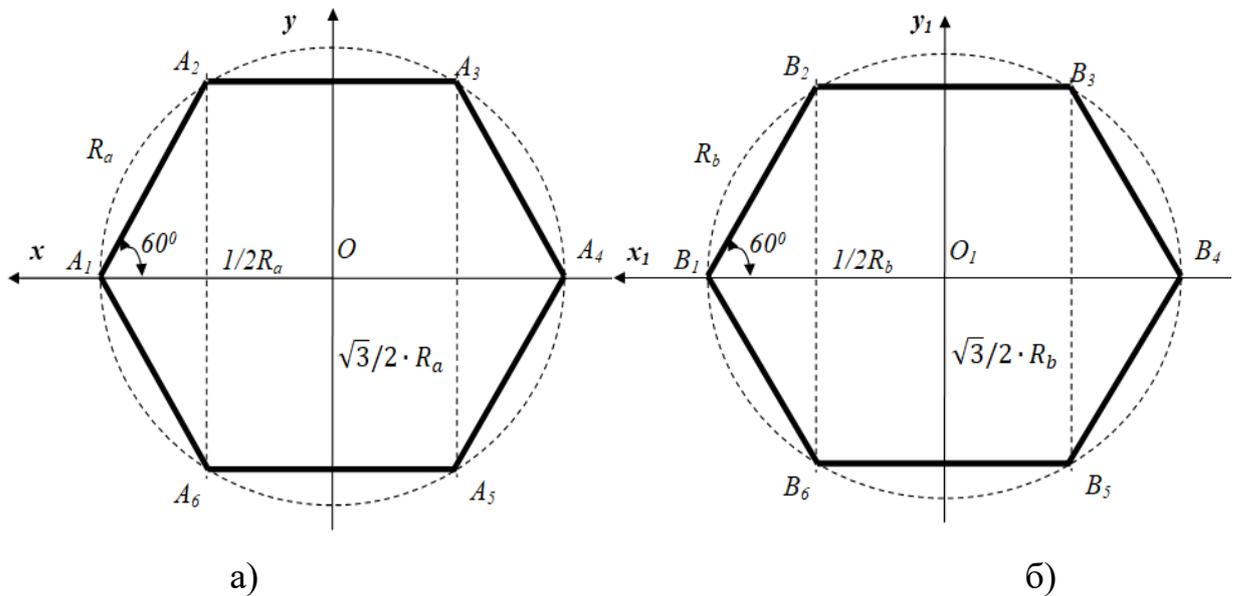


Рисунок 2.2 – Координаты крепления параллельных кинематических цепей:

а – на неподвижном основании; б – на подвижной платформе

Шарниры A_i и B_j двух платформ соединены невесомыми стержнями A_iB_j ($i, j=1, 6$), которые в стационарном движении параллельны друг другу. Изменение положения платформы реализуется за счет изменения длин соответствующих стержней A_iB_j и углов их наклона к основанию МПКС.

Пусть l_i ($l_i > 0$) – длины стержней МПКС, а γ_i ($0 < \gamma_i < \pi/2$) – углы наклона стержней A_iB_j к основанию платформы. Рассматриваемая платформа может перемещаться только в плоскости OA_iB_j и её положение полностью определяют параметры l_i и γ_i . На

рисунке 2.3 представлено вертикальное сечение платформы через ось Ox . В данном случае она может быть рассмотрена как равнобедренная трапеция $A_1B_1A_4B_4$, центр масс которой совпадает с центром O_1 правильного шестиугольника B_1, \dots, B_6 .

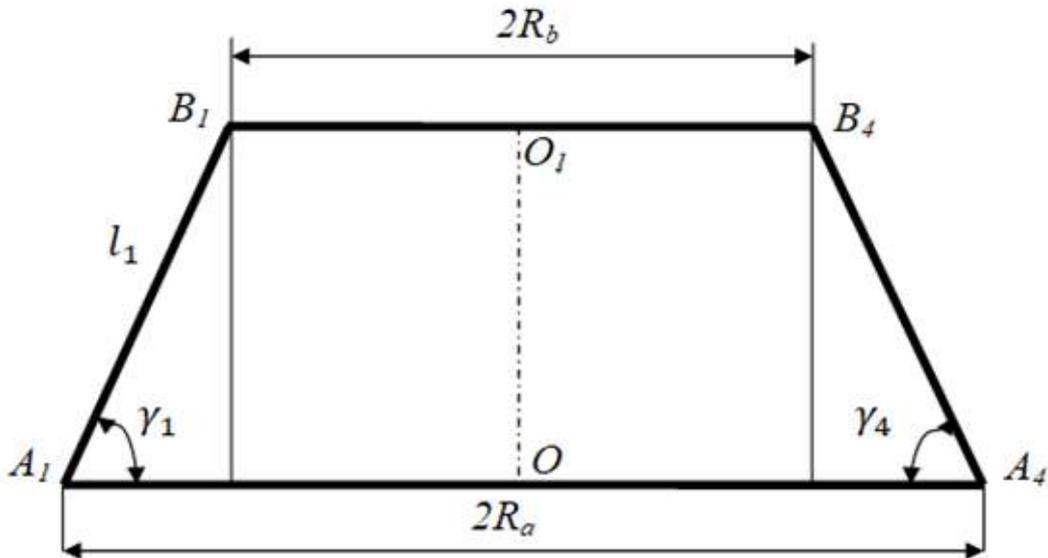


Рисунок 2.3 – Геометрические параметры сечения МПКС при вертикальном линейном движении

При изучении закономерностей движения МПКС необходимо рассмотреть равномерный подъем платформы относительно основания и наклон относительно плоскости основания.

Пусть известны радиусы основания R_a и подвижной платформы R_b , а также текущая высота h . При вертикальном перемещении МПКС (см. рисунок 2.4) происходит равномерное изменение длин стоек l_i и углов их наклона к основанию платформы γ_i , которые могут быть вычислены из геометрических параметров МПКС:

$$l_i \cos \gamma_i = R_a - R_b;$$

$$l_i \sin \gamma_i = h;$$

$$\gamma_i = \arctg \left(\frac{h}{R_a - R_b} \right);$$

$$l_i = \sqrt{(R_a - R_b)^2 + h^2}.$$

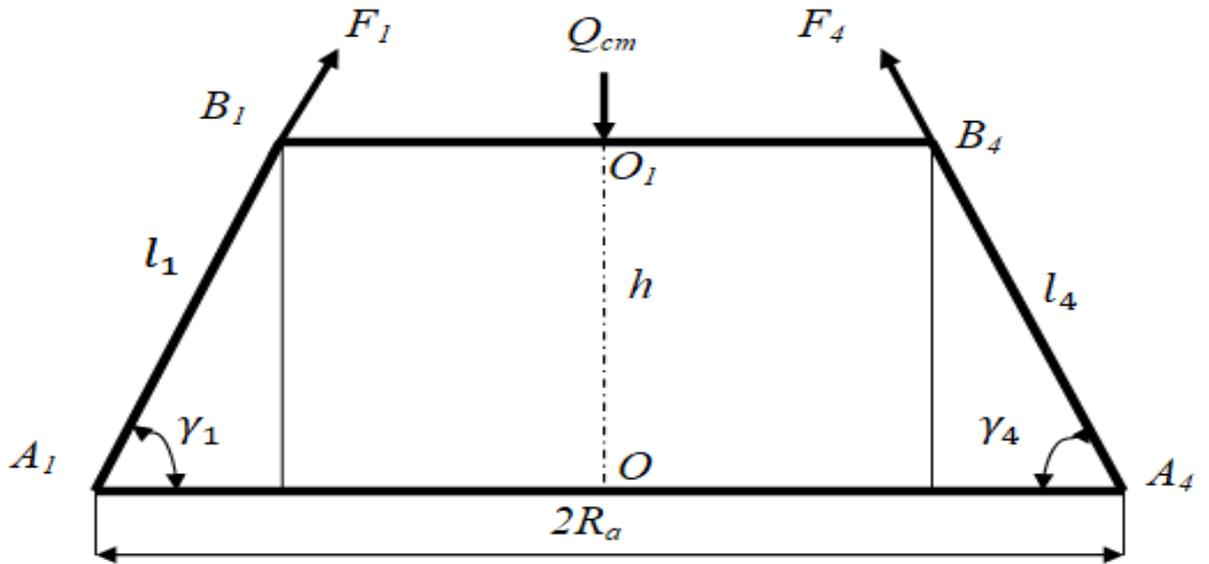


Рисунок 2.4 – Вертикальное перемещение платформы МПКС

При подъеме стержня A_4B_4 на угол φ (см. рисунок 2.5) длины стоек и углы будут отличаться друг от друга, но выполнится соотношение:

$$l_2 = l_6; \quad \gamma_2 = \gamma_6; \quad l_3 = l_5; \quad \gamma_3 = \gamma_5.$$

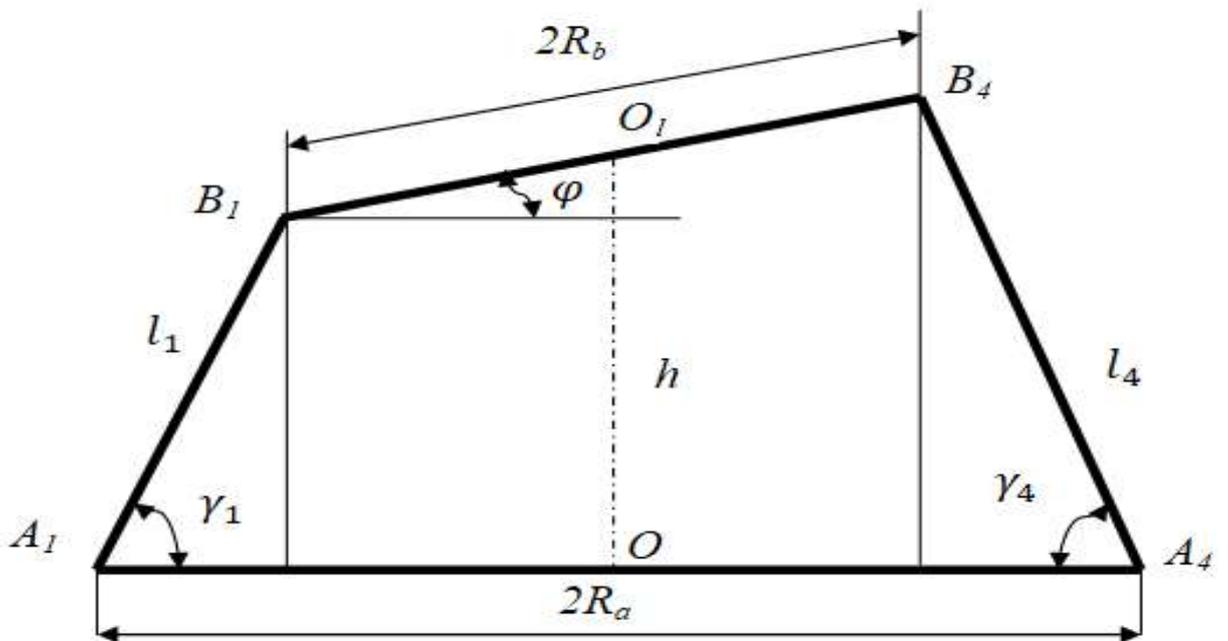


Рисунок 2.5 – Геометрические параметры сечения МПКС при наклоне платформы

Формальные взаимосвязи между конструктивными параметрами

$$l_1 \sin \gamma_1 = h - R_b \sin \varphi;$$

$$l_2 \sin \gamma_2 = l_6 \sin \gamma_6 = h - 0,5 \cdot R_b \sin \varphi;$$

$$l_3 \sin \gamma_3 = l_5 \sin \gamma_5 = h + 0,5 \cdot R_b \sin \varphi;$$

$$l_4 \sin \gamma_4 = h + R_b \sin \varphi;$$

$$l_1 \cos \gamma_1 = l_4 \cos \gamma_4 = R_a - R_b \cos \varphi;$$

$$l_2 \cos \gamma_2 = l_3 \cos \gamma_3 = l_5 \cos \gamma_5 = l_6 \cos \gamma_6 = R_a - 0,5\sqrt{3}R_b.$$

Углы наклона платформы к горизонтали будут равны (2.2 – 2.5):

$$\gamma_1 = \arctg \left(\frac{h - R_b \sin \varphi}{R_a - R_b \cos \varphi} \right); \quad (2.2)$$

$$\gamma_2 = \gamma_6 = \arctg \left(\frac{h - 0,5R_b \sin \varphi}{R_a - 0,5\sqrt{3}R_b} \right); \quad (2.3)$$

$$\gamma_3 = \gamma_5 = \arctg \left(\frac{h + 0,5R_b \sin \varphi}{R_a - 0,5\sqrt{3}R_b} \right); \quad (2.4)$$

$$\gamma_4 = \arctg \left(\frac{h + R_b \sin \varphi}{R_a - R_b \cos \varphi} \right). \quad (2.5)$$

Длины стоек платформы составят (2.6) – (2.9):

$$l_1 = \sqrt{(h - R_b \sin \varphi)^2 + (R_a - R_b \cos \varphi)^2}; \quad (2.6)$$

$$l_2 = l_6 = \sqrt{(h - 0,5R_b \sin \varphi)^2 + (R_a - 0,5\sqrt{3}R_b)^2}; \quad (2.7)$$

$$l_3 = l_5 = \sqrt{(h + 0,5R_b \sin \varphi)^2 + (R_a - 0,5\sqrt{3}R_b)^2}; \quad (2.8)$$

$$l_4 = \sqrt{(h + R_b \sin \varphi)^2 + (R_a - R_b \cos \varphi)^2}. \quad (2.9)$$

В процессе движения на платформу помимо эквивалентной статической нагрузки $Q_{ст}$ и внутренних сил реакций оказывают воздействие управляющие силы F_i , действующие вдоль соответствующих стержней МПКС. Данные силы обеспечивают поддержку и перемещение платформы изменением длин ее стоек l_i (см. рисунки 2.4. и 2.6).

Положение платформы полностью описывается двумя обобщёнными координатами h и φ , определяющими конфигурацию МПКС, а величины l_i и γ_i являются избыточными обобщёнными координатами.

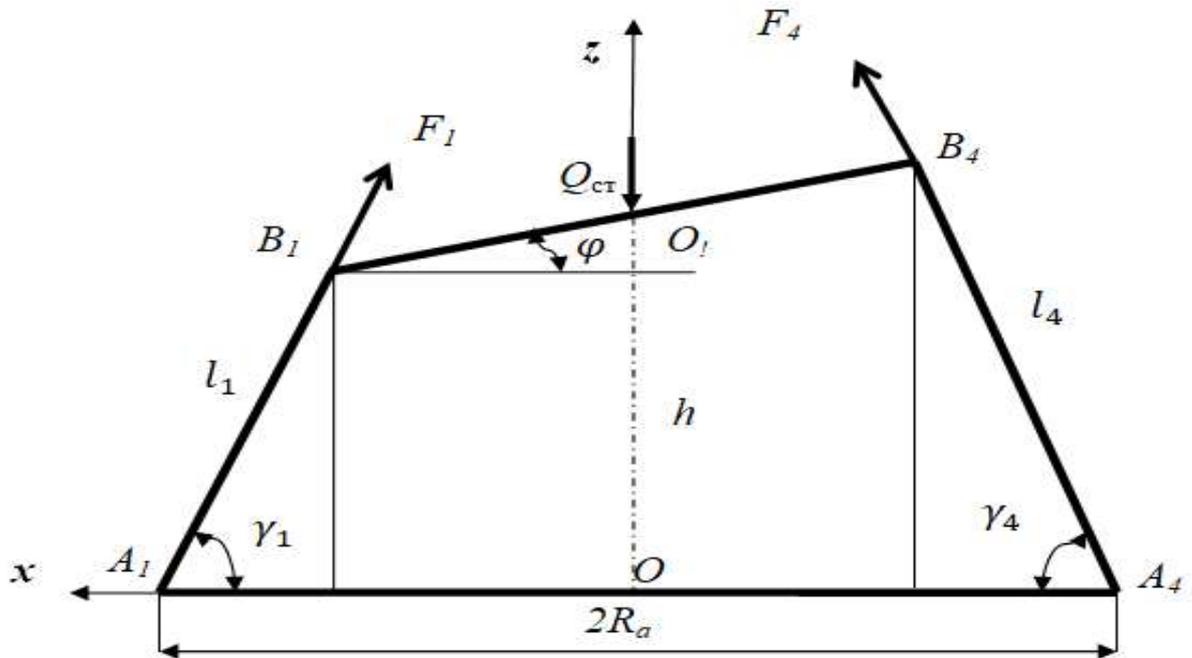


Рисунок 2.6 – Силы, действующие на МПКС при наклоне его платформы

Для управления движением МПКС необходимо составить уравнения Лагранжа второго рода (2.10):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{h}} \right) - \frac{\partial E}{\partial h} = Q_h; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial E}{\partial \varphi} = Q_\varphi, \end{cases} \quad (2.10)$$

где Q_i – обобщенные силы, действующие на платформу; E – кинетическая энергия платформы.

Кинетическая энергия платформы (2.11):

$$E = 0.5((m + m_0)V_0^2 + J_0\dot{\varphi}^2), \quad (2.11)$$

где $m + m_0$ – масса платформы с грузом; J_0 – момент инерции относительно вертикальной оси платформы; V_0 – величина полной скорости центра O_1 масс платформы.

Если точка O_1 в неподвижной системе $Oxyz$ имеет координаты:

$$O_1 = (R_b (1 - \cos\varphi), 0, h),$$

$$V_0 = \{R_b \sin\varphi \cdot \dot{\varphi}, h, 0\},$$

$$V_0^2 = \dot{h}^2 + R_b^2 \sin^2\varphi \cdot \dot{\varphi}^2,$$

то кинетическая энергия может быть найдена по

$$E = 0.5(m + m_0)(\dot{h}^2 + R_b^2 \sin^2\varphi \cdot \dot{\varphi}^2) + 0.5J_0 \dot{\varphi}^2.$$

Координаты точек приложения сил относительно неподвижной системы координат:

$$Q_{ct} = \{0, 0, -(m + m_0)g\};$$

$$F_1 = \{-F_1 \cos\gamma_1, 0, F_1 \sin\gamma_1\};$$

$$F_2 = \{-0.5F_2 \cos\gamma_2, -0.5\sqrt{3}F_2 \cos\gamma_2, F_2 \sin\gamma_2\};$$

$$F_3 = \{0.5F_3 \cos\gamma_3, -0.5\sqrt{3}F_3 \cos\gamma_3, F_3 \sin\gamma_3\};$$

$$F_4 = \{F_4 \cos\gamma_4, 0, F_4 \sin\gamma_4\};$$

$$F_5 = \{0.5F_5 \cos\gamma_5, 0.5\sqrt{3}F_5 \cos\gamma_5, F_5 \sin\gamma_5\};$$

$$F_6 = \{0.5F_6 \cos\gamma_6, 0.5\sqrt{3}F_6 \cos\gamma_6, F_6 \sin\gamma_6\}.$$

Радиус-векторы точек приложения сил на оси неподвижной системы координат:

$$R_0^b = \{R_b \sin\varphi, 0, h\};$$

$$R_1^b = \{R_a - R_b \cos\varphi, 0, h - R_b \sin\varphi\};$$

$$R_2^b = \{-0.5R_b - R_a, -0.5\sqrt{3}R_b - R_a, h - 0.5R_b \sin\varphi\};$$

$$R_3^b = \{0.5R_b - R_a, 0.5\sqrt{3}R_b - R_a, h + 0.5R_b \sin\varphi\};$$

$$R_4^b = \{R_a - 2R_b \cos\varphi, 0, h + R_b \sin\varphi\};$$

$$R_5^b = \{0.5R_b - R_a, -0.5\sqrt{3}R_b - R_a, h + 0.5R_b \sin\varphi\};$$

$$R_6^b = \{-0.5R_b - R_a, 0.5\sqrt{3}R_b - R_a, h - 0.5R_b \sin\varphi\}.$$

Тогда выражение работы на элементарных перемещениях и в соответствии с методикой составления уравнений Лагранжа имеет вид:

$$Q_{cm} \delta R_0^b + F_1 \delta R_1^b + F_2 \delta R_2^b + F_3 \delta R_3^b + F_4 \delta R_4^b + F_5 \delta R_5^b + F_6 \delta R_6^b = 0.$$

или (2.12)

$$-(m + m_0)g \cdot \delta h - F_1 \cos\gamma_1 (R_a - R_b \cos\varphi) + F_1 \sin\gamma_1 (\delta h - R_b \sin\varphi \cdot \delta\varphi) + \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}
& +F_2 \sin \gamma_2 (\delta h - 0.5 R_b \sin \varphi \cdot \delta \varphi) + F_3 \sin \gamma_3 (\delta h + 0.5 R_b \sin \varphi \cdot \delta \varphi) + \\
& +F_4 \cos \gamma_4 (R_a - 2 R_b \sin \varphi \cdot \delta \varphi) + F_4 \sin \gamma_4 (\delta h + R_b \sin \varphi \cdot \delta \varphi) + \\
& +F_5 \sin \gamma_5 (\delta h + 0.5 R_b \sin \varphi \cdot \delta \varphi) + F_6 \sin \gamma_6 (\delta h - 0.5 R_b \sin \varphi \cdot \delta \varphi) = 0.
\end{aligned}$$

В (2.12) углы γ_i выражаются через обобщенные координаты h и φ (2.2) - (2.5), а управляющие силы F_i являются функциями времени или обобщенных координат. Длины стоек l_i также зависят от обобщенных координат h и φ (2.6) - (2.9). Введение в уравнение вместо соответствующих углов наклона γ_i их математических выражений (2.2) - (2.5), выведенных из геометрических параметров платформы, представляет зависимости:

$$Q_h = -(m + m_0)g + h^2(F_1 + 2F_2 + 2F_3 + F_4);$$

$$Q_\varphi = R_a R_b \cos \varphi (2F_1 + 4F_4) - R_b^2 \cos^2 \varphi (2F_1 + 0.5F_2 + 0.5F_3)$$

или (2.13)

$$\begin{cases}
(m + m_0)\ddot{h} = F_1 + 2F_2 + 2F_3 + F_4 - (m + m_0); \\
(J_0 + (m + m_0) \cdot R_b^2 \sin^2 \varphi) \cdot \ddot{\varphi} + (m + m_0) \cdot R_b^2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \dot{\varphi}^2 = \\
R_a R_b \cos \varphi (2F_1 + 4F_4) - R_b^2 \cos^2 \varphi (2F_1 + 0.5F_2 + 0.5F_3).
\end{cases} \quad (2.13)$$

Таким образом, получена динамическая модель МПКС с параллельными кинематическими цепями для реализации программного управления.

2.2 Динамика управляемой платформы МПКС со сходящимися кинематическими цепями

Классический вариант гексапода имеет шесть активных кинематических цепей, попарно сходящихся в сферических шарнирах выходного звена (см. рисунок 2.7).

На неподвижном основании платформы равномерно распределено шесть шарниров $A_i, i=1, \dots, 6$, образующих правильный шестиугольник со стороной R_a и с центром в точке O (см. рисунок 2.8, а). Подвижная платформа (см. рисунок 2.8, б) радиусом R_b и массой m имеет форму треугольника со стороной $\sqrt{3}R_b$ и центром

масс в точке O_1 . Невесомые стержни $A_i B_j$ присоединены к платформам A и B с помощью сферических шарниров таким образом, что стержни, выходящие из шарниров A_1 и A_2 , сходятся в шарнире B_1 , из A_3 и A_4 – в B_2 , а из A_5 и A_6 – в B_3 .

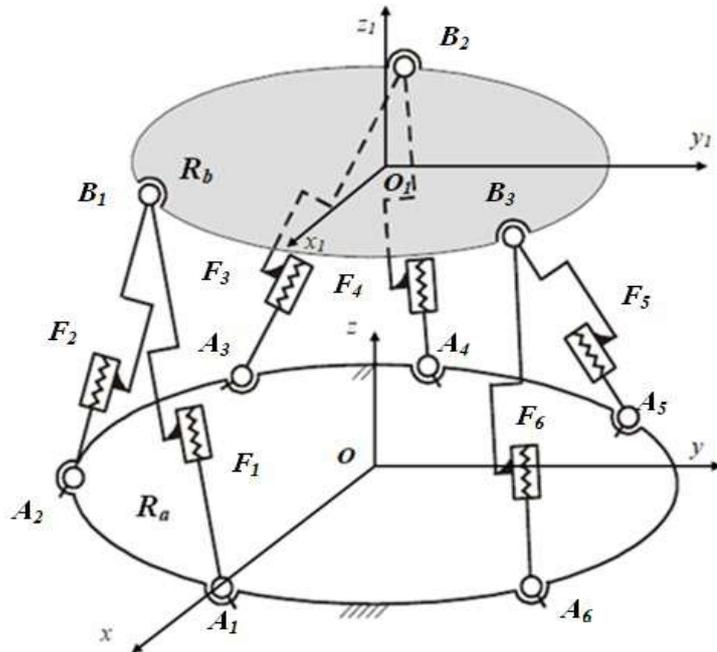


Рисунок 2.7 – Структура МПКС со сходящимися кинематическими цепями

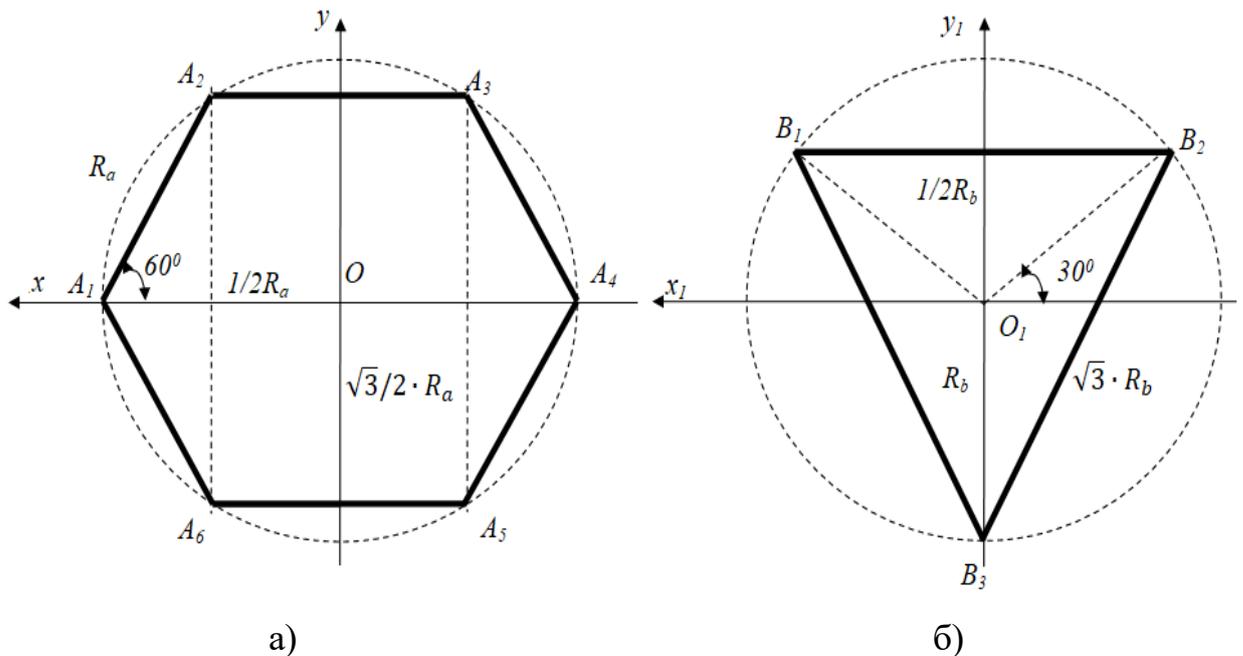


Рисунок 2.8 – Координаты точек крепления сходящихся кинематических цепей:

а – на неподвижном основании; б – на подвижной платформе

На платформу действует эквивалентная статическая нагрузка ($Q_{ст}$) (2.1), приложенная в точке O_l (см. рисунок 2.7) и направленная параллельно оси Oz , а также шесть сил F_i ; $i = 1, \dots, 6$, приложенных к точкам A_i , $i=1, \dots, 6$ и направленных вдоль соответствующих звеньев.

Силы, действующие на каждый шарнир подвижной платформы:

$$\vec{G}_1 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2; \quad \vec{G}_2 = \vec{F}_3 + \vec{F}_4; \quad \vec{G}_3 = \vec{F}_5 + \vec{F}_6.$$

Исходя из условия равновесия (см. рисунок 2.9), эквивалентные силы, действующие на каждый шарнир, могут быть найдены по

$$G_1 = F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2;$$

$$G_2 = F_3 \cos \alpha_3 + F_4 \cos \alpha_4;$$

$$G_3 = F_5 \cos \alpha_5 + F_6 \cos \alpha_6,$$

где α_i – угол наклона кинематической цепи к вертикали.

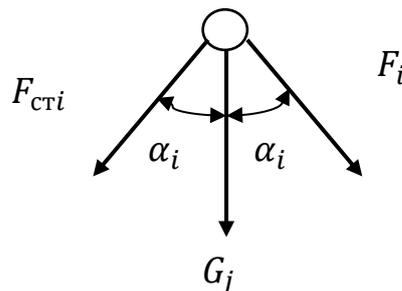


Рисунок 2.9 – Распределение нагрузок на сходящиеся кинематические пары

Изменение положения платформы реализуется за счет изменения длин стержней $A_i B_j$, углов их наклона друг к другу α_i и к плоскости основания γ_i ($0 < \gamma_i < \pi/2$).

Если через шарнир B_1 , центр подвижной платформы O_l и середину стороны $B_2 B_3$ треугольника $B_1 B_2 B_3$ провести секущую плоскость, то она пройдет через середины сторон шестиугольника основания в точках A_{12} и A_{45} (см. рисунок 2.10).

Фигура сечения МПКС со сходящимися кинематическими цепями может быть получена соединением точек A_{12} и B_1 , а также B_{23} и A_{45} (см. рисунок 2.11).

Пусть l_{12} и l_{45} – длины соответствующих образующих $A_{12} B_1$ и также $A_{45} B_{23}$; γ_{12} и γ_{45} – углы наклона этих образующих к основанию; l_{34} и l_{56} – длины соответствующих

образующих $A_{34}B_2$ и $A_{56}B_3$; γ_{34} и γ_{56} – углы наклона этих образующих к основанию. При изучении закономерностей движения МПКС целесообразно рассмотреть равномерный вертикальный подъем платформы, а также ее наклон относительно плоскости основания на заданный угол.

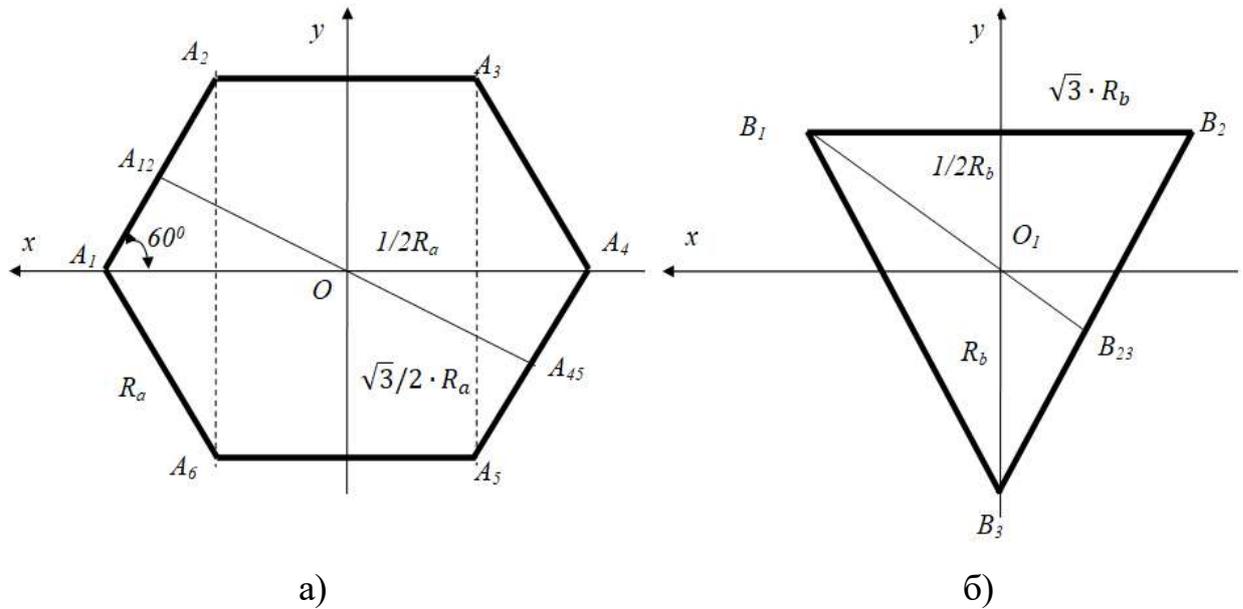


Рисунок 2.10 – Положение точек сечения МПКС со сходящимися кинематическими цепями: а – на неподвижном основании; б – на подвижной платформе

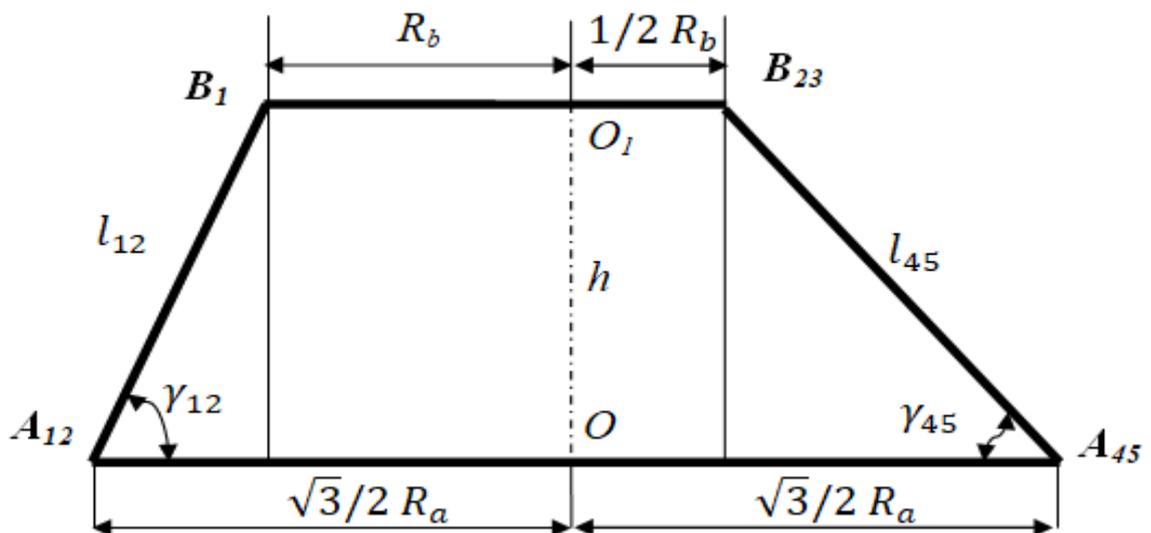


Рисунок 2.11 – Геометрические параметры сечения МПКС со сходящимися звеньями

Пусть известны радиусы основания R_a и подвижной платформы R_b , а также текущая высота h . При вертикальном перемещении МПКС (см. рисунок 2.12) происходит равномерное изменение длин образующих l_{12} и l_{45} и углов γ_{12} и γ_{45} их наклона к плоскости основания платформы:

$$l_{12} \cos \gamma_{12} = 0.5\sqrt{3}R_a - R_b;$$

$$l_{12} \sin \gamma_{12} = l_{45} \sin \gamma_{45} = l_{34} \sin \gamma_{34} = l_{56} \sin \gamma_{56} = h;$$

$$l_{45} \cos \gamma_{45} = 0.5\sqrt{3}R_a - 0.5R_b;$$

$$l_{34} \cos \gamma_{34} = l_{56} \cos \gamma_{56} = 0.75R_a - 0.5\sqrt{3}R_b.$$

Тогда углы наклона образующих к основанию:

$$\gamma_{12} = \arctg(h \cdot (0.5\sqrt{3}R_a - R_b)^{-1});$$

$$\gamma_{45} = \arctg(h \cdot (0.5\sqrt{3}R_a - 0.5R_b)^{-1});$$

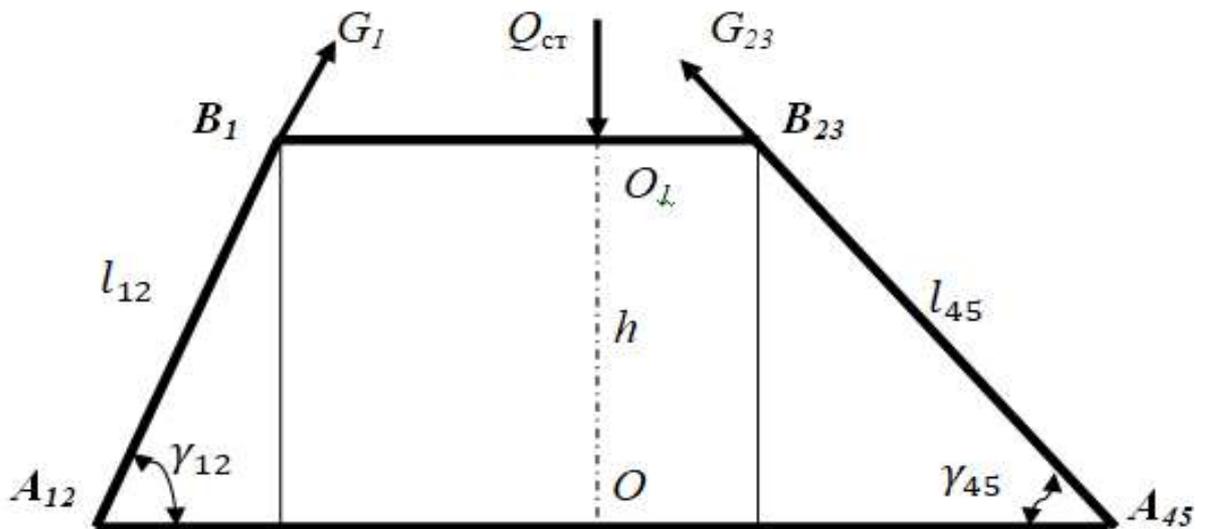


Рисунок 2.12 – Силы, действующие на МПКС со сходящимися кинематическими цепями при вертикальном подъеме платформы

Длины соответствующих образующих составят:

$$l_{12} = h + 0.5\sqrt{3}R_a - R_b;$$

$$l_{45} = h + 0.5\sqrt{3}R_a - 0.5R_b;$$

$$l_{34} = l_{56} = h + 0.75R_a - 0.5\sqrt{3}R_b.$$

Другим вариантом плоскопараллельного движения конструкции является наклон платформы горизонтальной плоскости (см. рисунок 2.13).

При подъеме образующей $A_{45}B_{23}$ на угол φ выполнится соотношение: $l_{34} = l_{56}$ и $\gamma_{34} = \gamma_{56}$.

Зная конфигурацию платформы, можно формализовать взаимосвязи ее геометрических параметров :

$$l_{34}\sin\gamma_{34} = l_{56}\sin\gamma_{56} = h + 6^{-1}\sqrt{3}R_b\sin\varphi;$$

$$l_{34}\cos\gamma_{34} = l_{56}\cos\gamma_{56} = 0.5(\sqrt{3}R_a - R_b);$$

$$l_{12}\sin\gamma_{12} = h - 3^{-1}\sqrt{3}R_b\sin\varphi;$$

$$l_{12}\cos\gamma_{12} = \sqrt{3}R_a + 6^{-1}\sqrt{3}R_b - 0.5\sqrt{3}R_b\cos\varphi.$$

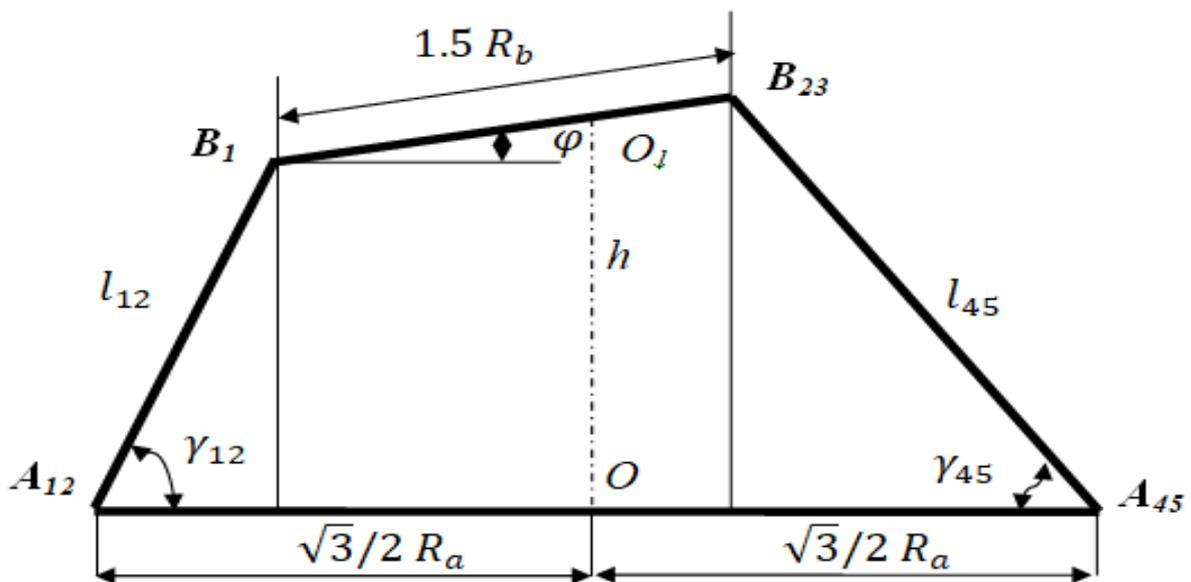


Рисунок 2.13 – Геометрические параметры сечения МПКС со сходящимися кинематическими цепями при наклоне платформы

Тогда углы наклона образующих МПКС:

$$\gamma_{34} = \gamma_{56} = \arctg\left(\frac{h + 6^{-1}\sqrt{3}R_b\sin\varphi}{0.5(\sqrt{3}R_a - R_b)}\right);$$

$$\gamma_{12} = \arctg \left(\frac{h - 3^{-1}\sqrt{3}R_b \sin\varphi}{\sqrt{3}(R_a + 6^{-1}R_b - 0.5R_b \cos\varphi)} \right);$$

$$\gamma_{45} = \arctg \left(\frac{h + 0.5R_b \sin\varphi}{0.5(\sqrt{3}R_a - R_b \cos\varphi)} \right).$$

Длины образующих МПКС (2.14) – (2.16):

$$l_{34} = l_{56} = \sqrt{(h + 6^{-1}\sqrt{3}R_b \sin\varphi)^2 + (0.5(\sqrt{3}R_a - R_b))^2}; \quad (2.14)$$

$$l_{12} = \sqrt{(h - 3^{-1}\sqrt{3}R_b \sin\varphi)^2 + 3(R_a + 6^{-1}R_b - 0.5R_b \cos\varphi)^2}; \quad (2.15)$$

$$l_{45} = \sqrt{(h + 0.5R_b \sin\varphi)^2 + 0.25(\sqrt{3}R_a - R_b \cos\varphi)^2}. \quad (2.16)$$

При плоскопараллельном движении платформы проекции точек B_{23} , B_2 и B_3 могут перемещаться только по вертикали, следовательно, рассматриваемая система полностью описывается координатами h и φ , а параметры l_{ij} и γ_{ij} являются избыточными обобщёнными координатами.

В процессе движения на платформу помимо эквивалентной статической нагрузки $Q_{ст}$ и внутренних сил реакций оказывают воздействие эквивалентные силы G_1 , G_2 и G_3 , действующие на шарниры подвижной платформы и направленные вдоль образующих $A_{12}B_1$, $A_{34}B_2$, $A_{56}B_3$.

Пусть G_{23} – равнодействующая сил G_2 и G_3 ($G_{23} = G_2 + G_3$) (см. рисунок 2.14).

Для управления движением МПКС необходимо составить уравнения Лагранжа второго рода (2.10) и рассчитать кинетическую энергию платформы (2.11).

Если точка O_1 в неподвижной системе $Oxyz$ имеет координаты:

$$O_1 = (6^{-1}\sqrt{3}R_b (1 - \cos\varphi), 0, \dot{h})$$

и линейную скорость (2.70), (2.71)

$$V_0 = \{6^{-1}\sqrt{3}R_b \sin\varphi \cdot \dot{\varphi}, 0, \dot{h}\};$$

$$V_0^2 = \dot{h}^2 + 12^{-1}R_b^2 \sin^2\varphi \cdot \dot{\varphi}^2,$$

то кинетическая энергия может быть определена по выражению:

$$E = 0.5(m + m_0)(\dot{h}^2 + 12^{-1}R_b^2 \sin^2\varphi \cdot \dot{\varphi}^2) + 0.5J_0 \dot{\varphi}^2.$$

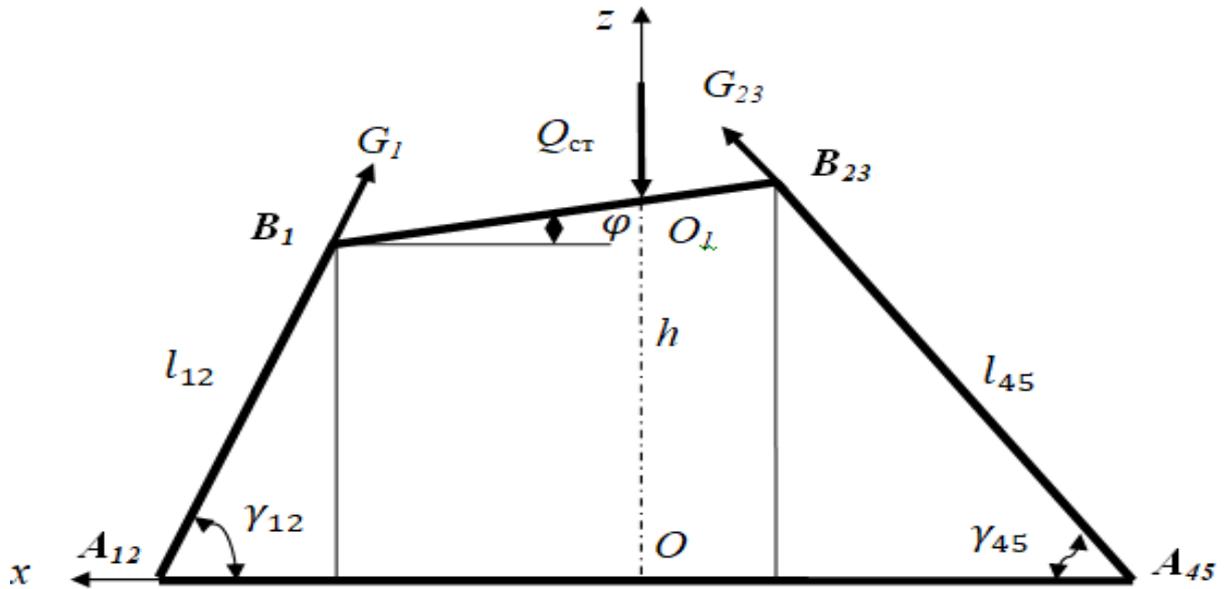


Рисунок 2.14 – Наклон платформы МПКС со сходящимися кинематическими цепями

Координаты точек приложения сил относительно неподвижной системы координат:

$$Q_{ст} = \{0, 0, -(m + m_0)g\};$$

$$G_1 = \{G_1 \cos \gamma_{12}, 0, G_1 \sin \gamma_{12}\};$$

$$G_{23} = \{-G_3 \cos \gamma_{45}, 0, 2G_2 \sin \gamma_{34}\}.$$

Проекции радиус-векторов точек приложения сил на оси неподвижной системы координат могут быть определены из выражений:

$$R_0^b = \{6^{-1}\sqrt{3} \cdot R_b(1 - \cos \varphi), 0, h\};$$

$$R_1^b = \{6^{-1}\sqrt{3} \cdot R_b(1 - 3 \cdot \cos \varphi), 0, h - 3^{-1}\sqrt{3}R_b \cdot \sin \varphi\};$$

$$R_{23}^b = \{3^{-1}\sqrt{3} \cdot R_b, 0, h + 3^{-1}\sqrt{3}R_b \cdot \sin \varphi\}.$$

Выражение работы при элементарных перемещениях платформы (2.17):

$$Q_{ст} \delta R_0^b + G_1 \delta R_1^b + G_{23} \delta R_{23}^b = 0. \quad (2.17)$$

Подъем платформы на угол φ осуществляется вследствие синхронного изменения эквивалентных сил в шарнирах B_2 и B_3 , поэтому $G_2 = G_3$, а выражение (2.17) примет вид (2.18):

$$\begin{aligned}
& -Q_{\text{ст}} \cdot \delta h - G_1 \cos \gamma_{12} (0.5\sqrt{3}R_b \cdot \sin \varphi) \delta \varphi + \\
& + G_1 \sin \gamma_{12} (\delta h - 3^{-1}\sqrt{3} \cdot R_b \cos \varphi \cdot \delta \varphi) + \\
& + 2G_2 \sin \gamma_{34} (\delta h + 3^{-1}\sqrt{3} \cdot R_b \cos \varphi \cdot \delta \varphi) = 0.
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Введение в систему уравнений (2.10) выражений для углов наклона платформы предоставляет зависимости:

$$Q_\varphi = R_b \cdot \sin \varphi \cdot \delta \varphi (R_b (G_2 \cos \varphi + G_1 \cos \varphi - 0.25G_1) - 1.5G_1 R_a);$$

$$Q_h = -Q_{\text{ст}} \cdot \delta h + h^2 \cdot \delta h (G_1 + 2G_2) + 3^{-1}\sqrt{3} \cdot h \cdot \delta h (G_2 - G_1).$$

В результате соответствующей подстановки в (2.18) и необходимых математических преобразований получена система уравнений (2.19):

$$\left\{ \begin{array}{l} (m + m_0)\ddot{h} = G_1 + 2G_2 + 3^{-1}\sqrt{3}(G_2 - G_1) - Q_{\text{ст}}; \\ (J_0 + 12^{-1}(m + m_0) \cdot R_b^2 \sin^2 \varphi) \cdot \ddot{\varphi} + (m + m_0) \cdot 12^{-1} \cdot R_b^2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \dot{\varphi}^2 = \\ = R_b \cdot \sin \varphi (R_b (G_2 \cos \varphi + G_1 \cos \varphi - 0.25G_1) - 1.5G_1 R_a). \end{array} \right. \tag{2.19}$$

Данная система уравнений описывает взаимосвязь эквивалентных сил, действующих в шарнирах подвижной платформы G_1, G_2 , с ее обобщенными координатами h и φ .

Однако для управления МПКС со сходящимися кинематическими цепями (см. рисунок 2.7) необходимо определить управляющие силы $F_i = F_i(l_i)$, направленные вдоль соответствующих стоек. Для этого необходимо в системе уравнений (2.19) заменить эквивалентные силы управляющими (2.20):

$$\left\{ \begin{array}{l} (m + m_0)\ddot{h} = F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2 + 2F_3 \cos \alpha_3 + 2F_4 \cos \alpha_4 + \\ + 3^{-1}\sqrt{3}(F_3 \cos \alpha_3 + F_4 \cos \alpha_4 - F_1 \cos \alpha_1 - F_2 \cos \alpha_2) - Q_{\text{ст}}; \\ (J_0 + 12^{-1}(m + m_0) \cdot R_b^2 \sin^2 \varphi) \cdot \ddot{\varphi} + (m + m_0) \cdot 12^{-1} \cdot R_b^2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \dot{\varphi}^2 = \\ = R_b \cdot \sin \varphi (R_b ((F_3 \cos \alpha_3 + F_4 \cos \alpha_4) \cos \varphi + (F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2) \cos \varphi - \\ - 0.25(F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2)) - 1.5(F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2) R_a). \end{array} \right. \tag{2.20}$$

В полученной системе (2.84) представлена формализованная взаимосвязь управляющих сил F_i с обобщенными координатами платформы h и φ . Дополнительными параметрами являются углы α_i наклона кинематических цепей относительно образующих l_{12}, l_{34}, l_{45} , используемых в описании данной динамической модели полностью определяются геометрией платформы и зависят от взаимного расположения шарниров

друг относительно друга. Зная длины образующих l_{12}, l_{34}, l_{45} (2.14) - (2.14), можно определить сообшественные длины стоек МПКС:

$$\begin{aligned} l_1 &= l_{12} \cdot (\cos\alpha_1)^{-1}; & l_2 &= l_{12} \cdot (\cos\alpha_2)^{-1}; \\ l_3 &= l_{34} \cdot (\cos\alpha_3)^{-1}; & l_4 &= l_{34} \cdot (\cos\alpha_4)^{-1}; \\ l_5 &= l_{45} \cdot (\cos\alpha_5)^{-1}; & l_6 &= l_{45} \cdot (\cos\alpha_6)^{-1}. \end{aligned}$$

Таким образом, получена динамическая модель МПКС со сходящимися кинематическими цепями для реализации программного управления МПКС.

2.3 Принципы выбора режима эксплуатации механизмов параллельной кинематической структуры при частичном отказе систем приводов

В параграфах 2.1 и 2.2 получены системы уравнений (2.13) и (2.20) для двух различных кинематических структур МПКС, показывающих взаимосвязь управляющих сил F_i и обобщенных координат платформы h и φ . Для реализации программного движения МПКС необходимо задавать необходимые управляющие силы для каждого исполнительного привода. В общем виде управляющая сила F_i является суммой статической $F_{ст}$ и дополнительной управляющей ΔF_i сил (2.21) [163]:

$$F_i = F_{ст} + \Delta F_i. \quad (2.21)$$

Статическая сила определяется внешней нагрузкой на платформу и рассчитывается в зависимости от кинематической структуры МПКС.

Для МПКС с независимыми параллельными звеньями

$$F_{ст} = 6^{-1}(Q_{ст}((R_a - R_b)^2 + h^2)^{0,5}).$$

Для МПКС со сходящимися кинематическими цепями рассчитывается эквивалентная статическая сила, действующая на каждый шарнир):

$$G_{стj} = 3^{-1}(Q_{ст}((R_a - R_b)^2 + h^2)^{0,5}).$$

Тогда статическая сила, действующая на каждую кинематическую цепь

$$F_{сти} = G_{стj} \cdot (\cos\alpha_i)^{-1}.$$

Для перемещения платформы необходимо к каждой стойке МПКС приложить дополнительные управляющие силы ΔF_i , закон изменения которых полностью зависит от заданного закона движения.

Для обеспечения надежного функционирования МПКС необходимо выполнить условие статической устойчивости, проверяемое при проектировании МПКС:

$$F_i \leq F_{кр},$$

где $F_{кр}$ – значение критической силы по Эйлеру [163].

Способ расчета $F_{кр}$ зависит от структуры кинематических цепей МПКС [20].

Для вращательной кинематической пары она вычисляется из соотношения [21]

$$F_{кр} = (\pi^2 \cdot \varepsilon \cdot h_1 \cdot b_1^3) \cdot (12 \cdot l_1^2)^{-1},$$

где ε – модуль упругости материала; l_1 – длина звена; h_1 и b_1 – высота и ширина поперечного сечения звена соответственно.

Для поступательной кинематической пары на основе винтовой передачи $F_{кр}$ вычисляется по [21]:

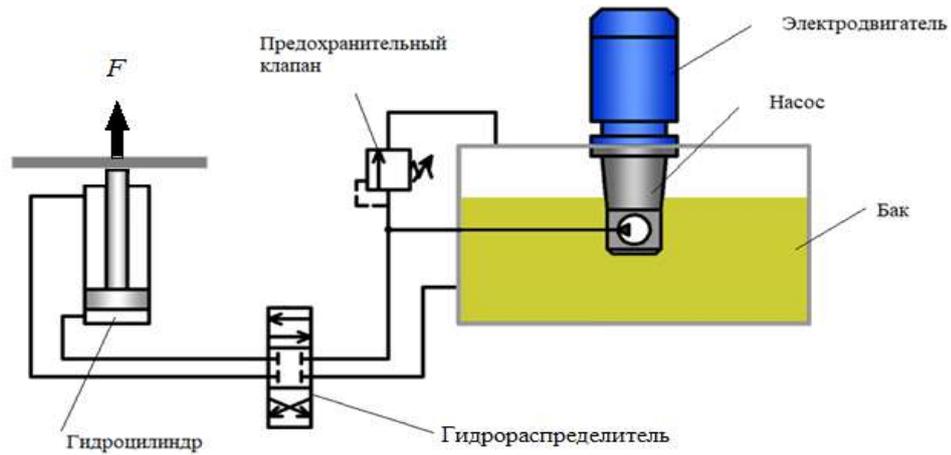
$$F_{кр} = (\pi^3 \cdot \varepsilon \cdot d_B^4) \cdot (64 \cdot S \cdot (\mu \cdot l)^2)^{-1}.$$

где S – коэффициент запаса; l – длина нагруженного участка винта; d_B – внутренний диаметр винта; μ – коэффициент жесткости винтовой передачи ($\mu = 0,5$).

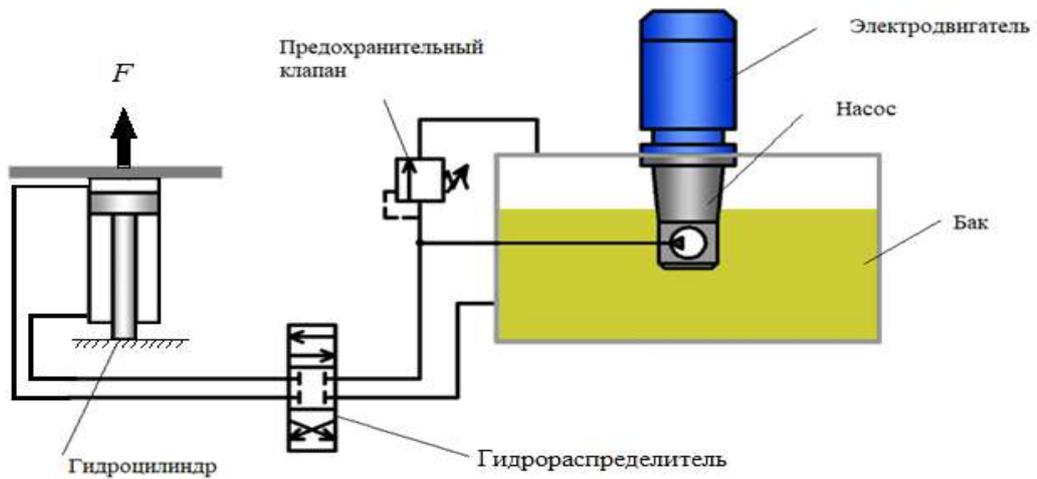
При использовании гидравлического привода (см. рисунок 2.15), оснащенного группой гидроцилиндров, поршни которых приводятся в движение с помощью гидронасоса, вращаемого электродвигателем, рабочая жидкость подается по рукавам высокого давления в гидроцилиндры, перемещающие выходное звено МПКС.

Для регулирования подачи рабочей жидкости к полостям гидроцилиндров используются гидравлические распределители, а для защиты системы от перегрузки – предохранительные клапаны.

В зависимости от требуемого усилия, развиваемого подъемником, возможны два варианта установки гидроцилиндров: с подвижным поршнем (рисунок 2.15, а) или подвижным цилиндром (рисунок 2.15, б).



а)



б)

Рисунок 2.15 – Устройство и принцип действия гидравлического привода МПКС

В первом случае статическая сила (рисунок 2.15, а), развиваемая гидроцилиндром вычисляется по

$$F_{\text{ст}} = 0.25 \cdot p \cdot \pi \cdot (D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{п}}^2);$$

во втором:

$$F_{\text{ст}} = 0.25 \cdot p \cdot \pi \cdot D_{\text{ш}}^2,$$

где p – давление в цилиндре, $D_{\text{ш}}$ – диаметр штока, $d_{\text{п}}$ – диаметр поршня.

Из приведенных соотношений следует, что конфигурация с подвижным цилиндром (рисунок 2.15, б) предоставляет возможность развивать большее усилие

для выталкивания платформы. Тогда критическая сила для гидравлического привода МПКС может быть рассчитана по:

$$F_{кр} = 0.25 \cdot p_{max} \cdot \pi \cdot (D_{ш}^2 - d_{п}^2);$$

$$F_{кр} = 0.25 \cdot p_{max} \cdot \pi \cdot D_{ш}^2,$$

где p_{max} – максимальное допустимое давление в гидроцилиндре.

Управление платформой реализуется с помощью линейной обратной связи через увеличение управляющей силы F_i , развиваемой каждым приводом:

$$u_n = f(F_i).$$

В зависимости от типа исполнительного привода управление движением стоек МПКС реализуется изменением напряжения питания или давления в гидроприводе.

В случае частичного отказа неисправные приводы не могут перемещать внешнюю нагрузку, а следовательно, возникает проблема ее перераспределения на соседние приводы для продолжения эксплуатации платформы согласно заданному закону управления $u(t)_{зад}$.

Таким образом, принципы выбора режима эксплуатации МПКС при частичном отказе систем приводом следующие:

1. Определить: текущее и прогнозное техническое состояние каждого исполнительного привода МПКС, количество и взаимное расположение исправных приводов МПКС друг относительно друга; текущую нагрузку на каждый исправный привод МПКС.

2. Оценить будущий уровень внешней нагрузки на каждый из исправных приводов и принять решение о возможности и целесообразности перераспределения нагрузки на соседние исправные приводы.

3. В случае принятия положительного решения необходимо для каждого исправного привода определить интегральный коэффициент $K_{инт}$, учитывающий техническое состояние, текущую и дополнительную нагрузку на привод. Умножение $K_{инт}$ на соответствующую статическую силу $F_{ст}$ предоставит возможность коррекции режима работы МПКС, обеспечив выполнение заданного закона управления $u(t)_{зад}$ при частичном отказе системы приводов (2.22):

$$F_i^* = F_{ст} K_{инт} + \Delta F_i. \quad (2.22)$$

Если все приводы исправны, то $K_{инт} = 1$, система функционирует в заданном программном режиме. Если часть приводов МПКС неисправна и коррекция целесообразна, то для каждого исправного привода рассчитывается свой $K_{инт}$ в зависимости от его технического состояния, текущей нагрузки и положения относительно неисправных приводов при выполнении условия статической устойчивости

4. При отрицательном решении необходимо отключить МПКС.

Введение интегрального коэффициента, корректирующего статическую составляющую управляющей силы, предоставит возможность реализовать управление МПКС при частичном отказе системы приводов.

2.4 Выводы по главе 2

1. Рассмотрена динамика МПКС различных кинематических структур, получена система уравнений, описывающая взаимосвязь управляющих сил и обобщенных координат платформы. Установлено, что для обеспечения заданного закона движения необходимо изменять управляющие силы, создаваемые каждым исполнительным приводом.

2. Рассмотрены статическая и динамическая составляющие управляющей силы, показано, что статическая сила определяется внешней нагрузкой на платформу и рассчитывается в зависимости от кинематической структуры МПКС, а динамическая отвечает за реализацию заданного закона движения.

3. Сформулирована проблема обеспечения заданного закона движения при частичном отказе системы приводов МПКС. Предложено в формулу расчета управляющей силы ввести интегральный коэффициент, учитывающий техническое состояние привода, нагрузку, количество и взаимное расположение неисправных приводов друг относительно друга.

Глава 3 Принципы построения систем оценки технического состояния приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры

3.1 Требования, предъявляемые к системам оценки технического состояния приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры

Современной мировой тенденцией является всеобщая глобализация и цифровизация всех сфер жизни, в том числе промышленного производства, сопровождающиеся активным внедрением компьютерных и информационно-коммуникационных технологий. В состав МПКС входит большое количество совместно работающих приводов. Для обеспечения заданного режима эксплуатации необходимо обеспечить согласованную работу, однако конструкция МПКС не предполагает их физическое соединение, поэтому внедрение цифровых технологий для взаимодействия систем приводов МПКС весьма актуально. Для организации эффективной эксплуатации МПКС важно обеспечить высокую эксплуатационную надежность их системы приводов. Выход из строя любого привода кинематической цепи может привести к деформациям или заклиниванию стоек МПКС, падению перемещаемого груза или неудовлетворительному качеству выполнения работ. Поэтому необходимо обеспечить непрерывный контроль технического состояния всех исполнительных приводов во взаимосвязи друг с другом. Решить данную проблему можно с применением киберфизической системы [164], осуществляющей анализ текущего и прогнозного состояния всех используемых приводов, принятие решения и корректировку режимов эксплуатации системы приводов МПКС с целью обеспечения надлежащего качества выполнения технологических операций и продления эксплуатационного ресурса оборудования.

В стандартной архитектуре систем автоматизации производства в течение

многих лет доминирует метод, включающий несколько различных уровней: от полевых производственных систем до уровня планирования общеорганизационных ресурсов [165]. Принципиальное отличие киберфизического способа управления производством от традиционного иерархического представлено на рисунке 3.1.

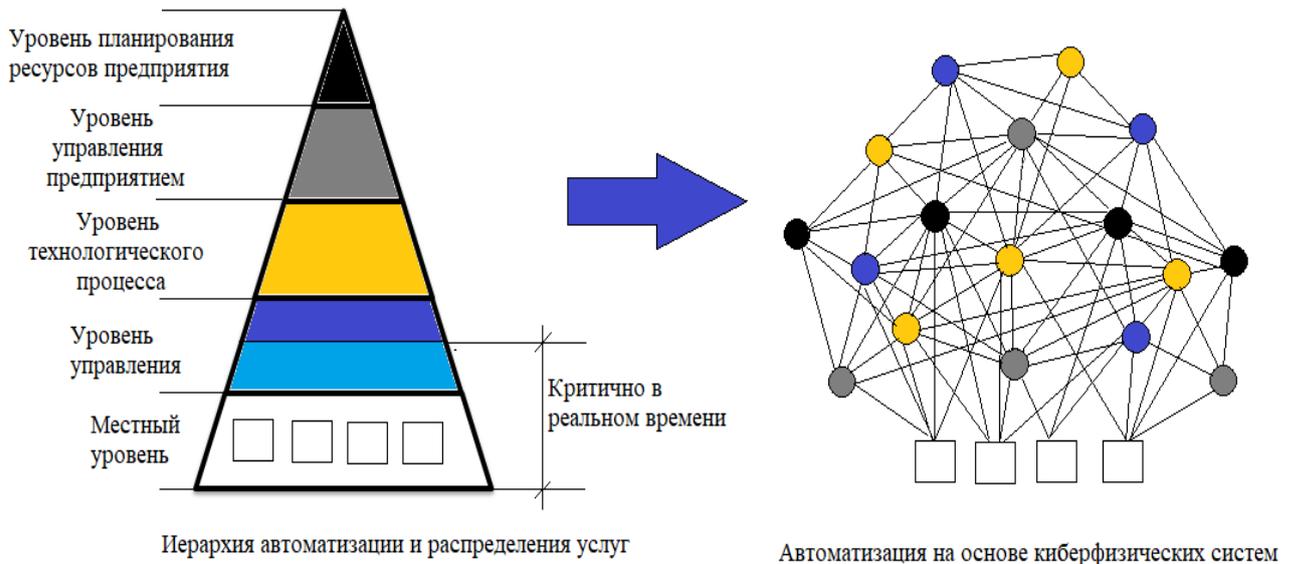


Рисунок 3.1 – Парадигма автоматизации производственных процессов на основе киберфизических систем

Традиционная иерархическая система автоматизации производственных процессов имеет пять уровней:

- местный уровень непосредственного исполнительного оборудования;
- уровень управления, включающий как управление на месте, так и верхний уровень управления;
- уровень технологического процесса;
- уровень управления предприятием;
- уровень планирования ресурсов предприятия.

Все уровни находятся в четкой иерархической связи друг с другом и предусматривают управление в режиме реального времени только за работой оборудования.

ния на месте (местный уровень). Остальные стадии управления, как правило, реализуются с существенными задержками, что снижает его эффективность.

В отличие от данной традиционной парадигмы, киберфизической способ предполагает наличие этих же пяти уровней, но находящихся в тесной взаимосвязи друг с другом. Все уровни системы работают синхронно в режиме реального времени, что существенно ускоряет процесс обработки информации и исключает простои из-за отсутствия ресурсов. Применение киберфизических производственных систем предъявляет специфические требования к каждому из уровней и не предусматривает участие человека в технологическом процессе.

Целью использования кибер-инфраструктуры, включающей сенсорное, вычислительное и коммуникационное аппаратно-программное обеспечение, является интеллектуальный мониторинг и управление всеми производственными процессами.

Киберфизическая система предполагает тесную связь кибернетических и физических объектов [166, 167]. В таблице 3.1 представлены основные различия между кибер-ресурсами и физическими объектами [168, 169].

Таблица 3.1 – Сравнение кибернетических и физических свойств объектов в составе производственной киберфизической системы

Характерный признак объекта	Кибернетические свойства объекта	Физические свойства объекта
Способ обеспечения правильного порядка функционирования	Действия выполняются последовательно не в реальном времени	Действия выполняются в режиме реального времени
Синхронизация событий	Синхронно	Асинхронно
Временные свойства	Дискретно	Непрерывно
Состав	Вычислительные абстракции	Физические законы

Концепция киберфизических систем описывает всестороннюю интеграцию физических объектов и цифровой обработки информации. В отличие от традиционных систем аппаратно-программного обеспечения киберфизические системы осуществляют непрерывное управление по обратной связи в режиме реального времени между

кибернетической и физической сферами, обеспечивая полуавтономный мониторинг и управление процессами [170]. Реализация данного способа предусматривает большое количество исполнительных механизмов со встроенными датчиками, а также наличие цифровой инфраструктуры, алгоритмов и возможностей обработки и хранения данных [171], что предоставляет широкие возможности для оптимизации существующих технологических процессов [172]. Киберфизические системы могут успешно применяться при организации производства [173], техническом обслуживании исполнительного оборудования [174], дают возможность осуществлять автоматическую оптимизацию технологического процесса [175] за счет интеграции интеллектуальных сетей [176] и цифровых двойников оборудования [177].

Киберфизические системы представляют собой «бесшовную» интеграцию кибернетических и физических объектов [178, 179], следовательно, имеют разделение на две сферы: кибернетическую и физическую. Кибернетическая сфера предусматривает наличие программного обеспечения и данных, в то время как физическая – содержит аппаратные средства и инструмент человеко-компьютерного взаимодействия (человеко-машинный интерфейс). Связующим звеном между этими двумя сферами является сеть. Концептуальная структура киберфизического взаимодействия систем приводов МПКС представлена на рисунке 3.2.

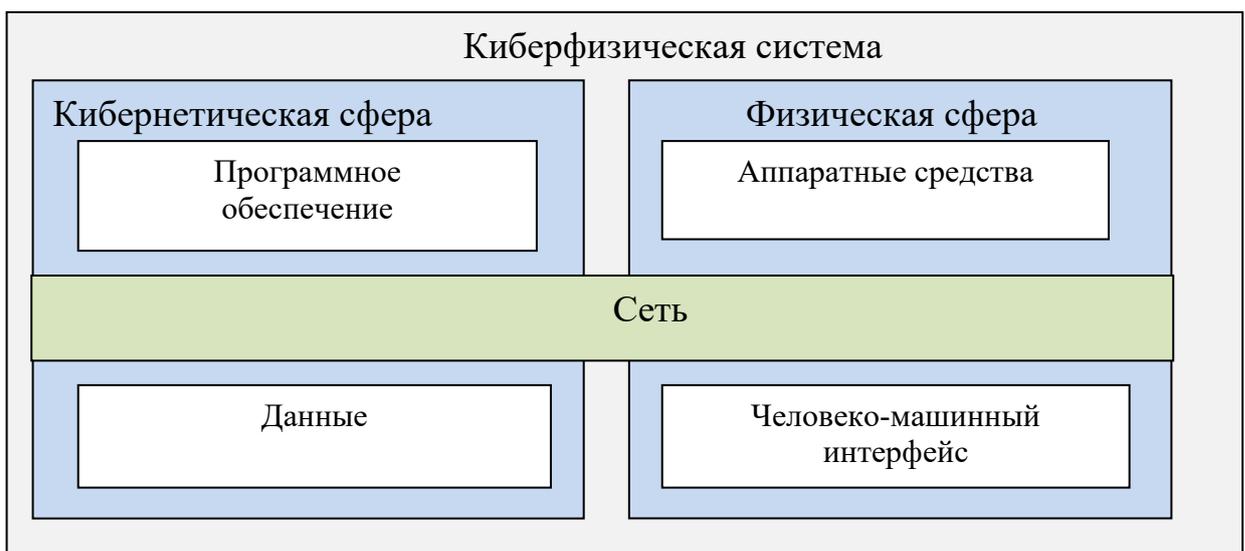


Рисунок 3.2 – Концептуальная структура киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов МПКС

Построение киберфизической производственной системы, использующейся в рамках концепции «Индустрия 4.0» [180], предполагает соблюдение следующих основных принципов:

1. Разработка киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов МПКС предлагает работу через Интернет на основе объектно-ориентированной эталонной архитектуры.
2. Интеллектуальная децентрализованная (самоорганизующаяся киберфизическая система) обеспечивает самостоятельное принятие решения.
3. Наличие человеко-машинного интерфейса, осуществляющего сбор и предоставление информации человеку.
4. Анализ данных в режиме реального времени.
5. Способность гибко адаптироваться к меняющимся требованиям путем замены или расширения отдельных модулей.
6. Использование алгоритмов и технологий больших данных в режиме реального времени.
7. Оптимизация производственного процесса на основе технологий больших данных для повышения общей эффективности оборудования.
8. Интеграция данных между модулями системы на протяжении жизненного цикла на основе стандартизированных моделей данных и модульного процесса проектирования.
9. Доступ к данным, безопасно хранящимся на сервере, в облаке или Интранете.

Киберфизические системы представляют собой интеграцию физических систем, датчиков и систем управления посредством Интернета [181]. Все функции перекладываются на аппаратно-программную часть системы, задачами которой является выбор конфигурации производственной системы, режима ее работы, контроль качества выполнения производственных операций за минимальное время. Для успешного выполнения данных задач киберфизическая система должна удовлетворять требованиям стабильности, безопасности и системности.

Стабильность означает, что киберфизическая система должна обеспечить

стабильную работу по замкнутому контуру на основе информации от датчиков, даже при наличии зашумленного сигнала или кибернетической атаки.

Безопасность означает, что система может преодолеть атаки киберфизического взаимодействия.

Системность означает, что система имеет бесшовную интеграцию датчиков и исполнительных механизмов [A182].

Киберфизическая система промышленного производства должна обеспечить надежность функционирования на каждом уровне, самоорганизацию, самообслуживание, самовосстановление, безопасность, дистанционную диагностику всех исполнительных элементов системы, контроль в реальном времени, автономную навигацию между уровнями системы, прозрачность, предсказуемость и эффективность [A183]. Для достижения этих целей необходимо включить в состав производственной системы (см. рисунок 3.1) киберфизическую подсистему, предоставляющую возможность в режиме реального времени определить текущее и прогнозное состояние исполнительных механизмов и выполнить оптимизацию режима работы системы приводов МПКС с целью поддержания их работоспособного состояния без остановки технологического процесса. Таким образом, для реализации киберфизической системы оценки технического состояния исполнительных приводов МПКС необходимо:

- сформулировать принципы построения и предложить структуру киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов МПКС;
- сформулировать принципы построения систем оценки технического состояния исполнительных приводов МПКС;
- сформулировать принципы синтеза отказоустойчивой системы приводов МПКС с учетом их технического состояния;
- сформулировать принципы построения информационной части киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов МПКС.

3.2 Принципы построения систем оценки технического состояния исполнительных приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры

Параллельные механизмы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и часто функционируют в сложных недетерминированных условиях, при высокой запыленности и влажности в широком диапазоне температур окружающей рабочей среды. Все эти факторы делают невозможным применение для оценки их технического состояния традиционных методов и устройств. Поэтому актуальной является задача разработки методов, не использующих сложные, громоздкие средства измерения и анализа диагностических параметров, адаптированные для применения в составе киберфизической системы в сети Интернет и удовлетворяющие требованиям, описанным в параграфе 1.2. В синтезируемой системе происходит объединение измерительной подсистемы, оборудования и информационной системы посредством стандартных интернет-протоколов. Данная система должна выполнять функции сбора и анализа диагностической информации, определение текущего и прогнозного состояния систем приводов МПКС, принятие решения об их самонастройке и адаптации к изменениям технического состояния. Решить данные задачи предоставит возможность разработка архитектуры системы оценки технического состояния приводов МПКС (см. рисунок 3.3), построенной на основе киберфизических принципов, содержащей пять функциональных уровней [A184, A185].

На уровне «Интеллектуальное соединение» происходит выбор диагностических параметров, методов и средств их измерения. Выбранные параметры должны обеспечить возможность выявить все основные неисправности приводов МПКС без использования сложного, громоздкого, дорогостоящего измерительного оборудования, которое может оказать влияние на движение объекта диагностирования.

Уровень «Обработка данных» предполагает необходимое преобразование сигналов с датчиков для их последующего анализа.



Рисунок 3.3 – Архитектура системы оценки технического состояния исполнительных приводов МПКС

Хранение информации о техническом состоянии и режимах эксплуатации объекта в облачном сервисе предоставит возможность оперативно собирать информацию со всех приводов системы, производить ее совместный анализ и принимать решение по выбору режима эксплуатации МПКС при частичном отказе систем приводов.

На уровне «Познание» синтезируются методы анализа выбранных диагностических параметров. Данные методы должны производить автоматическую обработку информации в режиме реального времени, сохранять результаты диагностики в облачном сервере для последующего совместного анализа и принятия решения по выбору режима эксплуатации МПКС.

На уровне «Конфигурация» происходит выбор и реализация режима эксплуатации МПКС с учетом технического состояния его системы приводов. Реализация данного уровня предполагает расчет интегрального коэффициента $K_{\text{инт}}$, предоставляющего возможность коррекции значений управляющих сил F_i для каждого исправного привода и параметров движения МПКС.

Предлагаемая архитектура киберфизической системы логически вписывается в общую парадигму автоматизации технологических процессов на основе киберфизических систем (см. рисунок 3.4).

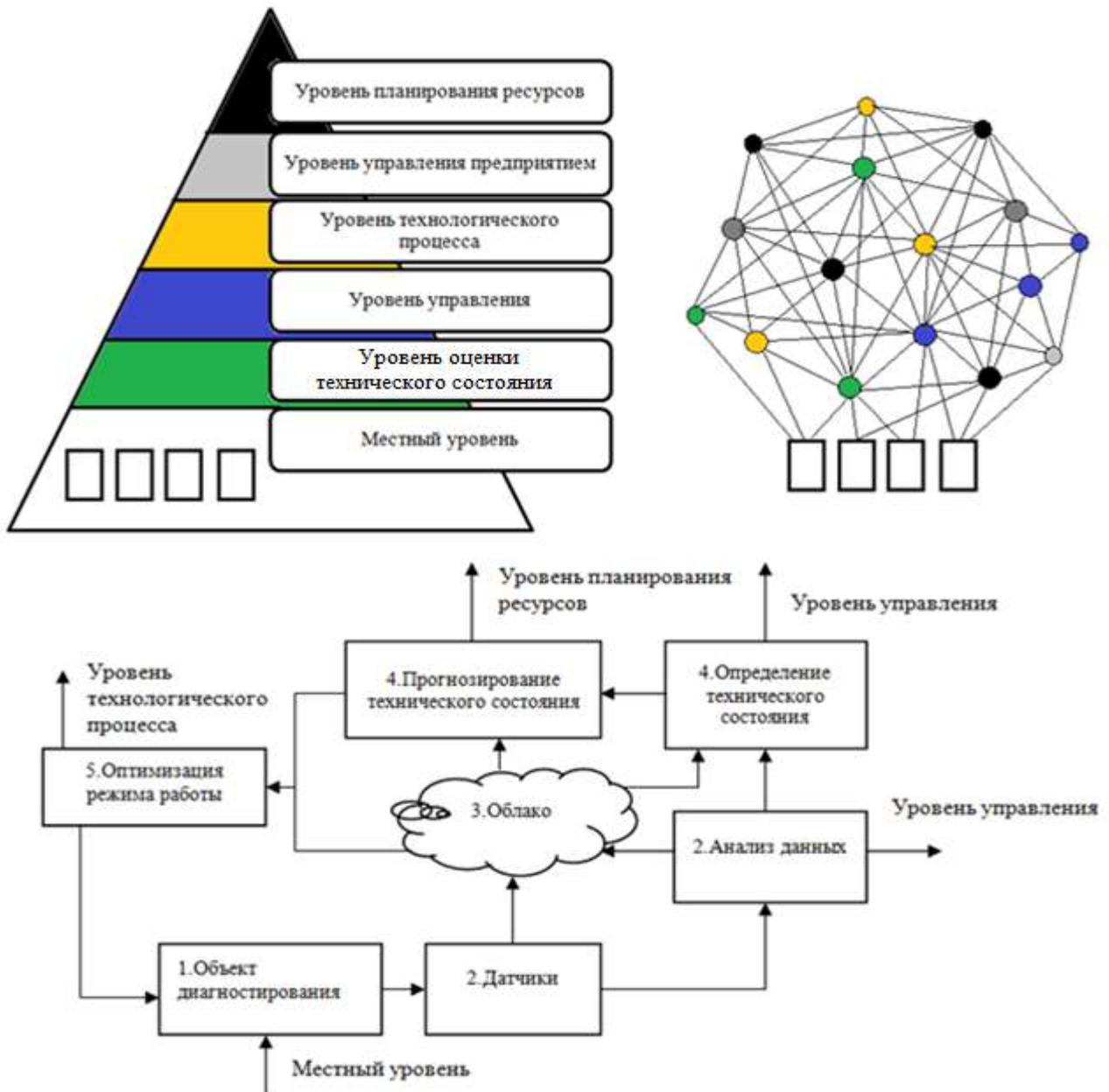


Рисунок 3.4 – Киберфизическая система оценки технического состояния в общей парадигме автоматизации технологических процессов

Уровень оценки технического состояния систем приводов МПКС расположен между местным уровнем и уровнем управления в общей иерархии управления предприятием. Все шесть уровней взаимосвязаны между собой. Местный уровень представляет собой систему приводов МПКС, которые являются объектами диагностирования. Результаты анализа данных, полученных при измерении диагностических параметров, связаны с уровнем управления [186]. Результаты прогнозирования состояния систем

приводов МПКС связаны с уровнем планирования ресурсов, что предоставит возможность технически обоснованно планировать закупку запасных частей, ремонт и техническое обслуживание оборудования. Результаты принятия решения по изменению режима работы МПКС связаны с уровнем технологического процесса, что предоставляет возможность выбрать и реализовать режим работы технологического оборудования.

Киберфизическая система оценки технического состояния приводов МПКС состоит из двух частей: физической и кибернетической. Уровни «Интеллектуальное соединение», «Облачный» и «Когнитивный» относятся к физической части. «Обработка данных» и «Конфигурация» реализуются совместно физической и кибернетической частями системы. Функциональная схема киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов МПКС может быть получена разделением общей системы на две указанные части (см. рисунок 3.5).

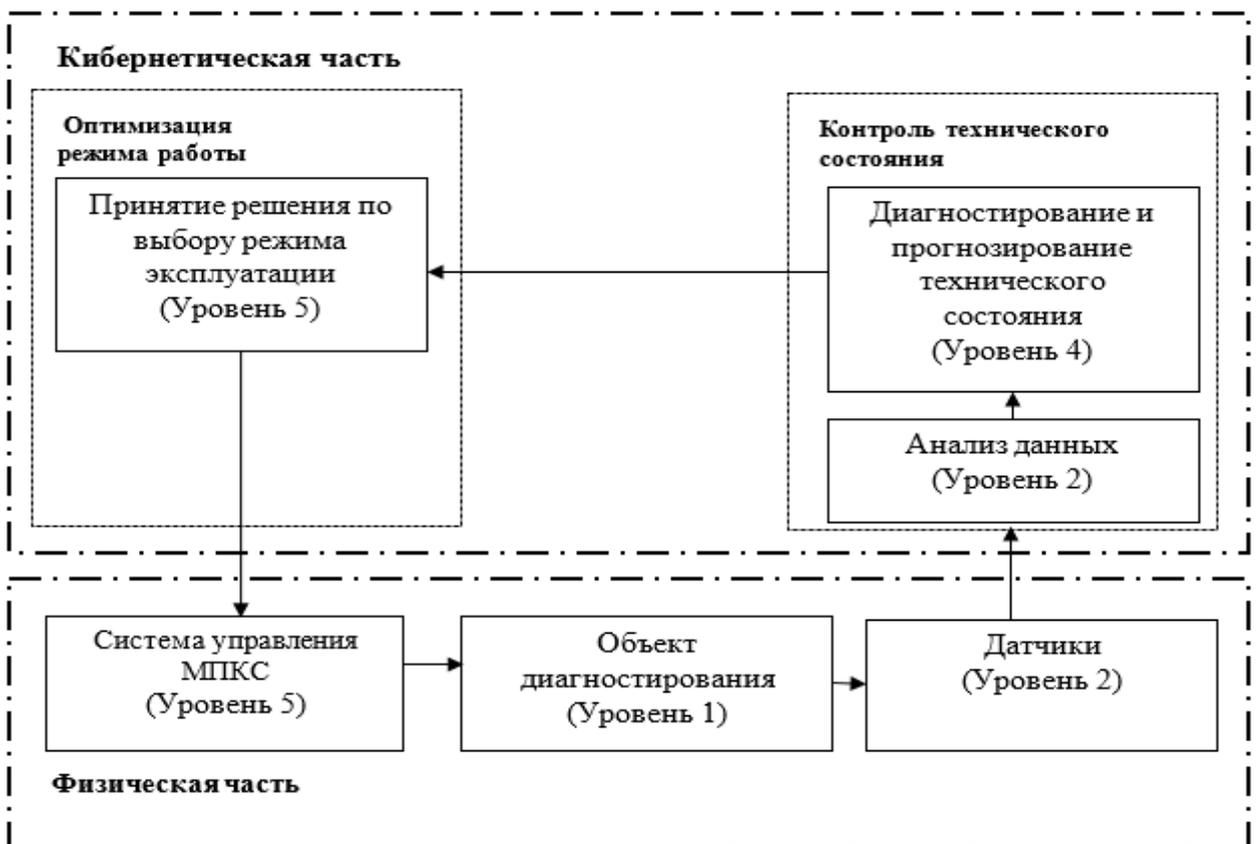


Рисунок 3.5 – Функциональная схема киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов МПКС

Физическая часть объединяет исполнительный привод, контрольно-измерительное диагностическое оборудование и аппаратную часть системы управления МПКС. К функциям данной части системы относятся:

- выполнение заданного технологического процесса;
- получение исходной диагностической информации с технологического оборудования;
- непосредственное изменение режима работы МПКС по результатам анализа технического состояния его системы приводов.

Все вычислительные и аналитические функции системы выполняются с помощью кибернетической части. Согласно требованиям, предъявленным к синтезируемой киберфизической системе, кибернетическая часть системы включает:

- обработку и анализ диагностической информации, полученной с физического уровня системы;
- определение текущего и прогнозного состояния каждого привода МПКС;
- принятие решения по выбору дальнейшего режима эксплуатации оборудования с учетом текущего и прогнозного состояния его системы приводов.

Разработка киберфизической системы оценки технического состояния приводов МПКС предполагает тщательную проработку кибернетического уровня, а именно: разработку методов анализа диагностической информации, методов идентификации состояния объекта, принятия решения по выбору дальнейшего режима эксплуатации оборудования. Для этого необходимо разработать принципы построения подсистем контроля технического состояния и принятия решения о целесообразности изменения режима эксплуатации МПКС в зависимости от технического состояния их систем приводов. Также важной задачей является перераспределение функций кибернетической части по исполнительным уровням системы. Функции, связанные с отдельными исполнительными элементами, должны выполняться на нижнем уровне, соединенном с объектом диагностирования, а принятие решения и коррекция режима работы МПКС – на верхнем «Облачном» уровне системы.

3.3 Принципы построения систем оценки технического состояния машин и механизмов параллельной кинематической структуры

В процессе функционирования МПКС необходимо обеспечить высокую надежность систем приводов, которая может быть достигнута с помощью постоянного мониторинга и оценки технического состояния.

Исследование существующих методов к диагностированию систем приводов МПКС предоставило возможность выбрать параметры тока и/или вибрации для оценки текущего и прогнозного состояния электрических и гидравлических приводов. Анализ данных параметров предоставляет возможность выявить все основные неисправности объекта диагностирования без применения сложных, громоздких и дорогостоящих технических средств. Однако существующие методы оценки токового и вибрационного сигнала не могут быть использованы в режиме реального времени ввиду их сложности и невозможности автоматизации процесса анализа. Поэтому необходимо провести поисковые исследования методов анализа сигналов тока и вибрации, удовлетворяющие сформулированным требованиям (см. гл. 1).

Совместное использование диагностирования и прогнозирования технического состояния предоставит возможность определить причину и точное время будущего отказа систем приводов МПКС, что даст возможность технически обоснованно планировать их замену, избежать внезапного сбоя и остановки оборудования, тем самым существенно повысить надежность и безопасность эксплуатации технологического оборудования.

Структура системы оценки технического состояния приводов МПКС приведена на рисунке 3.6. Для ее реализации необходимо разработать метод диагностирования систем приводов по параметру питающего тока и вибрации в режиме реального времени, а также краткосрочного и долгосрочного прогнозирования развития дефектов. Информация о текущем состоянии привода и количестве периодов сохранения работоспособности, полученная в результате долгосрочного прогнозирования, будет использоваться при выборе режима эксплуатации систем приводов МПКС.



Рисунок 3.6 – Структура системы оценки технического состояния систем приводов МПКС

Согласно концепции построения киберфизических систем все операции должны выполняться в режиме реального времени и быть максимально понятными пользователю. Поэтому для долгосрочного прогнозирования технического состояния приводов МПКС целесообразно выбрать метод, основанный на статистической классификации и распознавании образов, что предоставит возможность отнести спрогнозированное техническое состояние к одному из заранее сформированным классам диагнозов. Исходными данными для прогнозирования будут результаты диагностирования за N предыдущих периодов эксплуатации привода, распределенные по равным временным интервалам. Техническое состояние привода можно представить в виде дискретно изменяющейся многомерной функции $y^i(t)$ в период времени

$t_0 \in [0, t_n]$ в области T_1 . Известны значения функции в соответствующие моменты времени $y'(t_1), y'(t_2), \dots, y'(t_n)$. Тогда задача прогнозирования заключается в определении значения введенной функции в последующие моменты времени $y'(t_n + 1), y'(t_n + 2), \dots, y'(t_n + N)$. Одним из перспективных вариантов решения данной задачи является применение нейронных сетей, предоставляющим возможность исследовать зависимость прогнозируемой величины относительного диагностического параметра во времени [А187]. Реализация методов статистической классификации образов предоставит возможность определить значение диагностического параметра в последующий период эксплуатации $y'(t_n + 1)$, а также рассчитать количество периодов сохранения работоспособности T , тем самым реализовать как краткосрочное, так и долгосрочное прогнозирование состояния приводов системы.

В этом случае система контроля технического состояния строится на соблюдении следующих принципов:

1. Использование тока и вибрации систем приводов для диагностирования их технического состояния.
2. Оценка текущего и прогнозного технического состояния выполняется без участия человека исключительно с помощью программных средств в режиме реального времени.
3. Краткосрочное и долгосрочное прогнозирование технического состояния реализуется на базе методов статистической классификации образов с применением искусственных нейронных сетей.

3.4 Принципы синтеза отказоустойчивых систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Результатом оценки технического состояния (см. рисунок 3.6) будет результат диагностирования и прогнозирования всех приводов МПКС. Синтез отказоустойчивой системы приводов предполагает наличие возможности резервирова-

ния, однако конструкция МПКС не предполагает включение в состав системы дополнительных приводов, поэтому единственным вариантом резервирования является нагрузочное, предполагающее работу привода при частичном нагружении. Такой способ предоставит возможность в случае возникновения отказов осуществлять перераспределение нагрузки на исправные приводы. Для этого необходимо реализовать принятие решения по выбору режима эксплуатации на основе информации о количестве и взаимном расположении исправных приводов и режимов их нагружения, что даст возможность рассчитать допустимую дополнительную нагрузку на исправные приводы МПКС с целью недопущения их перегрузки и преждевременного отказа. Одним из направлений решения данной задачи является применение эвристических методов, основанных на совместном использовании традиционного математического аппарата и средств искусственного интеллекта [А188-А194]. Применение аппарата нечеткой логики предопределяет возможность, используя эвристическую исходную информацию, создать эффективную высокоточную математическую модель и получать адекватные результаты вычислений.

Для синтеза отказоустойчивых систем приводов МПКС необходимо:

- сформулировать критерии оптимизации режима эксплуатации МПКС при частичном отказе систем приводов и сформулировать необходимые граничные условия;
- идентифицировать текущее техническое состояние каждого привода МПКС, а также количество и взаимное расположение исправных приводов друг относительно друга;
- для каждого из исправных приводов МПКС определить количество периодов сохранения работоспособности и текущую нагрузку;
- при частичном отказе МПКС определить дополнительную нагрузку на все исправные приводы;
- на основании всей полученной информации принять решение о возможности коррекции режима эксплуатации системы приводов МПКС и продолжении эксплуатации без ущерба для исправных приводов;

– для каждого исправного привода системы рассчитать интегральный коэффициент $K_{\text{инт}}$ и произвести коррекцию режима эксплуатации МПКС.

Функциональная схема отказоустойчивой системы приводов МПКС представлена на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Функциональная схема отказоустойчивой системы приводов МПКС

Реализация отказоустойчивой системы приводов МПКС строится на соблюдении следующих фундаментальных принципов:

1. Все вычислительные операции в системе выполняются без непосредственного участия человека исключительно с помощью программных средств в режиме реального времени.

2. Определение текущей и дополнительной нагрузки на приводы МПКС, а также принятие решения по выбору режима его эксплуатации реализуются с применением эвристических принципов на базе аппарата нечеткой логики.

Синтез интеллектуальной системы оптимизации режима эксплуатации МПКС с учетом технического состояния систем приводов предусматривает разработку модели перераспределения нагрузок на приводы, на основе которой будет приниматься решение о режиме дальнейшей эксплуатации оборудования.

3.5 Принципы построения информационной части системы оценки технического состояния приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры

Киберфизическая система предполагает объединение кибернетической и физической частей посредством сети (см. рисунок 3.8).

Кибернетическая часть включает в себя блоки «Программное обеспечение» и «Данные». Программное обеспечение разделено на внешнее и внутреннее. Внешнее программное обеспечение представляет собой веб-интерфейс, внутреннее – предназначено для непосредственной реализации методов диагностирования и прогнозирования, а также выбора режима эксплуатации МПКС при частичном отказе систем приводов.

Блок «Данные» включает модуль генерирования данных, предназначенный для сбора информации с датчиков исполнительных приводов, и модуль базы данных, хранящий результаты оценки текущего и прогнозного технического состояния приводов МПКС. Модули физической сферы содержат «Аппаратное обеспечение» и «Человеко-машинный интерфейс».

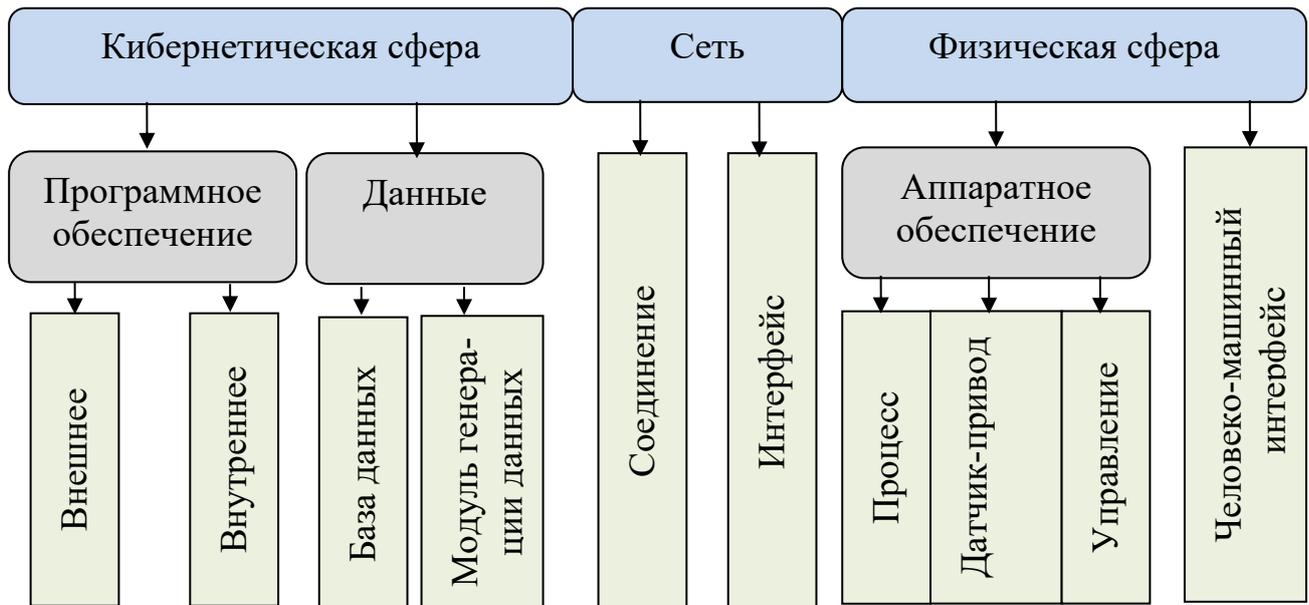


Рисунок 3.8 – Компоненты производственной киберфизической системы

Блок «Аппаратное обеспечение» включает:

- модуль «Процесс», задающий технологический процесс, выполняемый оборудованием;
- модуль «Датчик-привод», выполняющий основные функции технологического процесса;
- модуль «Управление» системой приводов МПКС.

Связующим звеном между кибернетической и физической частями системы являются «Соединители» модулей и «Интерфейсы». «Соединители» предназначены для целенаправленной интеграции отдельных компонентов в единую систему, а «Интерфейсы» обеспечивают взаимодействие между кибернетической и физической частями системы.

Основная функциональная нагрузка по обеспечению работы киберфизической системы выполняется кибернетической частью. Согласно предложенным принципам разработки системы оценки технического состояния и отказоустойчивой системы приводов МПКС с оптимизацией режима эксплуатации, происходит измерение тока и/или вибрации каждого привода и его последующий анализ с по-

мощью методов диагностирования и прогнозирования. Полученные результаты используются для принятия решения о режиме дальнейшей эксплуатации приводов МПКС. В случае невозможности перенастройки оборудования принимается решение об отключении МПКС. Таким образом, структура обработки информации в киберфизической системе оценки технического состояния систем приводов МПКС будет иметь вид, представленный на рисунке 3.9.

Физическая часть киберфизической системы представлена блоком «Аппаратные средства», который включает непосредственно объект диагностирования (приводы), датчики для измерения выбранных диагностических параметров и систему управления МПКС (см. рисунок 3.5).

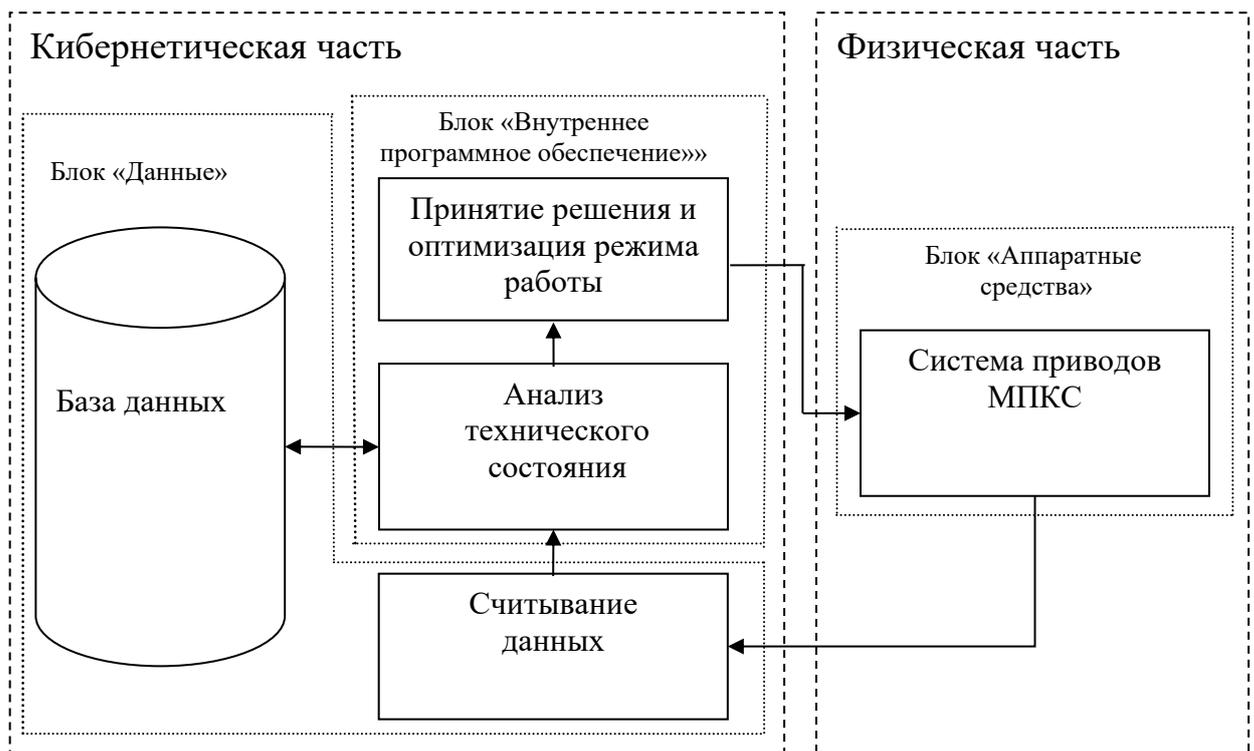


Рисунок 3.9 – Структура обработки информации в киберфизической системе оценки технического состояния систем приводов МПКС

Блоки «Данные» и «Внутреннее программное обеспечение» являются кибернетической частью системы. Первый из них осуществляет считывание диагностической информации и хранение в базе данных результатов диагностирования за

предыдущие периоды эксплуатации МПКС, используемых для прогнозирования технического состояния. Во втором блоке выполняется анализ технического состояния всех приводов в настоящем и будущем, а также принятие решения и оптимизация режима его эксплуатации МПКС.

Все компоненты, представленные на схеме (см. рисунок 3.9), являются стандартными для производственных киберфизических систем [195], что предоставляет возможность реализовать бесшовную интеграцию синтезируемой киберфизической системы оценки технического приводов МПКС в схему управления технологическим процессом, реализовав требования системности, безопасности и надежности. Если системы приводов МПКС находятся на значительном удалении друг от друга, а функции блока «Внутреннее программное обеспечение» относятся как к отдельным приводам, так и к МПКС в целом, то необходимо их перераспределение по исполнительным уровням системы (см. рисунок 3.10).

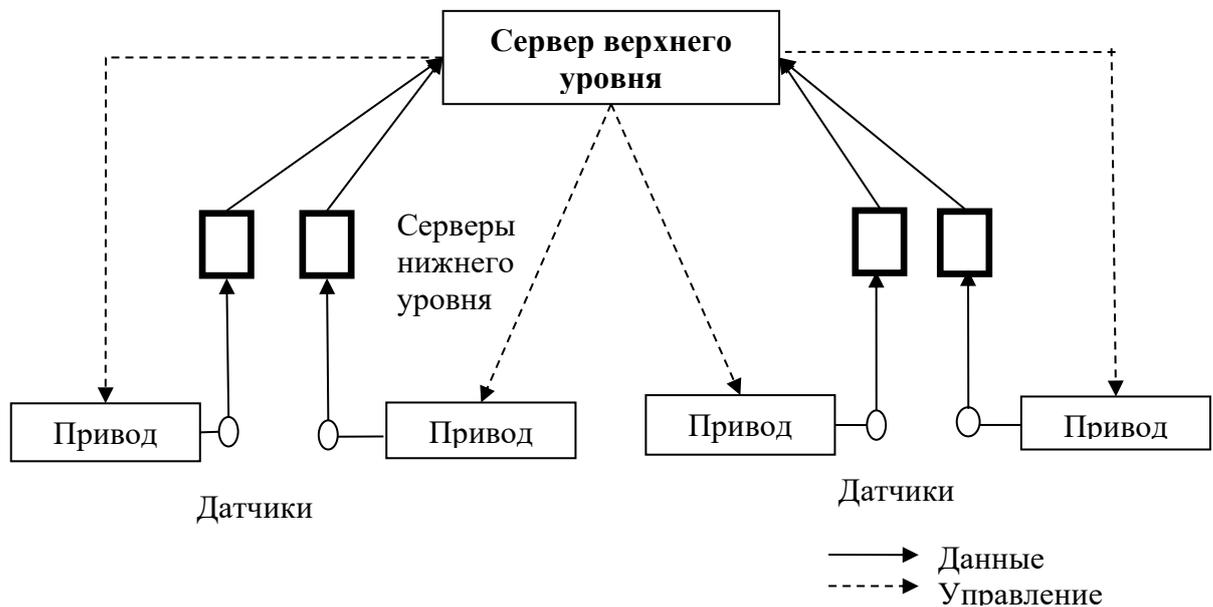


Рисунок 3.10 – Структура кибернетической системы оценки технического состояния приводов МПКС

Функции, связанные с отдельными приводами системы, должны выполняться серверами нижнего уровня, а оптимизация режима работы МПКС – серверами верхнего уровня или облачными сервисами.

Для реализации задач данной диссертационной работы необходимо выполнить синтез блока «Внутреннее программное обеспечение», который реализует методы оценки технического состояния, принятия решения и коррекцию режима эксплуатации МПКС с частичным отказом системы приводов.

Для этого необходимо:

- разработать концепцию моделирования технического состояния приводов МПКС в составе киберфизической системы;
- разработать метод оценки текущего и прогнозного технического состояния приводов МПКС в составе киберфизической системы;
- исследовать возможности повышения надежности МПКС для синтеза отказоустойчивой системы приводов;
- сформулировать критерии оптимизации режима эксплуатации МПКС с учетом технического состояния их системы приводов;
- разработать модели определения текущей и дополнительной нагрузки на приводы МПКС;
- разработать метод и алгоритм интеллектуального принятия решения по выбору режима эксплуатации МПКС с учетом фактического и прогнозного состояния их систем приводов;
- вывести формальную зависимость интегрального коэффициента технического состояния приводов МПКС для реализации управления при частичном отказе системы приводов;
- разработать архитектуру киберфизической системы оценки технического состояния с последующей оптимизацией режима эксплуатации МПКС;
- разработать рекомендации по проектированию отказоустойчивых систем приводов МПКС с учетом их технического состояния.

Реализация данных задач должна базироваться на следующих принципах:

- использование тока и/или вибрации приводов для диагностирования и прогнозирования их технического состояния в режиме реального времени;
- все необходимые вычислительные операции выполняются без участия

человека исключительно с помощью программных средств с применением эвристических подходов и методов искусственного интеллекта в режиме реального времени.

3.6 Выводы по главе 3

1. Обоснована актуальность и целесообразность применения киберфизических систем оценки технического состояния исполнительных приводов МПКС. Рассмотрены основные компоненты, входящие в состав киберфизических систем и сформулированы основные требования к ним.

2. Предложена структура системы оценки технического состояния, содержащая пять уровней: соединение, преобразование, облачный, познание (когнитивный) и конфигурация. Постоянный обмен информацией между уровнями системы с помощью интернет-протоколов предоставит возможность определить фактическое и прогнозное состояние приводов и оптимизировать режим эксплуатации МПКС.

3. Сформулированы принципы построения системы оценки технического состояния, предусматривающие анализ сигнала тока или вибрации привода, используя сочетание традиционных математических методов с искусственными нейронными сетями в режиме реального времени. Такой подход предоставит возможность с высокой точностью определить техническое текущее состояние, неисправности приводов МПКС, а также количество периодов сохранения работоспособности.

4. Применение нагрузочного резервирования и оптимизации режима эксплуатации с учетом текущей и дополнительной нагрузки на каждый исполнительный привод предоставит возможность получить отказоустойчивую систему приводов МПКС.

5. Предложена структура информационной части системы оценки технического состояния приводов МПКС, определены этапы разработки и сформулированы основные принципы синтеза, предусматривающие анализ сигналов тока или вибрации, проведение необходимых вычислительных операций исключительно с помощью программных средств с применением эвристических подходов, реализованных с помощью методов искусственного интеллекта в режиме реального времени.

Глава 4 Метод оценки технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры

4.1 Принципы моделирования технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Длительная эксплуатация МПКС в условиях экстремальных нагрузок приводит к преждевременному повреждению и износу их исполнительных элементов, что зачастую является основной причиной длительных простоев технологического оборудования и существенных финансовых потерь. Наиболее перспективным вариантом решения данной проблемы является непрерывный контроль технического состояния всех исполнительных приводов МПКС с применением методов технического диагностирования. Разрабатываемые методы должны быть реализуемы в процессе эксплуатации оборудования, не оказывать на него существенного влияния, нарушающего заданный технологический процесс, и функционировать в режиме реального времени. В ходе анализа существующих методов диагностирования установлены методы, удовлетворяющие большинству сформулированных требований. Данные методы основаны на анализе параметров тока и вибрации приводов. Исследование тока электропривода предоставляет возможность выявить все его основные неисправности как электрического, так и механического происхождения. Внешняя нагрузка, действующая на электрические приводы МПКС, пропорциональна току, поэтому анализ данного параметра предоставит возможность косвенно оценить режим их эксплуатации. Анализ вибрации более применим для диагностирования гидравлических приводов. При этом он не предоставляет возможность оценить нагрузку на гидропривод, и для реализации данной задачи необходимо дополнительно выполнить анализ давления гидросистемы [А196].

Классическим методом анализа параметров тока и вибрации является Фурье-преобразование [9], который весьма трудоемок и имеет следующие недостатки [197]:

- предоставляет информацию о частоте, которая содержится в сигнале,

но не может определить время появления этой частоты;

- при изменении режима работы привода происходят колебания сигнала во всем частотном диапазоне спектра, а также генерация «паразитных» высокочастотных составляющих, что может дать ошибочный диагноз;

- анализ результатов измерений весьма сложен и трудоемок, требует привлечения опытного специалиста-эксперта, что делает невозможным применение метода в режиме реального времени при киберфизическом взаимодействии систем приводов МПКС.

Альтернативой данному методу является вейвлет-анализ, который предоставляет возможность получить двумерную развертку одномерных сигналов по времени и частоте независимо друг от друга. Исходя из этого, концепция моделирования технического состояния систем приводов МПКС строится на том, что вейвлет-преобразование токового сигнала предоставит возможность разработать методы определения текущего и прогнозного технического состояния приводов МПКС, удовлетворяющие ограничениям (см. параграф 1.2), связанным с функционированием в режиме реального времени.

4.2 Метод оценки текущего технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Для исследования локальных особенностей сигналов тока и вибрации приводов для разработки инновационного метода диагностирования, предоставляющего возможность определить основные неисправности и определить режим эксплуатации в режиме реального времени, вейвлет-преобразование предоставляет возможность представить сигнал в системе базисных функций (4.1) [A198-A204]:

$$\psi_{ab}(t) = (\psi\left(\frac{t-b}{a}\right))/\sqrt{a}, \quad (4.1)$$

где $\psi(t)$ – функция базового (материнского); b – сдвиг базовой функции во времени; a – масштаб вейвлета; $1/\sqrt{a}$ – множитель, обеспечивающий независимость функции материнского вейвлета от ее масштаба.

Значение a обратно пропорционально собственной частоте исследуемого сигнала ω (4.2) (см. рисунок 4.1):

$$a = K_{\Pi} \cdot \omega^{-1}, \quad (4.2)$$

где K_{Π} – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа материнского вейвлета, определяемый согласно таблице, приведенной в [A205].

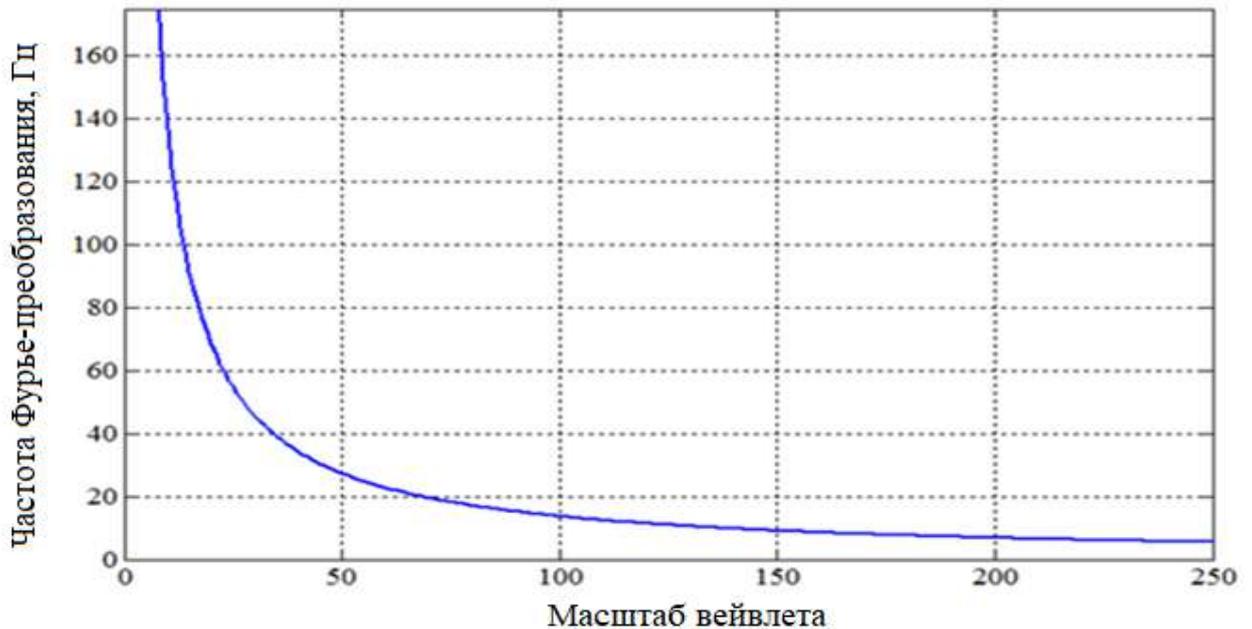


Рисунок 4.1 – Взаимосвязь между частотами Фурье анализа и масштабами вейвлета

Соотношение (4.2) предоставляет возможность переводить частоты, используемые в Фурье – анализе сигнала, в масштабы вейвлета, тем самым использовать имеющийся опыт частотного анализа сигналов, накопленный за долгие годы его использования [A206, A207]. Результат пересчета частот Фурье-преобразования [A208] в масштаб вейвлета зависит исключительно от коэффициента пропорциональности K_{Π} , определяемого типом базовой функции вейвлета [A209]. Например, для вейвлета Морле $K_{\Pi} = \sqrt{3/2}$, "Мексиканская шляпа" – $K_{\Pi} = \sqrt{5/2}$ [A210].

Исследование вейвлет-коэффициентов на полученных характерных масштабах, связанных с конкретными неисправностями сервопривода, предоставляет возможность определить новые свойства сигнала и установить

неизвестные ранее закономерности. Предполагается, что установленные закономерности дадут возможность синтезировать новые высокоточные методы определения текущего и прогнозного технического состояния приводов МПКС, поиска возникших неисправностей и определение внешней нагрузки в режиме реального времени и без привлечения человека-эксперта. Для подтверждения данной гипотезы необходимо провести ряд экспериментальных исследований по вейвлет анализу сигнала тока и вибрации электрических и гидравлических приводов с различными неисправностями (см. таблицу 1.2) при различных условиях нагружения привода.

4.2.1 Экспериментальные исследования электрических приводов при различной нагрузке по параметру тока

Первая часть экспериментов предполагает поиск электрической неисправности электропривода при анализе вейвлет - коэффициентов токового сигнала на характерных масштабах. Для реализации данного эксперимента использована машина трения (см. рисунок 4.2), состоящая из двух одинаковых синхронных приводов PITTMAN 5413.



Рисунок 4.2 – Лабораторная установка для исследования электроприводов под нагрузкой

Один из приводов является ведущим (исследуемым), а второй – нагрузочным. Нагрузка на исследуемый привод создается вращением нагрузочного привода в противоположном направлении, а также установкой дополнительных грузов на платформу, жестко соединенную с нагрузочным приводом (см. рисунок 4.3).

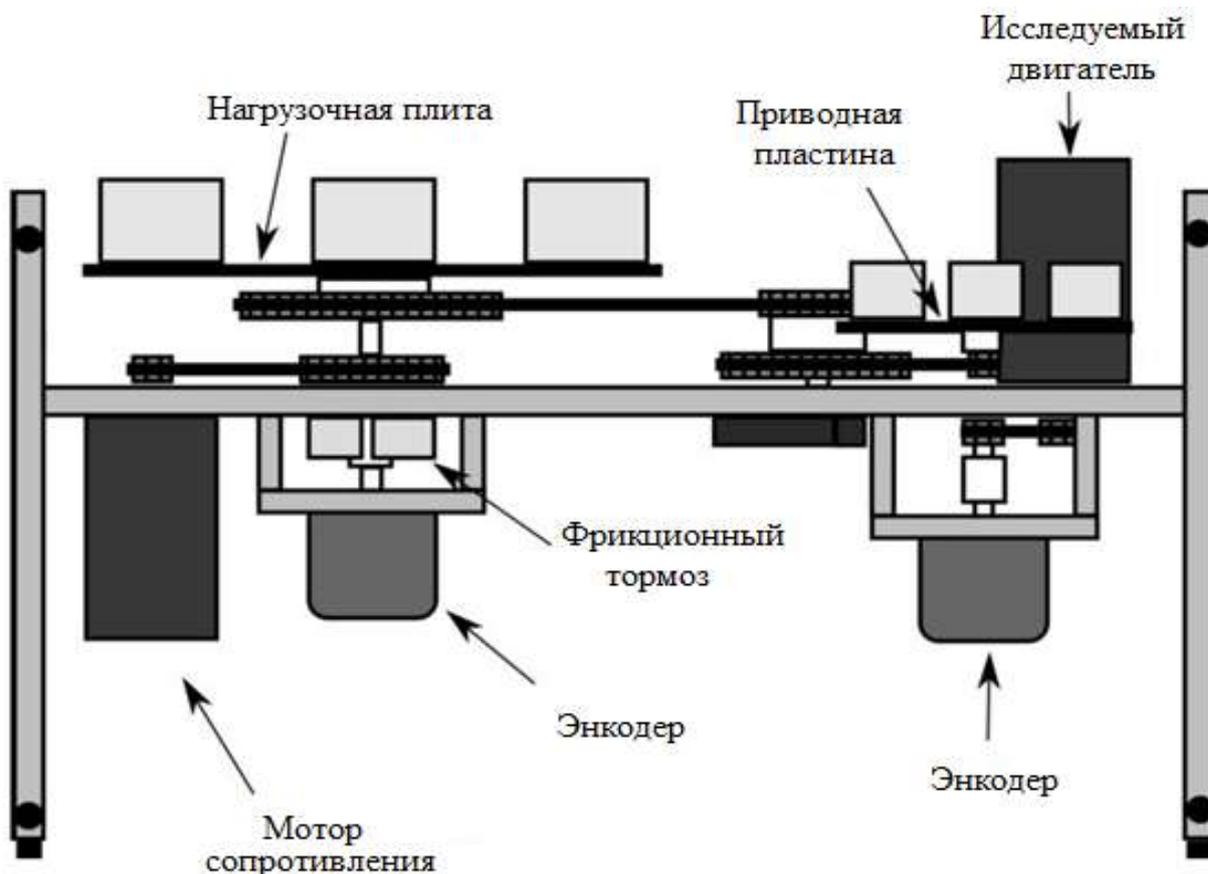


Рисунок 4.3 – Схема функционирования лабораторной установки для исследования сервоприводов под нагрузкой

Скорости вращения ведущего и нагрузочного приводов измеряются с помощью энкодеров, встроенных в сервоприводы, которые соединены посредством ременной передачи (см. рисунок 4.4).

В процессе экспериментальных исследований необходимо изучить следующие состояния привода: исправен, но не нагружен; исправен и нагружен; неисправен, но не нагружен; исправен и нагружен.

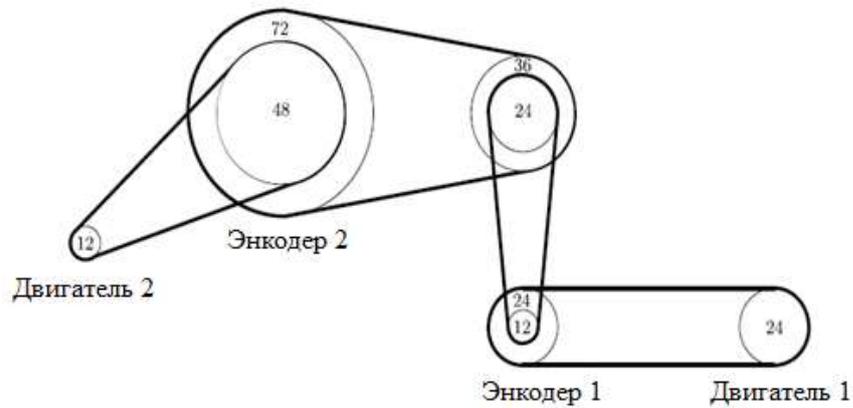


Рисунок 4.4 – Механическая подсистема экспериментальной установки

Для имитации обрыва обмотки статора сервопривода в фазу «А» введено добавочное сопротивление. Данная неисправность имеет электрическую природу и ее информативной характеристикой являются скачки напряжения на проводах питания сервопривода, для идентификации которых необходимо выполнять измерения емкостного тока на землю (см. рисунок 4.5) [A211].

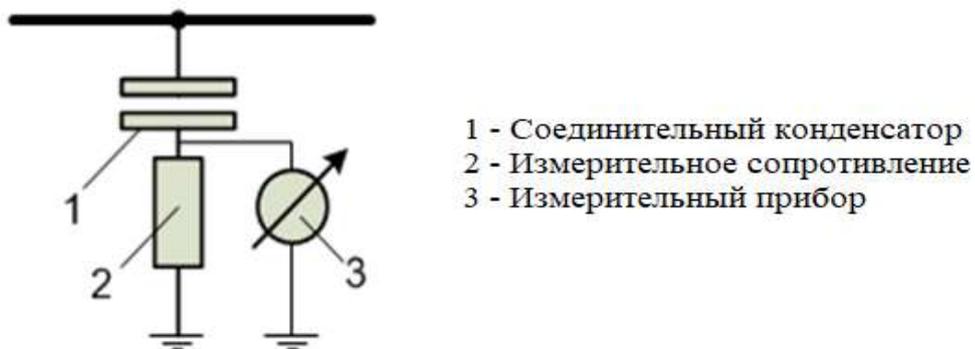


Рисунок 4.5 – Схема гальванического подключения для измерения емкостных токов на землю

Измерения емкостного тока на землю осуществлялось в фазах А, и Б обмотки статора. Проведено четыре эксперимента (см. таблица 4.1), в которых исследуемый сервопривод вращается с постоянной скоростью 3 об/с.

Традиционный метод анализа емкостного тока выполняется с помощью Фурье-преобразования [A212, A213], предполагающего вычисление характерных частот (см. таблица 4.2) и анализ амплитуды токового сигнала на них.

Таблица 4.1 – Условия экспериментальных исследований сервопривода

Номер опыта	Скорость вращения диагностируемого привода, об/с	Состояние исследуемого привода	Скорость вращения привода сопротивления. об/с
1	3	Исправен	отключен
2	3	Исправен	1
3	3	Сопротивление 2 Ом в обмотке статора	отключен
4	3	Сопротивление 2 Ом в обмотке статора	1

Таблица 4.2 – Характерные частоты Фурье-анализа сигналов тока и/или вибрации электрического привода

Неисправности сервопривода	Частота токового сигнала
Дефекты коммутации	$2 \cdot q \cdot p_{дв} \cdot f_r; q \cdot f_r;$
Дефекты ротора	$2 \cdot p_{дв} \cdot f_r;$ $q \cdot f_r \pm 2 \cdot p_{дв} \cdot f_r;$
Пульсация напряжения питания	$q \cdot f_s;$
Дефекты статора	$2 \cdot f_s;$
Неисправности подшипников качения	$0,4 \cdot f_r \cdot r ;$ $0,6 \cdot f_r \cdot r ;$ $0,4 \cdot f_r$

Исходной информацией для расчета являются: f_s – частота сети, питающей выпрямитель, Гц; f_r – частота вращения ротора электропривода, Гц; $q = 1, 2, 3$ – номер гармоники тока; $p_{дв}$ – число полюсов электропривода; r – число тел качения в подшипниках.

Для исследования особенностей токового сигнала при различных условиях нагружения с помощью вейвлет-преобразования необходимо произвести расчет характерных частот Фурье-преобразования согласно таблице 3.2 и перевести их в масштаб вейвлета согласно (4.1). В качестве материнского вейвлета может быть использована любая известная функция [А214]. Пример расчета характерных масштабов диагностирования для сервопривода PITTMAN 5413, вращающегося с частотой вращения 3 об/с, приведен в таблице 4.3.

Таблица. 4.3 – Соответствие характерных частот Фурье преобразования и масштаба вейвлета

Неисправность	Частота Фурье спектра	Масштаб вейвлета Морле
Дефекты коммутации	24	48
	48	24
	72	16
Дефекты ротора	24	48
	27	43
	30	39
	33	35
Пульсации напряжения питания	50	23
	100	12
	150	8
Дефекты статора	3	386
	6	193
	9	129

Предполагается, что анализ вейвлет-коэффициентов на рассчитанных масштабах даст возможность определить новые свойства сигнала, а четкое соотнесение масштаба с частотами Фурье-преобразования – установить причину возникшей неисправности.

Для проверки данной гипотезы необходимо осуществить сравнительный анализ вейвлет-коэффициентов токового сигнала на характерных масштабах при различных технических состояниях (см. таблицу 4.1, опыты 2 – 4) с аналогичными для исправного ненагруженного привода (см. таблицу 4.1, опыт 1). На рисунке 4.6 представлены графики вейвлет-коэффициентов емкостного тока для одного из масштабов, характерных для неисправности статора (таблица 4.3). Вейвлет-коэффициенты исправного сервопривода без нагрузки (рисунок 4.6, а кривая 1) имеют небольшие колебания при пуске привода, а далее сигнал практически линеаризуется. При появлении нагрузки (рисунок 4.6, а кривая 2) колебательный процесс более выражен, но характер сигнала также является затухающим. Значения коэффициентов вейвлет-преобразования емкостного тока неисправного сервопривода (рисунок 4.6, б) значительно ниже по сравнению с исправным (рисунок 4.6, а). Колебания при пуске не выражены. По всей длине сигнала имеются постоянные не затухающие колебания (рисунок 4.6, б – кривая 1), амплитуда которых увеличивается во времени при появлении нагрузки (рисунок 4.6, б кривая 2). Характер процесса – колебательный.

На рисунке 4.7 показаны графики вейвлет-коэффициентов емкостного тока для исправной фазы сервопривода.

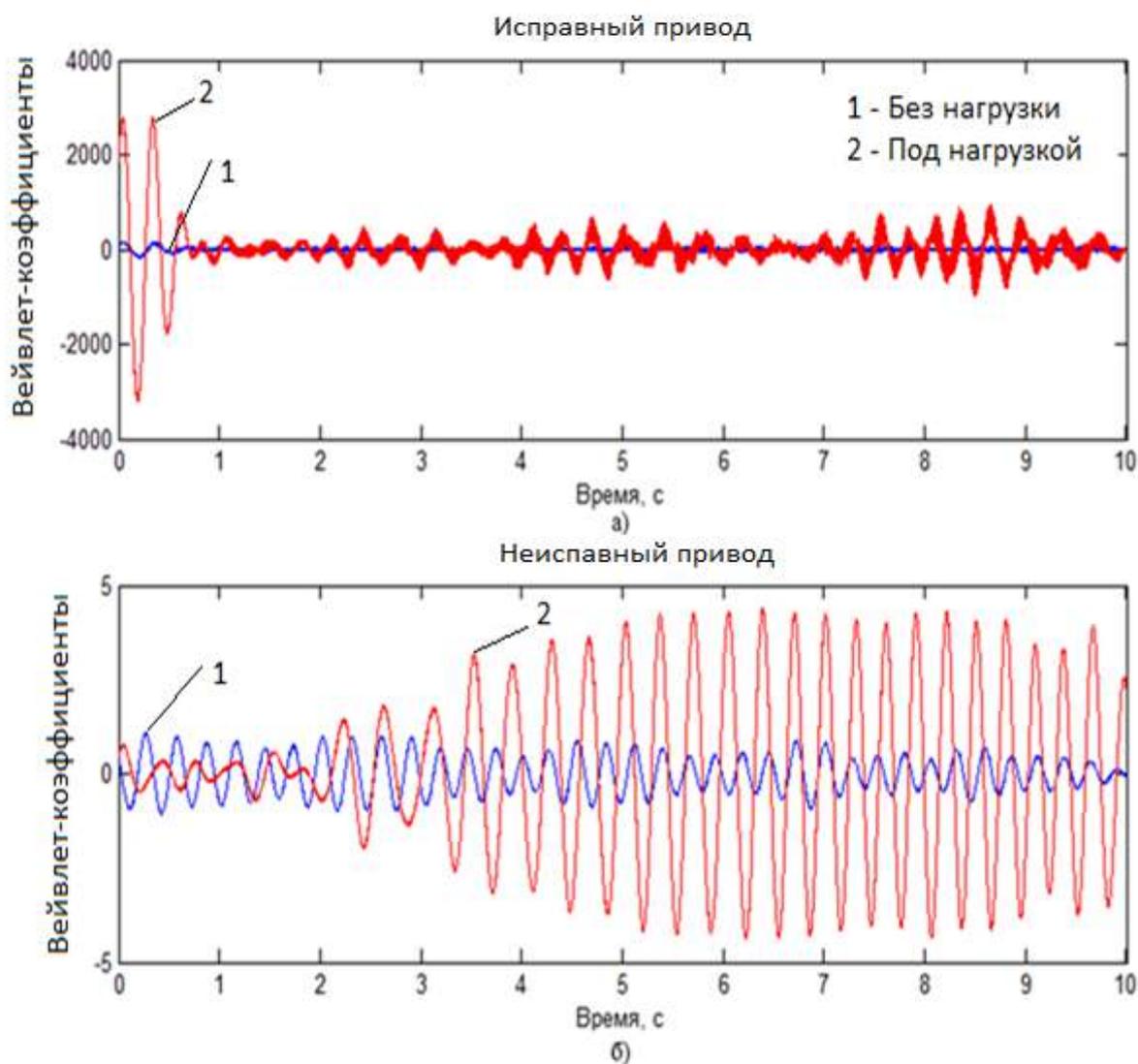


Рисунок 4.6 – Вейвлет-коэффициенты емкостного тока в неисправной фазе на масштабе характерном для неисправности:

а – исправный сервопривод; б – неисправный сервопривод

Из сопоставления полученных характеристик следует, что характер зависимости емкостных токов для исправной (рисунок 4.7) и неисправной (см. рисунок 4.6) фаз аналогичен, но при повреждении витков обмотки статора происходит существенное увеличение значений вейвлет-коэффициентов в исправной фазе (рисунок 4.7).

Характер зависимости исследуемых коэффициентов при различных технических состояниях и нагрузке в обеих фазах одинаков, следовательно, для диагностирования состояния сервопривода достаточно провести измерение токового сигнала в одной любой его фазе.

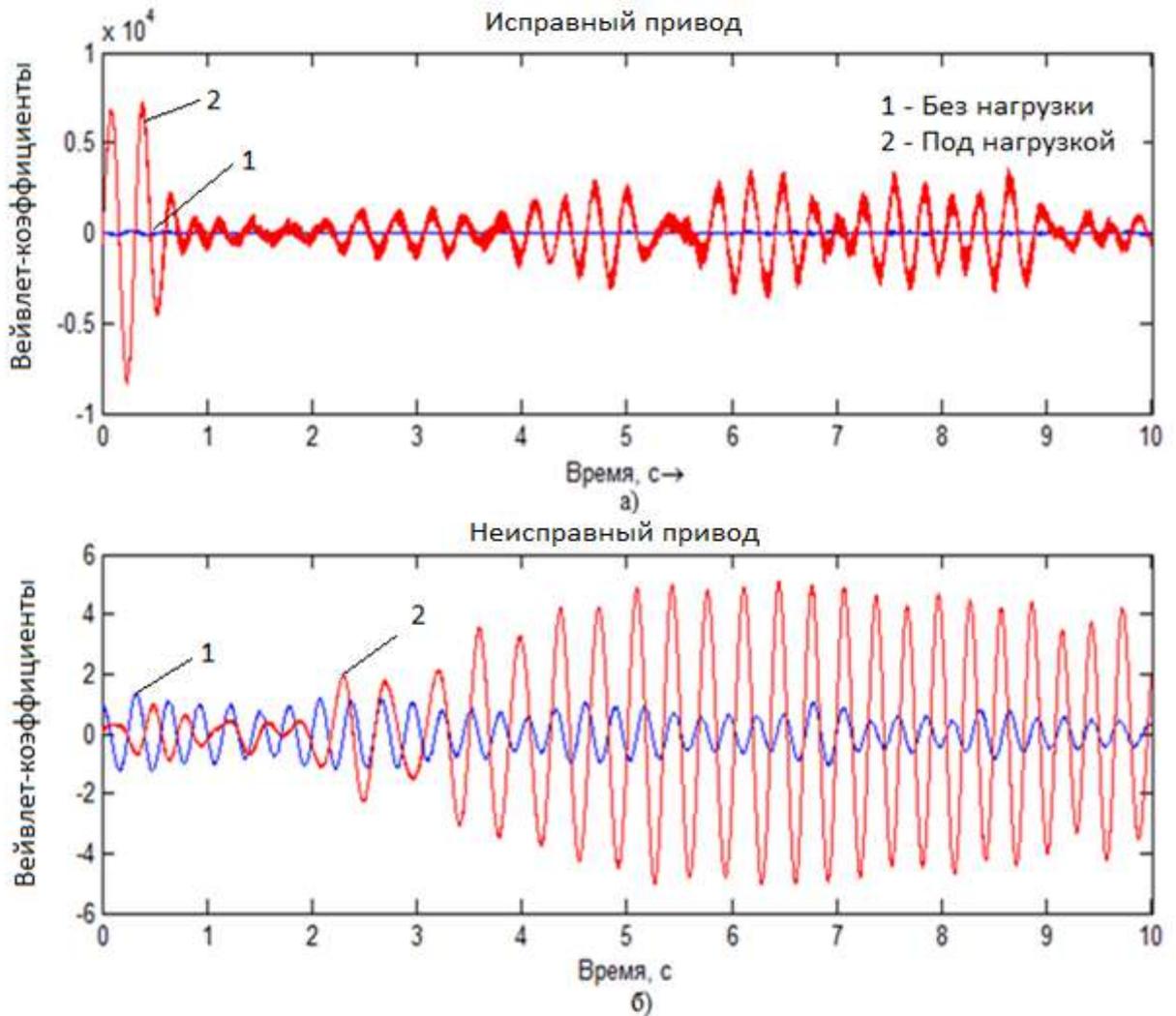


Рисунок 4.7 – Вейвлет-коэффициенты емкостного тока в исправной фазе сервопривода: а – исправный сервопривод; б – неисправный сервопривод

Выполнены исследования емкостного тока, проведен анализ напряжения в фазах А и Б. Примеры вейвлет-преобразования сигнала напряжения на характерном масштабе диагностирования приведены на рисунках 4.8, 4.9.

Из рисунков 4.6–4.9 следует, что зависимости, установленные для емкостного тока и напряжения, аналогичны. Значения вейвлет-коэффициентов емкостного тока

для исправного и неисправного приводов существенно отличаются в исправной и неисправной фазе (см. рисунки 4.6, 4.7), диапазон изменения значений вейвлет-коэффициентов напряжения в исправной фазе (см. рисунок 4.8) одинаков, а для неисправной фазы (рисунок 4.9, б) – превышают аналогичные (рисунок 4.9, а) в 2 раза, что предоставляет возможность безошибочно выявить дефектную фазу.

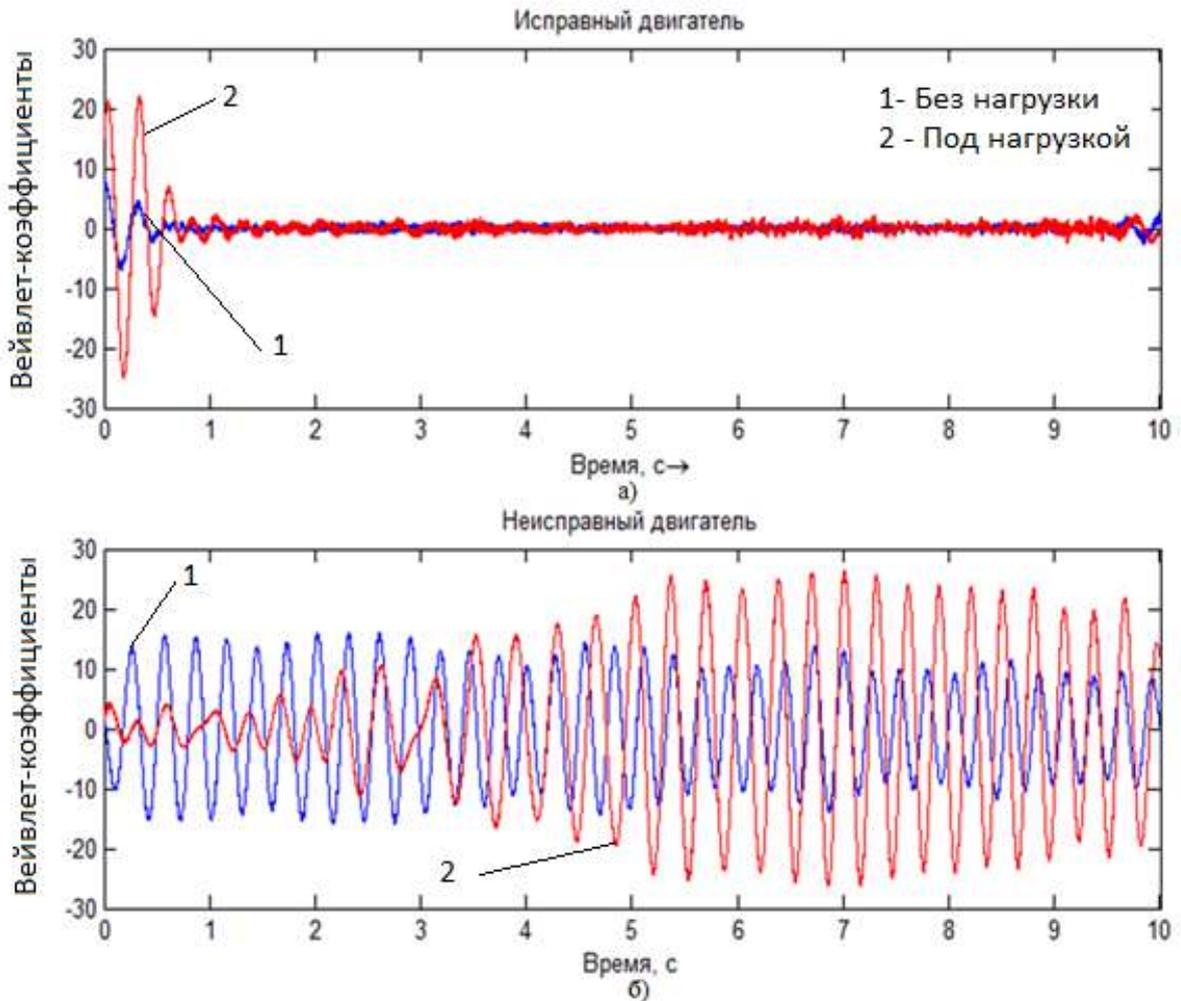


Рисунок 4.8 –График вейвлет-коэффициентов напряжения в фазе А на характерном масштабе:

а – исправный сервопривод; б – неисправный сервопривод

Сравнение графиков вейвлет-коэффициентов на масштабах, характерных отсутствующим в данный момент неисправностям, имеет вид, аналогичный исправному сервоприводу (рисунок 4.9, а).

Значения вейвлет-коэффициентов емкостного тока и напряжения на нехарактерных масштабах имеет вид, приведенный на рисунке 4.10.

Вейвлет-коэффициенты емкостного тока на нехарактерном масштабе имеет более высокую плотность и меньшую амплитуду по сравнению с характерным масштабом (см. рисунок 4.9). Сигнал регулярен и повторяется с определенной частотой. Вид сигнала одинаков для всех нехарактерных частот и не зависит от технического состояния привода [A215-A217].

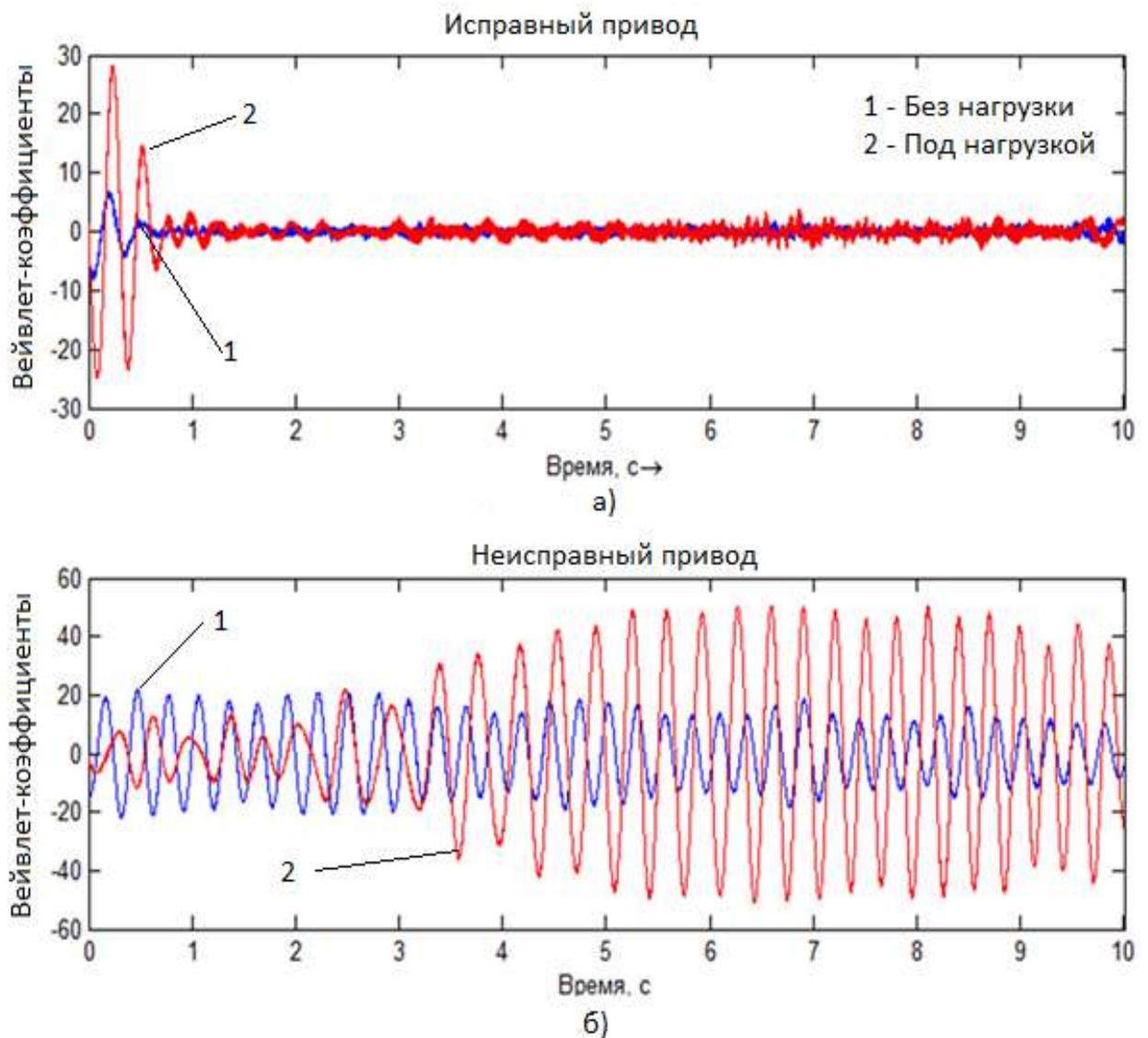


Рисунок 4.9 – График вейвлет-коэффициентов напряжения фазы Б на масштабе характерном для неисправности:

а – исправный привод; б – неисправный привод

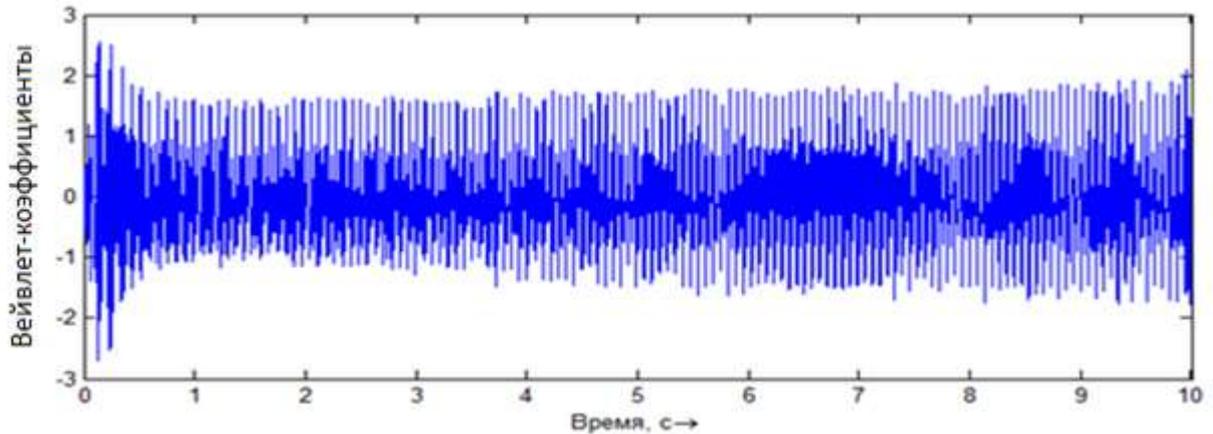


Рисунок 4.10 – Вейвлет-коэффициенты емкостного тока и напряжения сервоприводов на нехарактерном масштабе

По результатам анализа вейвлет-коэффициентов питающего тока и напряжения на характерных и нехарактерных масштабах установлено пять характерных графических зависимостей (см. рисунки 4.9, 4.10). Для проверки возможности использования выявленной закономерности для диагностирования технического состояния привода необходимо провести ряд исследований для установления возможности анализа неисправностей механического происхождения. Это предоставит возможность подтвердить правильность сделанных выводов и проверить возможность применения данной теории для определения технического состояния и условий нагружения приводов МПКС в составе киберфизической системы.

4.2.2 Экспериментальные исследования электрических приводов с неисправностью механических элементов исполнительного оборудования по параметру питающего тока

Целью данной серии экспериментов является подтверждение применимости предложенного подхода определения механических неисправностей оборудования, сопряженного с двигателем, и проверка адекватности выводов, сделанных в первой части исследования. Диагностируемый привод основан на серводвигателе постоянного тока MAXON MOTOR EC 60, 167131 мощностью 400 Вт (см. таблица 4.4).

Таблица 4.4 - Технические характеристики MAXON MOTOR EC60, 167131

Параметры и характеристики	Численные значения
Номинальное напряжение, В	48
Ток холостого хода, А	0.304
Номинальный ток, А	5,85
Пусковой ток, А	46,4
Номинальная частота вращения, об/мин	2680
Максимальная частота вращения, об/мин	3100
Номинальный момент, Н м	0,830
Максимальный момент, Н м	6.820
КПД, %	85

Для проведения данных экспериментов использован лабораторный стенд, (см. рисунок 4.11).

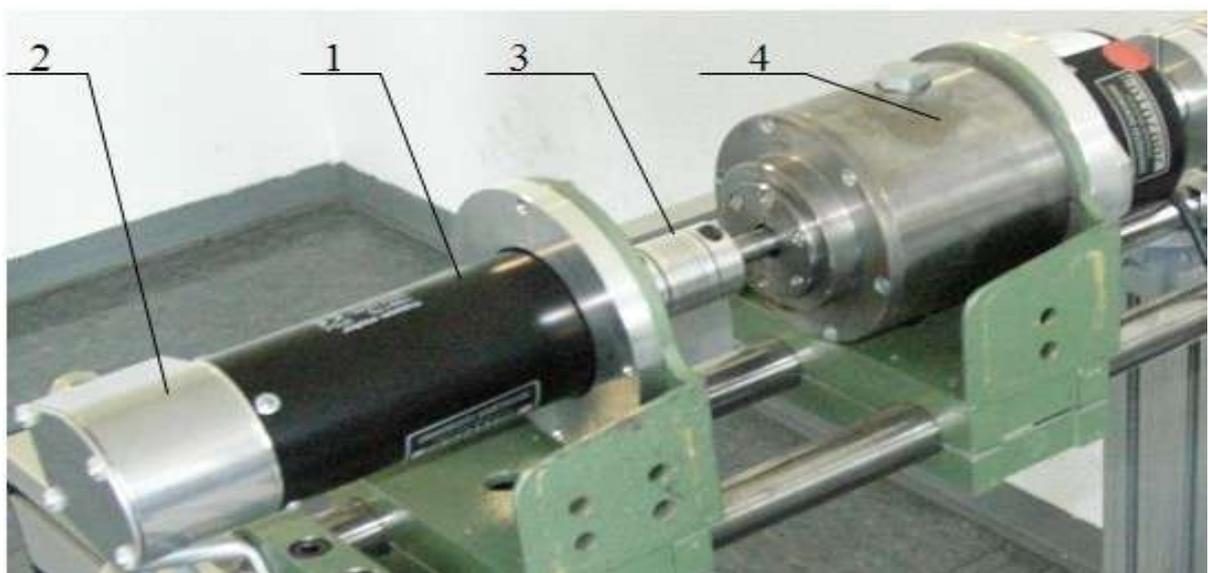


Рисунок 4.11 – Лабораторный стенд на базе сервопривода: 1 – сервопривод; 2 - энкодер; 3 – соединительная муфта; 4 – редуктор

Сервопривод имеет полый ротор, усиленные подшипники, систему электронной коммутации и магниты с улучшенными характеристиками (Nd2Fe14B). Данный сервопривод обладает высокими скоростями вращения (3000 об/мин), малой постоянной времени, линейностью рабочих характеристик, большим ресурсом, широкими возможностями управления. Конструкция сервопривода MAXON MOTOR EC60, 167131 приведена на рисунке 4.12.

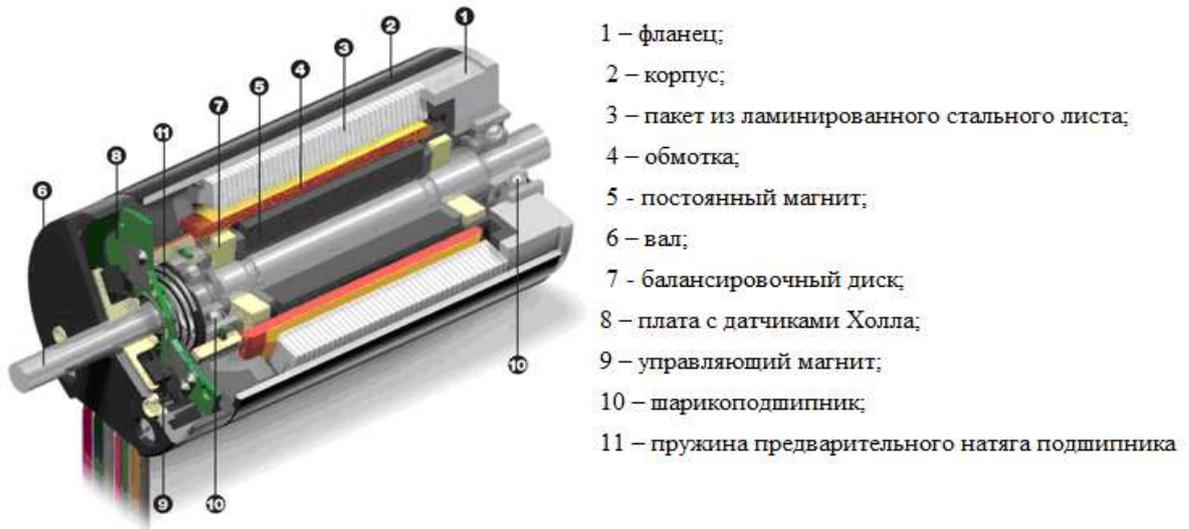


Рисунок 4.12 – Конструктивные особенности MAXON MOTOR EC60, 167131

Принцип работы сервопривода основан на синхронном изменении ЭДС и скорости. Ротор выполнен из постоянного магнита и закреплен на двухконцевом валу. Статор включает корпус, изготовленный из стали или алюминия, и трехфазную обмотку сервопривода, соединенную в «звезду», либо в «треугольник». Вращение ротора осуществляется за счет переключения линии магнитного поля.

Для определения механических дефектов сервопривода необходимо выполнить анализ тока, измеренного на питающем кабеле или вводе в привод (MCSA - технология). Схема измерения питающего тока для идентификации дефектов механического происхождения приведена на рисунке 4.13.

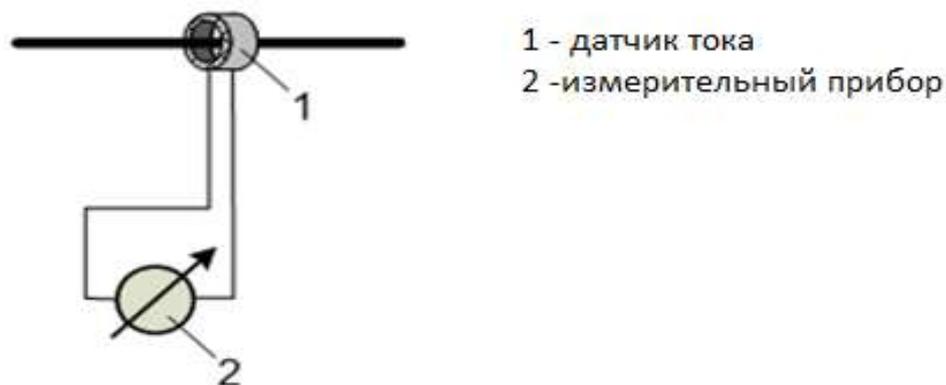


Рисунок 4.13 – Схема измерения питающего тока для идентификации механических дефектов сервопривода

Измерение питающего тока осуществляется с помощью датчика, основанного на эффекте Холла, обладающем высокой точностью измерения, низким температурным дрейфом, линейностью характеристик, низким энергопотреблением и небольшой массой. Данный датчик предоставляет возможность выполнить анализ сигнала питающего тока в процессе эксплуатации сервопривода.

Помимо MAXON EC60 в состав исследуемого привода входит редуктор, соединенный с серводвигателем посредством металлической соединительной муфты 60152312 (таблица 4.5) с высокой жесткостью при кручении. Вращение с сервопривода передается посредством соединительной муфты на редукторную группу, соединенную с исполнительным устройством (см. рисунок 4.12).

Диагностирование привода осуществляется по параметру питающего тока, на спектр которого может оказывать влияние только техническое состояние сервопривода и непосредственно сопряженной с ним муфты. В данной схеме редуктор является постоянной пассивной нагрузкой сервопривода и не оказывает влияния на частотный спектр его токового сигнала, что предоставляет возможность учитывать только технические характеристики электропривода (см. таблицу 4.4) и соединительной муфты (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Технические характеристики соединительной муфты

Параметры	Значение
Максимальный крутящий момент, Н·м	3,2
Нагрузка+0,03-0, мм	12
Скольжение + ,град	2,0
Максимальное радиальное смещение, мм	0,06
Максимальное аксиальное смещение, мм	0,36
Максимальная скорость резонанса	5000
Соппротивление скручиванию, Н м/рад	755
Масса, г	34

Из таблицы 4.2 следует, что неисправности «дефект коммутации» и «дефекты муфты» определяются на одних и тех же частотах Фурье-преобразования, что может стать причиной ошибки диагностирования. Пульсация питающего напряжения проявляется на первых трех гармониках сети (50, 100, 150 об/с). Неисправность статора проявляется на второй гармонике частоты питающей сети (100 об/с). Характерные частоты диагностирования остальных неисправностей являются гармониками частоты вращения сервопривода. Дефекты коммутации проявляются на 1–4, 8 и 12, неисправность ротора – на 4, 5, 6 и 7, неисправность муфты – на первых трех гармониках частоты вращения. Согласно паспортным данным (см. таблицу 4.4) частота вращения диагностируемого сервопривода может изменяться от 0 до 30 об/с, поэтому для анализа технического состояния выбраны шесть частот из данного диапазона. Результаты сопоставления характерных частот Фурье-преобразования (см. таблицу 4.2), зависящих от скорости вращения сервопривода и частоты питающей сети, приведены в таблице 4.6.

Из приведенной таблицы видны наложения частот питающей сети на гармоники частоты вращения при частотах вращения привода 10, 20, 25 и 30 об/с.

Таблица 4.6 – Значение характерных частот диагностирования

Номер гармоники частоты вращения	Частота вращения сервопривода, об/с					
	1	10	15	20	25	30
1	1	10	15	20	25	30
2	2	20	30	40	50	60
3	3	30	45	60	75	90
4	4	40	60	80	100	120
5	5	50	75	100	125	150
6	6	60	90	120	150	180
7	7	70	105	140	175	210
8	8	80	120	160	200	240
12	12	120	180	240	300	360

Данный факт оказывает существенное влияние на качество диагноза и может привести к ошибочным заключениям. Поэтому для поиска дефекта целесообразно проводить экспериментальные исследования на частотах 1 и 15 об/с.

В ходе лабораторного исследования рассмотрен исправный привод и аналогичный, имеющий трещину на муфте. Оценка состояния данных приводов осуществлялась на основе сигнала потребляемого тока при частоте вращения 15 об/с. Произведен расчет характерных частот диагностирования (см. таблицу 4.2) и масштабов вейвлет-преобразования (4.2), выполнен анализ полученных коэффициентов на характерных и нехарактерных масштабах (см. рисунок 4.14).

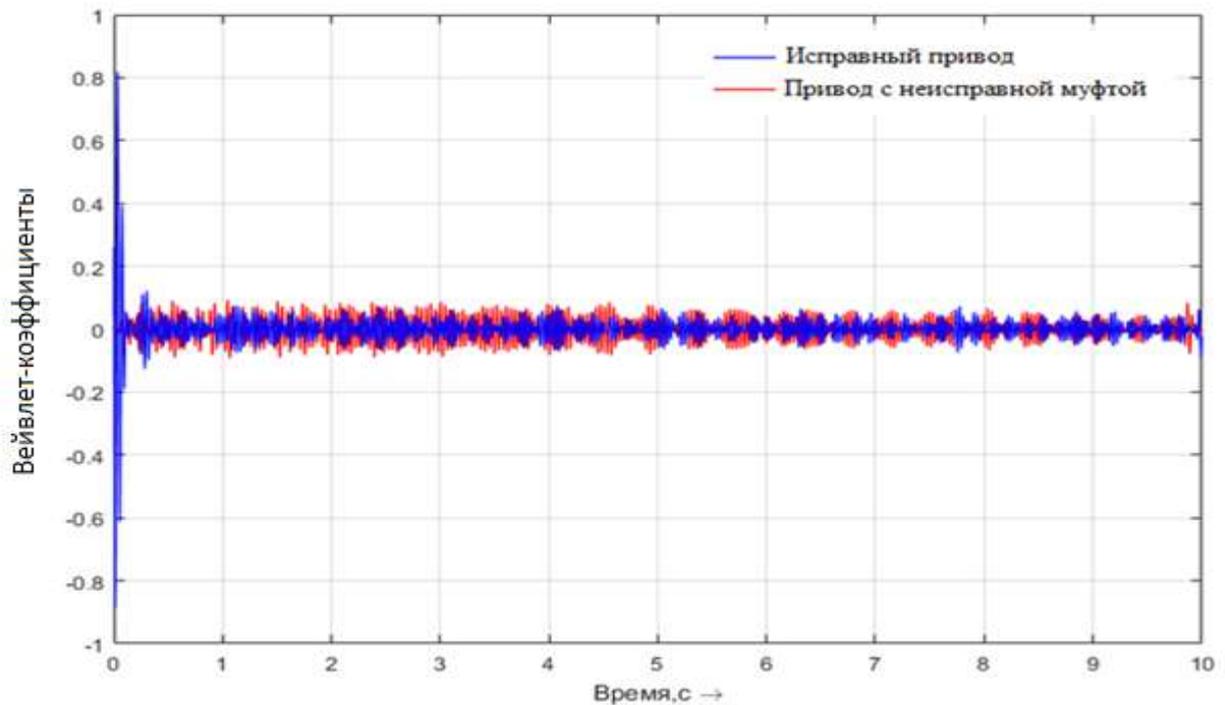


Рисунок 4.14 – График коэффициентов вейвлет преобразования на нехарактерных масштабах

Оба сигнала регулярны и имеют определенную периодичность. Амплитуда сигналов мала и практически не меняется во времени. Имеет место переходной процесс при пуске сервопривода, который достаточно быстро затухает. Далее сигнал регулярный и имеет достаточно высокую плотность и периодичность.

На рисунке 4.15 представлен вид графиков вейвлет-коэффициентов на масштабах, характерных для неисправностей сервопривода. Из данных графиков следует, что при пуске привода имеет место колебательный процесс, который достаточно быстро затухает. Основная амплитуда сигнала практически постоянна во времени.

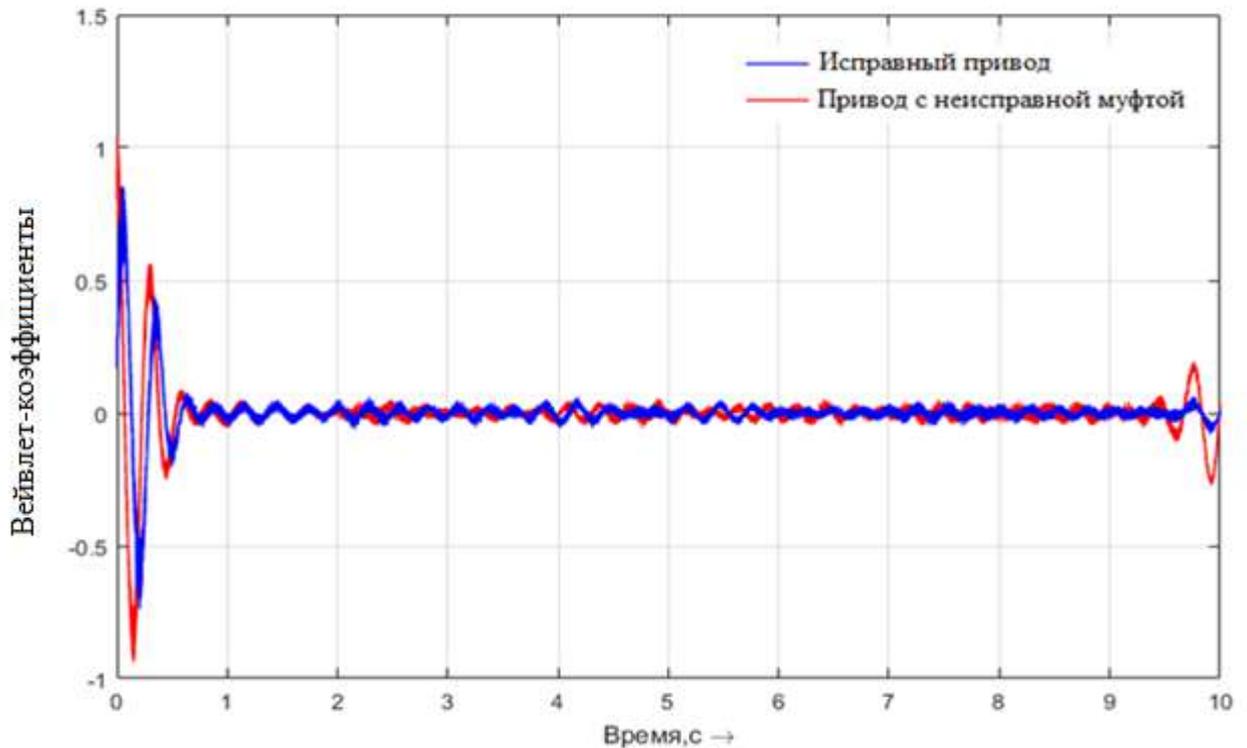


Рисунок 4.15 – Графики коэффициентов вейвлет-преобразования на характерных масштабах

Форма кривой для приводов с исправной и неисправной муфтой практически совпадают, но амплитуда сигнала при пуске неисправного привода несколько выше по сравнению с исправным. Однако данная разница не превышает 5 %, что свидетельствует об отсутствии неисправностей в самом приводе. На рисунке 4.16 представлены графики вейвлет-коэффициентов на характерных масштабах для «неисправности муфты».

Для исправного привода график имеет колебания при пуске, которые потом стабилизируются. Для привода с неисправной муфтой колебательный процесс усиливается во времени, следовательно, закономерности, установленные в первой серии экспериментальных исследований, справедливы для других типов приводов и предоставляет возможность определить как неисправности привода, так и сопряженного с ним оборудования, а также определить режим нагружения привода. Однако для использования установленных закономерностей необходимо произвести дополнительный, более тщательный анализ полученных характеристик.

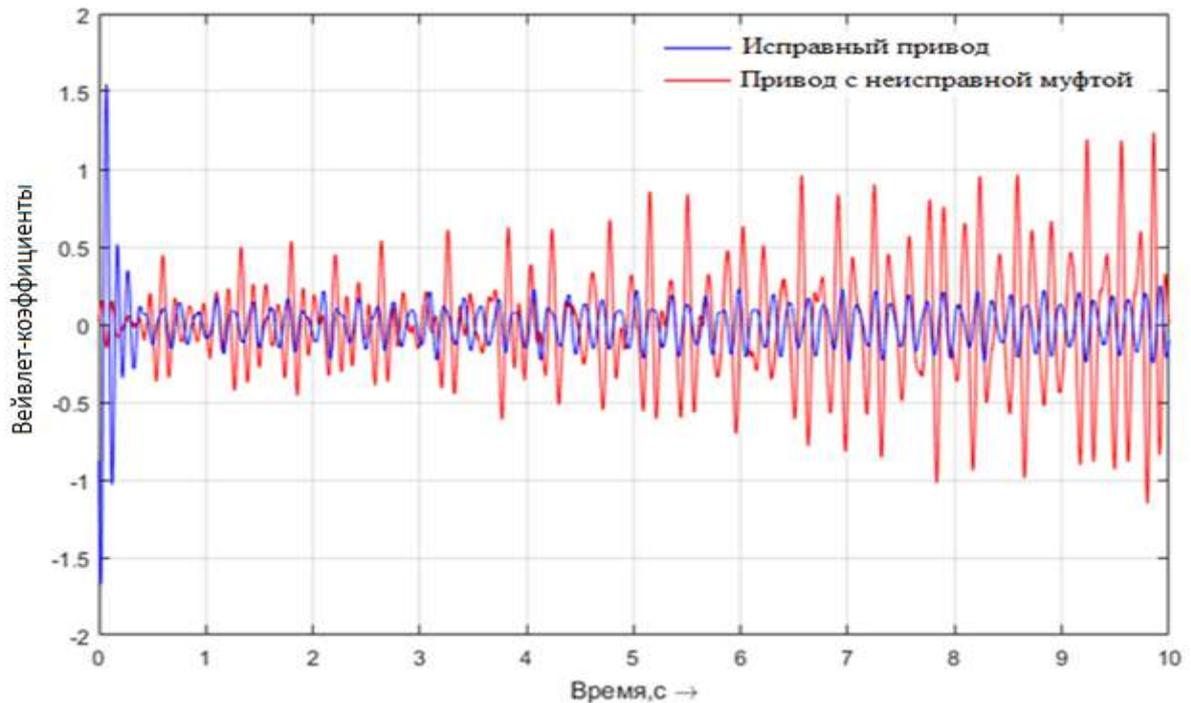


Рисунок 4.16 – Графики коэффициентов вейвлет-преобразования на характерных масштабах для «неисправности муфты»

4.2.3 Экспериментальные исследования электрических приводов по вибрации

Методы вибрационной диагностики достаточно распространены и широко используются при диагностировании различных типов электроприводов. Основным параметром, по которому осуществляется идентификация технического состояния, является среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости [А199]. Для определения допустимых норм вибрации все электрические машины поделены на четыре класса в зависимости от мощности и способа монтажа (см. таблица 4.7).

Для каждого класса машин установлены четыре характерные зоны вибрации (таблица 4.8).

Границы зон СКЗ виброскорости для электроприводов различной мощности приведены в таблице 4.9. Приводы, используемые в МПКС, как правило, имеют малую или среднюю мощность и устанавливаются на подвижных частях, следовательно, должны относиться к первому или второму классу.

Таблица 4.7 – Классы электрических машин по мощности

Класс	Мощность, кВт	Способ установки
1	До 15	На подвижных частях без фундамента
2	15–875	Без фундамента
	До 300	С фундаментом
3	Более 10000	Массивный фундамент
4	Более 10000	Податливый фундамент

Таблица 4.8 – Характерные зоны СКЗ виброскорости электрических машин

Зона	Характеристика	Способ эксплуатации
A	Новые электродвигатели	Без ограничения срока
B	Исправные электродвигатели	Без ограничения срока
C	Предаварийный режим	Не пригоден для длительной эксплуатации
D	Аварийный режим	Эксплуатация недопустима

Таблица 4.9 – Границы зон СКЗ виброскорости $v_{\text{вibr}}$ для электроприводов в зависимости от их мощности

$v_{\text{вibr}}$, мм/с	Класс электрических машин по мощности			
	1	2	3	4
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71				
1.12	B			
1.8		B		
2.8	C		B	
4.5		C		B
7.1	D		C	
11.2		D		C
18			D	
28				D
45				

Статистические данные, приведенные в таблице 4.7, определяют возможность классифицировать техническое состояние вращающихся машин на два

класса: исправен – уровень вибрации находится в зоне *A* или *B*; неисправен – уровень вибрации находится в зоне *C* или *D*. Таким образом, для оценки текущего технического состояния достаточно определить текущий уровень СКЗ виброскорости [A218]. Данный подход предоставляет возможность определить общее состояние привода без указания причин возникновения неисправности, не предоставляет возможность прогнозировать переход из безопасной зоны *B* в зону *C*, а следовательно, велика возможность внезапного отказа привода. Для устранения данных недостатков известны и широко применяются методы виброакустической диагностики, основанные на частотном анализе виброскорости с применением преобразований Фурье. Принцип и основные недостатки данного метода подробно рассмотрены в параграфе 4.2. Поэтому целью проведения данной части экспериментальных исследований является проверка возможности практического применения установленной закономерной взаимосвязи между коэффициентами вейвлет-преобразования и техническим состоянием электропривода для параметров вибрации.

Объектом диагностирования является электропривод постоянного тока ПЯ250Ф, применяющийся в составе МПКС (рисунок 4.17).

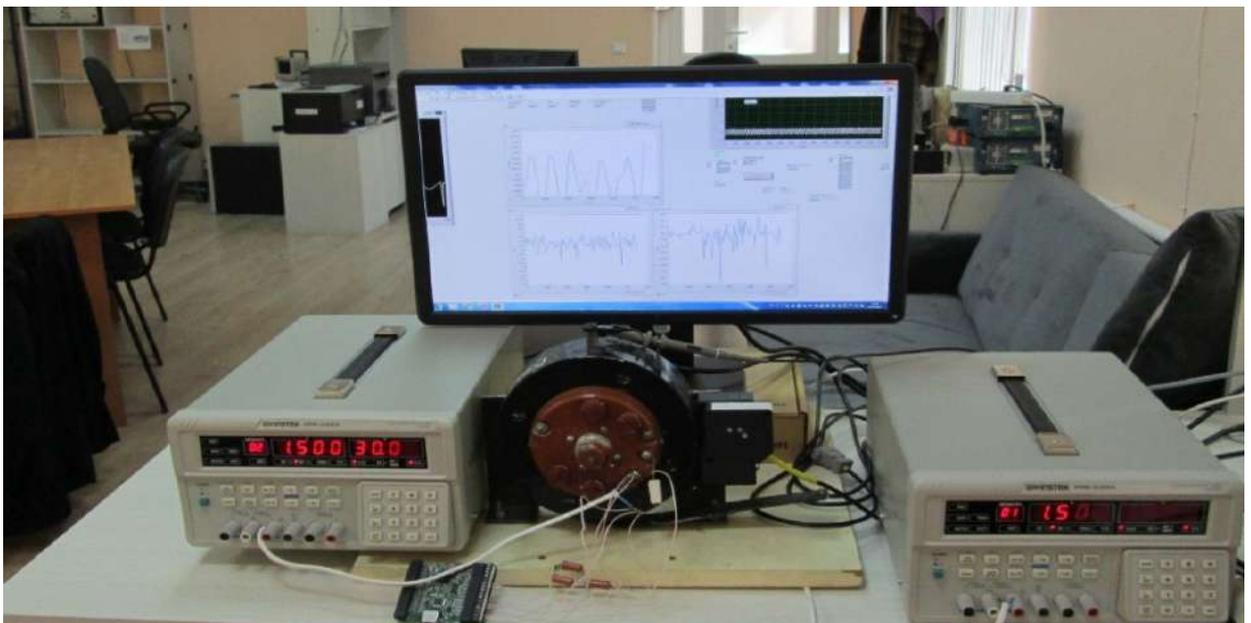


Рисунок 4.17 – Испытательный стенд вибрационной диагностики электропривода ПЯ250Ф

Выполнено три серии экспериментов по замеру вибрации привода ПЯ250Ф в номинальном режиме. Первый эксперимент реализован на полностью исправном приводе. Во втором из привода извлечена одна щетка, что имитирует износ или повреждение щеток. В третьем в процессе измерения совершались удары по валу привода, что имитировало небаланс ротора.

Измерительная система лабораторного стенда включает акселерометр *603V01* и микроконтроллер *Arduino Uno*, осуществляющий связь с персональным компьютером, выполняющим обработку результатов измерения.

Измерено СКЗ виброскорости трех взаимно перпендикулярных направлений (таблица 4.10.).

Таблица 4.10 – Результаты анализа СКЗ виброскорости электропривода

Состояние привода	Направление измерения	СКЗ виброскорости, мм/с
Исправный привод	Вертикальное	1,15
	Горизонтальное	1,125
	Осевое	1,548
Без щетки (износ или повреждение щеток)	Вертикальное	5,103
	Горизонтальное	2,144
	Осевое	4,029
Бой вала (небаланс ротора)	Вертикальное	6,93
	Горизонтальное	3,144
	Осевое	5,529

Диагностируемый привод относится к первому классу (см. таблица 4.9). Значение СКЗ его виброскорости в первом опыте (см. таблица 4.10) принадлежит зоне *B* данного класса, что свидетельствует о его исправности.

Во втором и третьем опыте привод неисправен, так как его вибрация соответствует зоне *C*. Причем текущее состояние привода видно во всех трех направлениях замера, особенно в вертикальном и осевом. Следовательно, для поиска возникшей неисправности достаточно замера в одном направлении, например, вертикальном. Основные неисправности данного электропривода и их характерные частоты по параметру вибрации приведены в таблице 4.2.

Рассчитаны характерные частоты Фурье-преобразования при номинальной частоте вращения привода и соответствующие им масштабы вейвлета (таблица 4.11), для каждого из которых найдены вейвлет-коэффициенты и произведен их сравнительный анализ. Вейвлет-коэффициенты виброскорости на характерных масштабах для исправного привода представлены на рисунке 4.18.

Имеются существенные колебания в начале замера, которые уменьшаются во времени. Данная закономерность справедлива для всех характерных масштабов диагностирования (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Характерные частоты и масштабы диагностирования ПЯ 250Ф

Неисправность	Характерные частоты Фурье-анализа	Масштабы вейвлет-преобразования
Износ или повреждение щеток	48	24
Обрыв или износ коллекторной обмотки	191	6
	382	3
	572	2
Межвитковые замыкания обмотки якоря	52	22
	56	21
	50	23
Наличие переменной составляющей в напряжении питания	50	23
	100	12
	150	8
Небаланс ротора	24	48
	16	73
	12	97
Износ подшипников	11	81
	17	72
	19	61

Графическая зависимость для неисправности щетки на характерном масштабе (см. рисунок 4.19) существенно отличается от исправного. Имеются нарастающие во времени колебания. Аналогичная картина наблюдается при бое ротора (см. рисунок 4.20), что соответствует дисбалансу ротора.

Приведенные графические зависимости показывают, что зависимость, установленная для тока, справедлива и для вибрации электропривода, следовательно,

является закономерной и может быть применена при разработке метода диагностики систем электрических приводов в режиме реального времени.

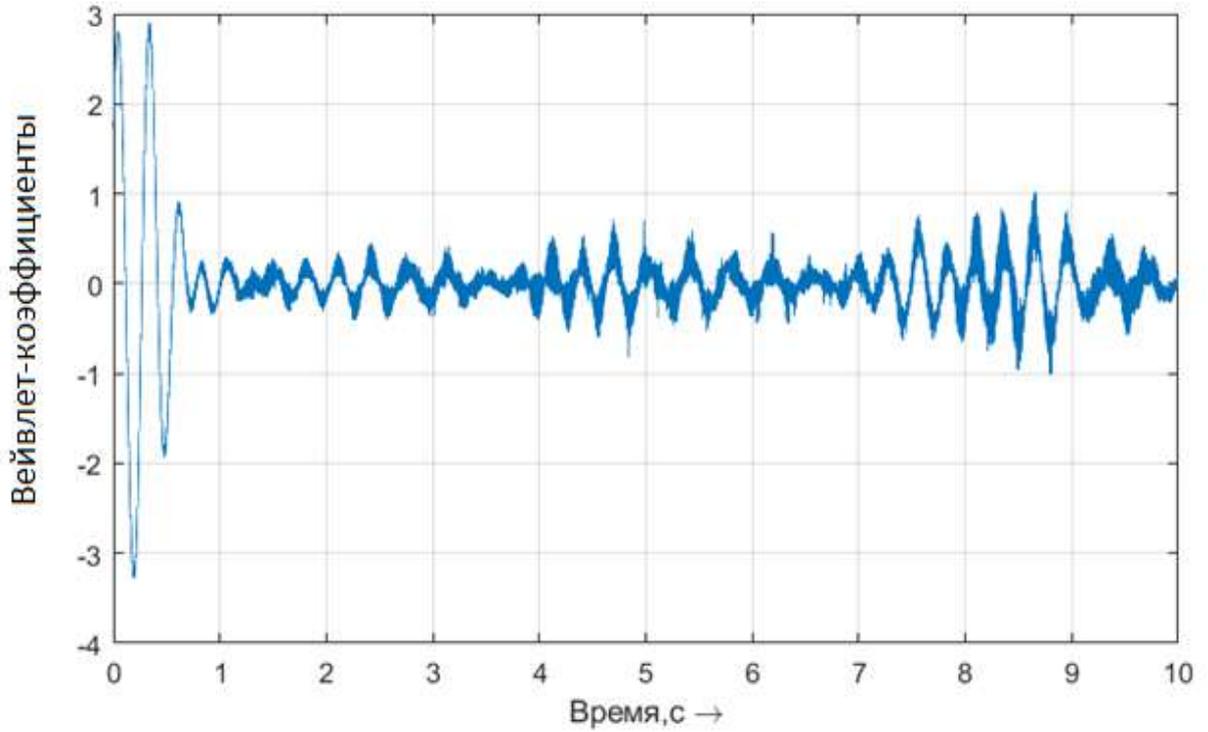


Рисунок 4.18 – Вейвлет-коэффициенты исправного привода

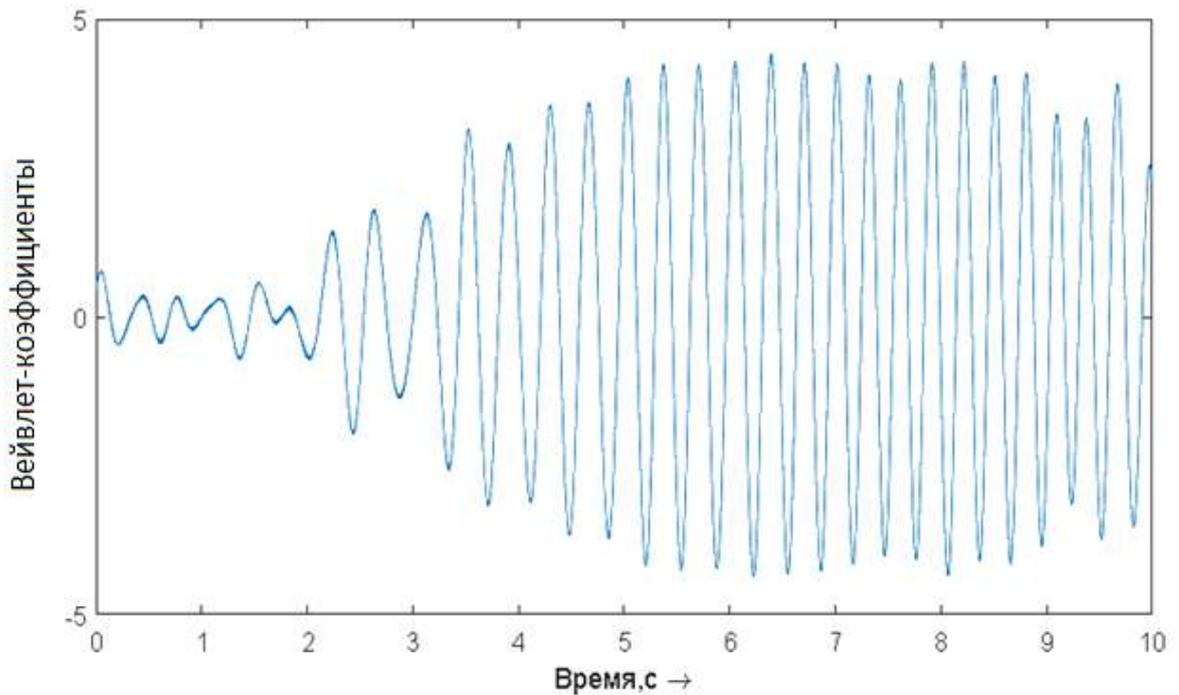


Рисунок 4.19 – График вейвлет-коэффициентов для неисправности щеток

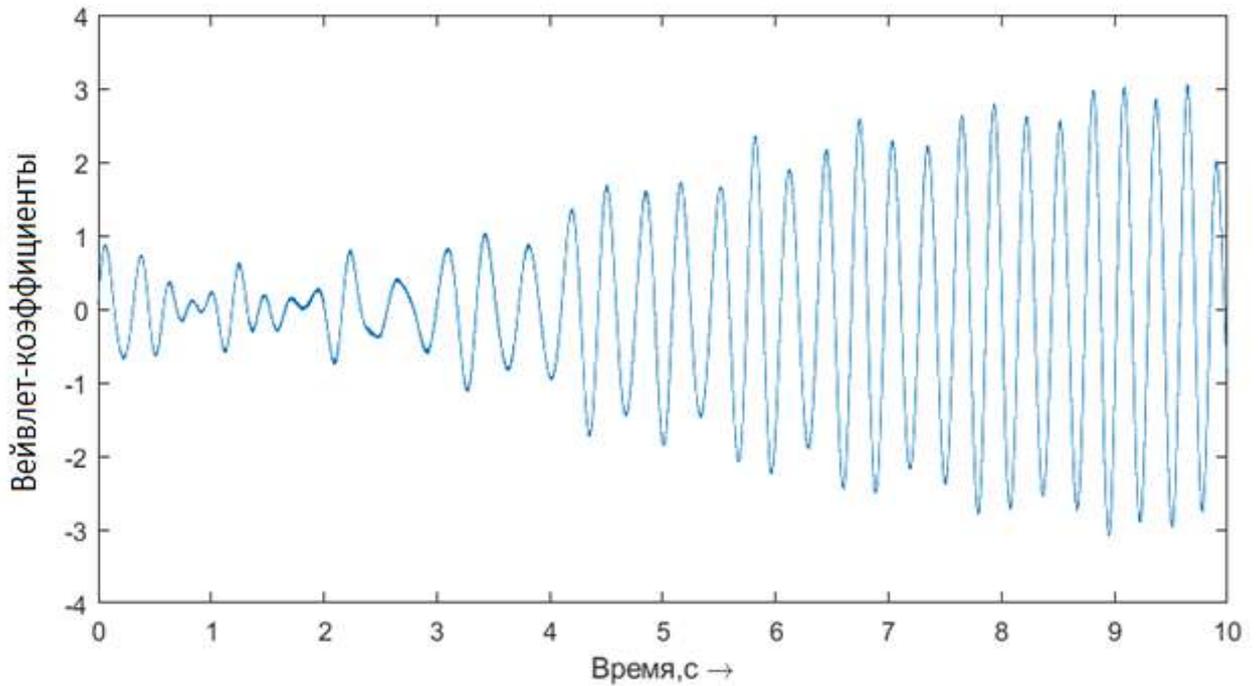


Рисунок 4.20 – График вейвлет-коэффициентов для небаланса ротора

В состав МПКС, помимо электрических приводов, могут входить и гидравлические, техническое состояние которых также может быть оценено с помощью параметров вибрации. Поэтому необходимо произвести аналогичные исследования и для гидравлического привода.

4.2.4 Экспериментальные исследования гидравлических приводов по вибрации

Для проведения экспериментов по виброакустической диагностике гидравлических приводов исследован нерегулируемый радиально-поршневой насос РНАС 32/320 (см. рисунок 4.22), технические характеристики которого приведены в таблице 4.12.

В составе измерительного стенда использованы акселерометр *603V01* и микроконтроллер *Arduino Uno*, обеспечивающий связь с персональным компьютером. Все вычислительные операции выполняются ПЭВМ с помощью программного комплекса *MATLAB*.

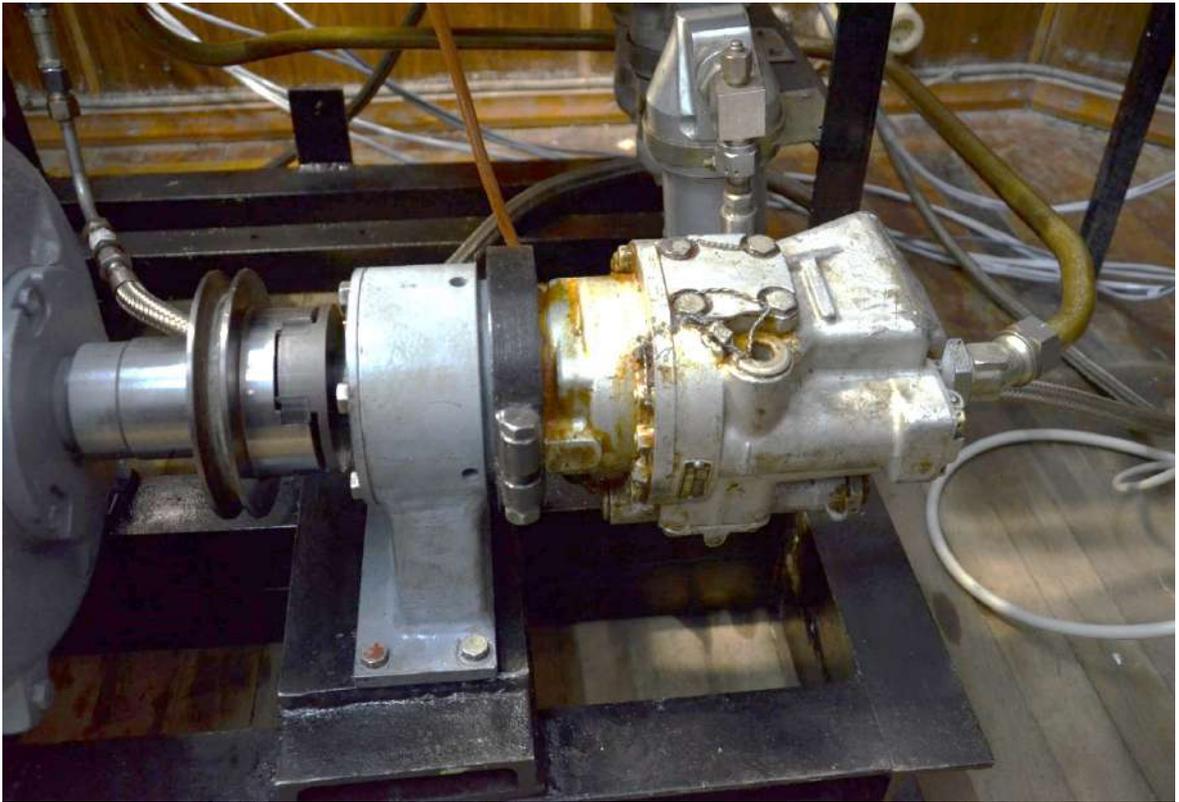


Рисунок 4.22 – Нерегулируемый аксиально-поршневой насос РНАС 32/320

Таблица 4.12 – Технические характеристики насоса РНАС 32/320

Параметры и характеристики	Значение
Максимальное давление на выходе, МПа	40
Номинальное давление на выходе, МПа	32
Минимальное давление на входе, МПа	0,002
Максимальное давление на входе, МПа	15
Максимальное давление дренажа, МПа	0,05
Рабочий объем, см ³	32
Частота вращения, об/мин	1500-3000
Подача номинальная, л/мин	44
Подача минимальная, л/мин	3
Объемный КПД	0,95
Полный КПД	0,7

Характерные частоты вибрации аксиально-поршневого насоса приведены в таблице 4.13 [A219]. Диагностирование осуществлялась при частоте вращения 1500 об/мин, для которой определены характерные частоты Фурье-преобразования и соответствующие им масштабы вейвлета (таблица 4.14).

Таблица 4.13– Характерные частоты вибрации аксиально-поршневого насоса

Неисправность насоса	Характерная частота вибрации, Гц
Дисбаланс ротора	$q \cdot f_r$
Дефекты узлов крепления	$0,5 \cdot f_r$
Автоколебания вала	$q \cdot f_r/2; \quad q \cdot f_r/3$
Дефекты поршней	$N_{\text{ц}} \cdot f_r$
Неоднородность потока	$q \cdot f_r; N_{\text{ц}} \cdot q \cdot f; \quad N_{\text{ц}} \cdot f_r \pm q \cdot f_r$
Износ подшипников	$f_{\text{н}} \approx 0.4f_r r; \quad f_{\text{в}} \approx 0.6f_r r; \quad f_{\text{с}} \approx 0.4f_r$

Примечание: $q \in [1,3]$ - номер гармоники; f_r - частота вращения вала, $N_{\text{ц}}$ – количество цилиндров, r - число тел качения в подшипнике.

Таблица 4.14 – Исходные данные для диагностирования гидронасоса

Неисправность	Характерные частоты Фурье-анализа	Масштабы вейвлет- преобразования
Дисбаланс ротора	25	46
	50	23
	75	15
Дефекты узлов крепления	12,5	93
Автоколебания вала	12,5	93
	25	46
	37,5	31
	8,33	139
	16,7	70
Дефекты крепления поршней	200	6
Неоднородность потока	25	46
	50	23
	75	75
	200	6
	400	3
	600	2
	225	5
	250	4,6
	275	4
	175	7
	150	8
125	9	
Износ подшипников	500	2,3
	750	1,5
	10	116

Измерения вертикальной составляющей виброскорости выполнены на двух одинаковых гидронасосах. Первый находится в эксплуатации менее года, а второй

после 8 лет интенсивной работы. Для первого насоса (см. рисунок 4.23) вейвлет-коэффициенты для всех характерных масштабов имеют существенные колебания при пуске, амплитуда которых уменьшается во времени, что свидетельствует об исправном состоянии гидронасоса.

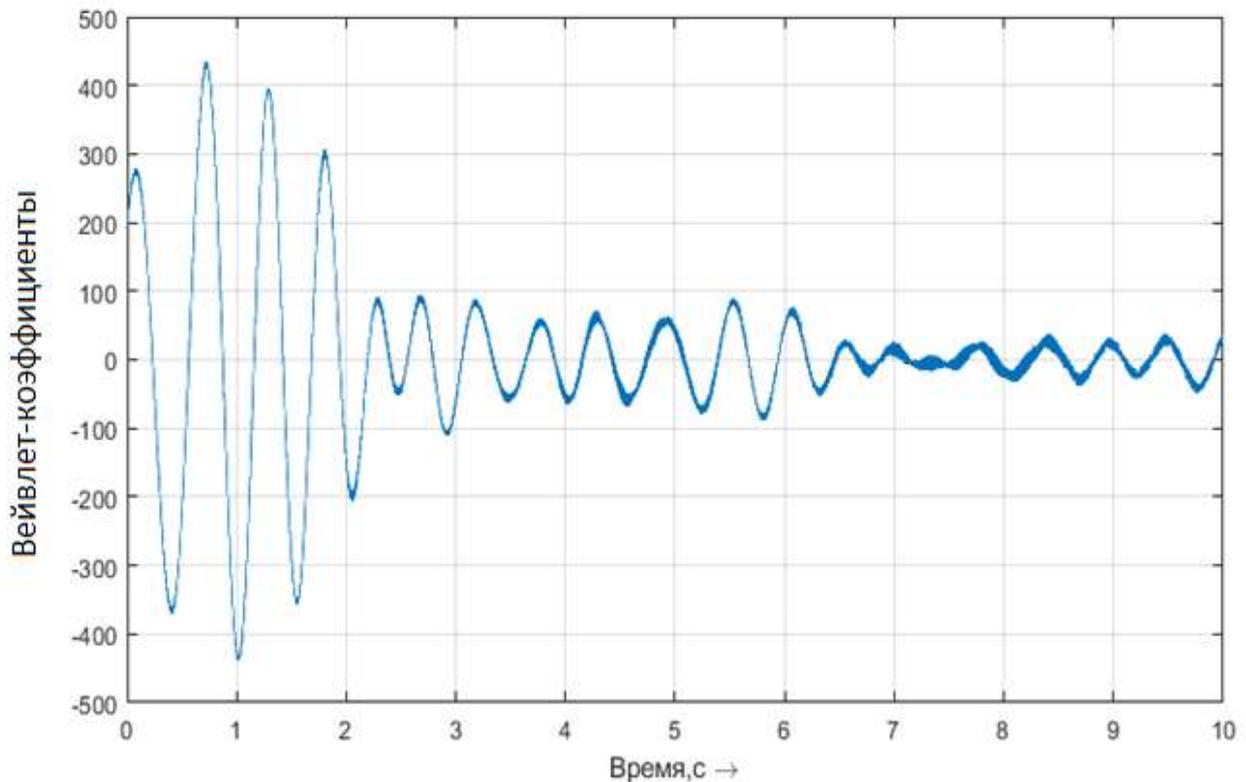


Рисунок 4.23 – График вейвлет-коэффициентов исправного насоса на характерных масштабах

При анализе результатов диагностики насоса №2 получено, что все остальные характерные масштабы имеют зависимости, аналогичные рисунку 4.23 кроме масштаба 6, характерного для неисправности «Дефект крепления поршней», имеющего зависимость, представленную на рисунке 4.24.

Амплитуда колебания сигнала является нарастающей во времени, что, согласно описанной выше теории, соответствует неисправному состоянию. Для проверки полученного заключения выполнено техническое обслуживание второго гидронасоса, результаты которого (см. рисунок 4.25) подтвердили выявленную неисправность крепления поршней.

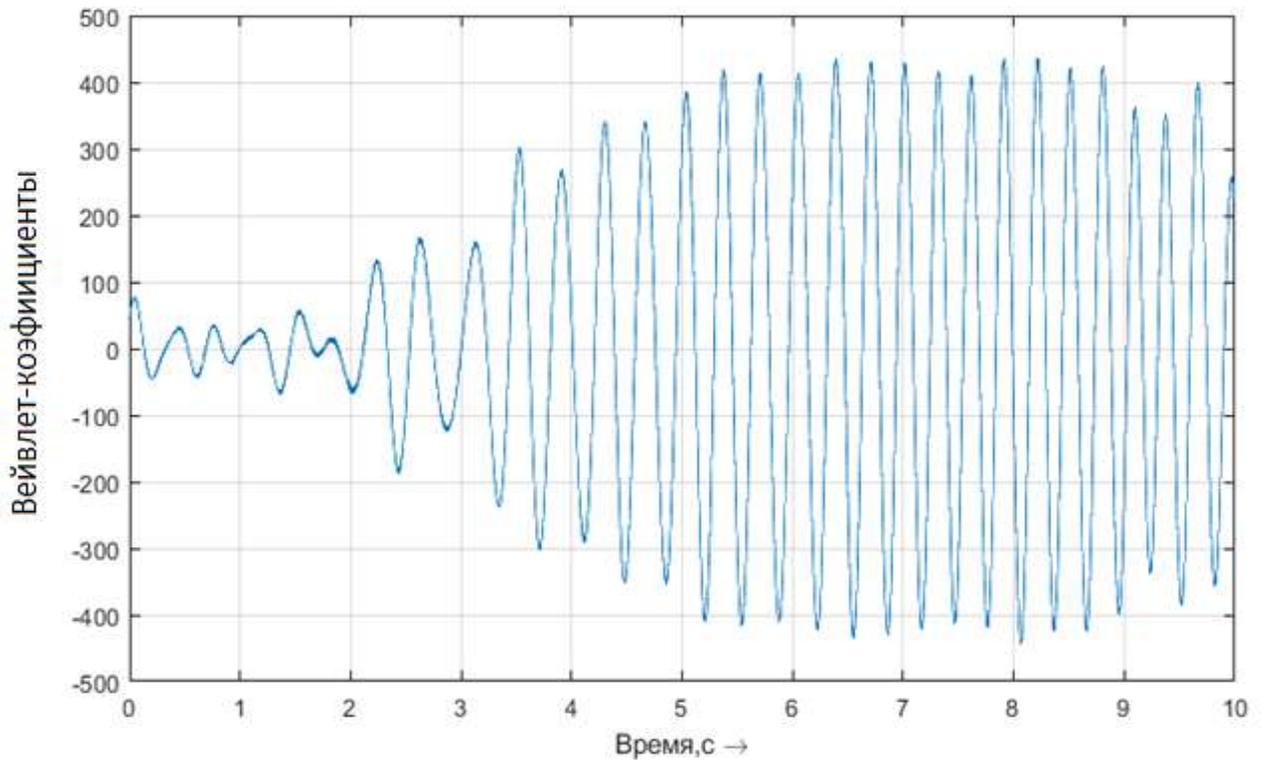


Рисунок 4.24 – Вейвлет-коэффициенты неисправного насоса для масштаба, характерного для дефекта крепления поршней



Рисунок 4.25 – Результат осмотра насоса РНАС 32/320

Проведенная серия экспериментов показывает, что зависимость значений вейвлет-коэффициентов на характерных масштабах от технического состояния

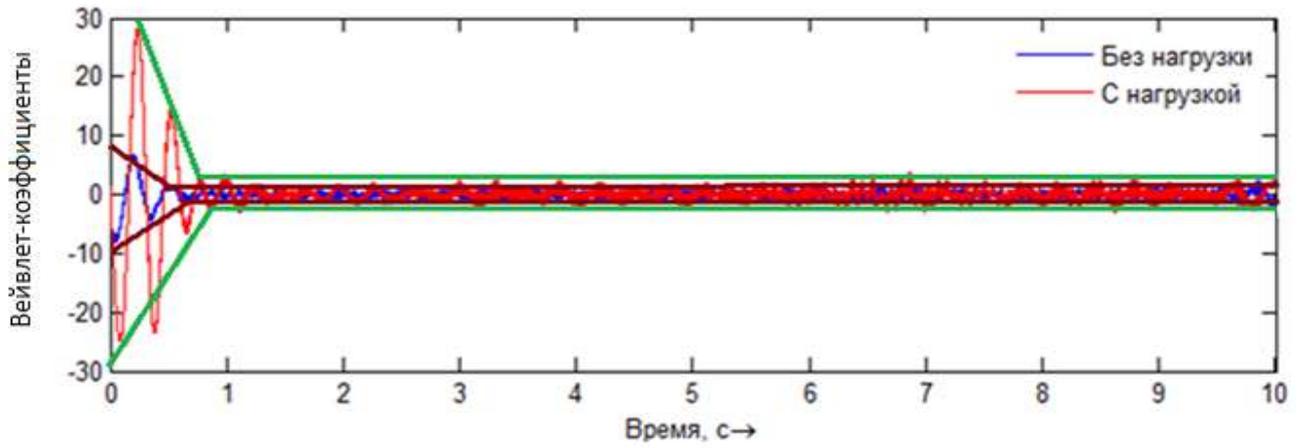
привода МПКС является закономерной и предоставляет возможность определить техническое состояние электрического или гидравлического привода по параметру тока или вибрации. Поэтому необходимо формализовать полученную закономерность и синтезировать унифицированный метод диагностирования систем приводов МПКС в режиме реального времени.

4.3 Модель оценки текущего состояния систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры

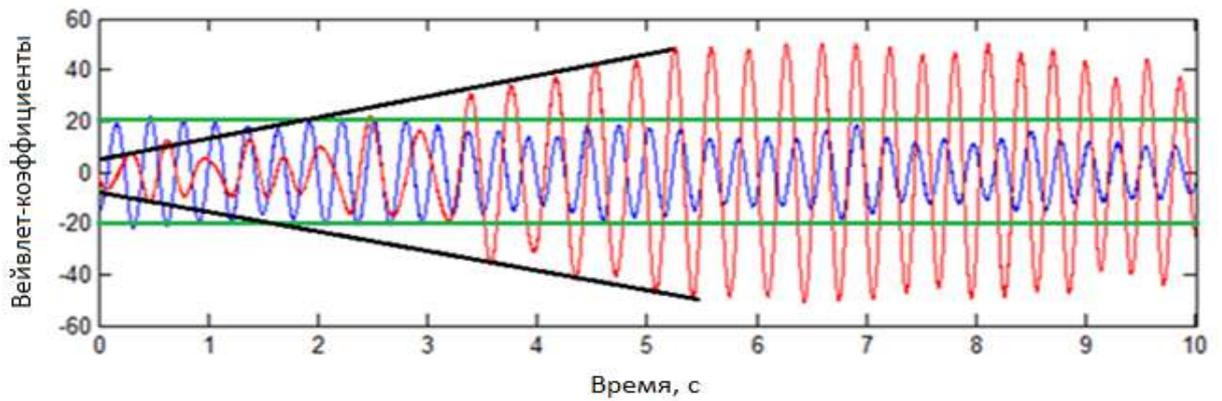
В параграфах 4.1, 4.2 диссертационной работы подробно описаны экспериментальные исследования электрических и гидравлических приводов по параметрам тока и вибрации с различными неисправностями при различных условиях нагружения. В результате экспериментов установлена взаимосвязь между техническим состоянием привода, условиями его нагружения и видом графика вейвлет-преобразования тока или вибрации на характерных и нехарактерных частотах диагностирования. Сравнительный анализ коэффициентов вейвлет-преобразования для приводов при различных условиях нагружения, полученный в первой серии опытов, представлен на рисунке 4.26.

Анализ графиков, приведенных на рисунке 4.26, показывает, что для исправного привода характер зависимости коэффициентов вейвлет-преобразования является затухающим (см. рисунок 4.26, а). Имеются колебания при пуске, которые достаточно быстро уменьшаются и стабилизируются. Рост нагрузки приводит к увеличению времени переходного процесса и росту амплитуды сигнала. При этом сигнал также является затухающим, регулярным и симметричным относительно оси времени.

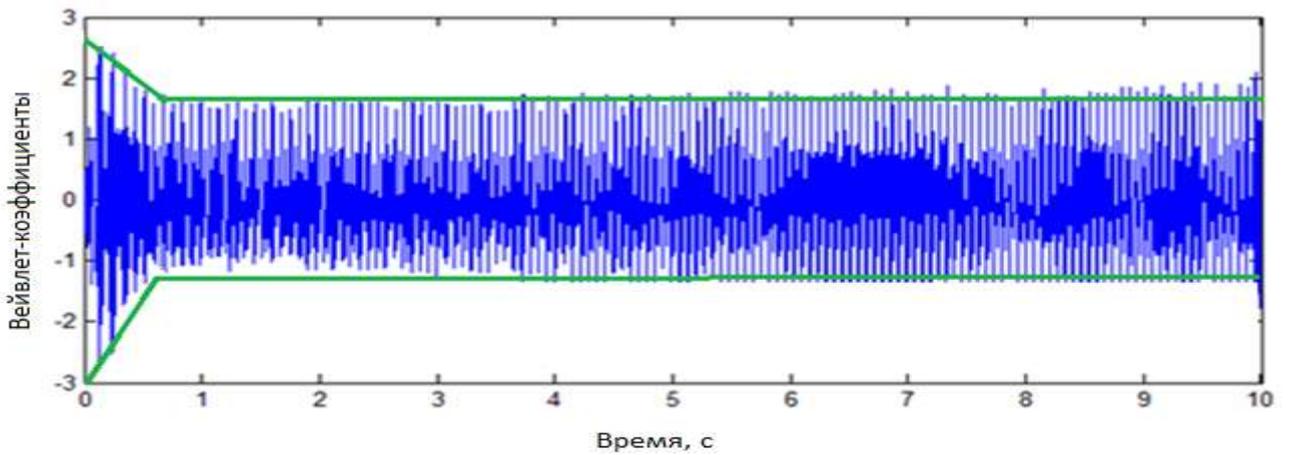
В случае неисправного электропривода без нагрузки характер временной зависимости коэффициентов вейвлет-преобразования является линейным, амплитуда колебаний сигнала на порядок выше, чем для исправного сервопривода (см. рисунок 4.26, б). При увеличении внешней нагрузки на неисправный привод амплитуда сигнала коэффициентов вейвлет-преобразования на характерном масштабе увеличивается, аппроксимирующая характеристика является восходящей.



а)



б)



в)

Рисунок 4.26 – Сравнительный анализ аппроксимирующих зависимостей вейвлет-коэффициентов при различных условиях нагружения привода:

а – исправный привод; б – неисправный привод; в – нехарактерный масштаб вейвлет-коэффициентов

Анализ коэффициентов вейвлет-преобразования на нехарактерном масштабе показал, что сигнал является затухающим при пуске привода и линейным в установившемся режиме. При этом амплитуда установившегося сигнала равна амплитуде сигнала на характерном масштабе исправного привода (см. рисунок 4.26, в). Аналогичная зависимость видна из графиков рисунков 4.14 – 4.17. На характерных масштабах графики вейвлет-коэффициентов для исправного привода имеют затухающий характер, а колебания коэффициентов вейвлет-преобразования неисправного привода на характерном масштабе возрастают (см. рисунок 4.27).

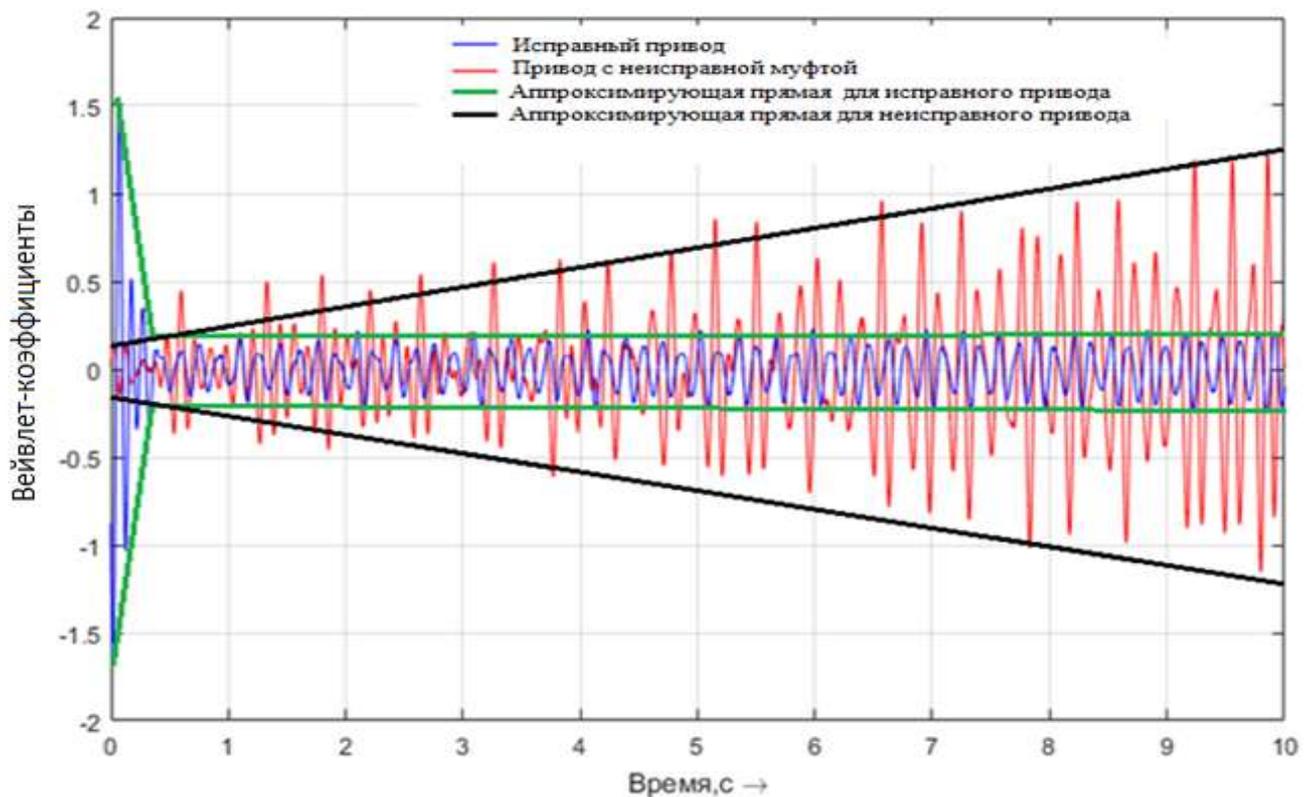


Рисунок 4.27 – Аппроксимация вейвлет-коэффициентов исправного и неисправного сервопривода

Характер изменения коэффициентов вейвлет-преобразования можно классифицировать следующим образом:

1. Нисходящий (затухающий) – имеют место колебания вейвлет-коэффициентов при пуске привода, которые быстро уменьшаются, и уровень сигнала ста-

билизируется. Данный тип сигнала характерен для исправного привода или нехарактерного масштаба.

2. Линейный – амплитуда сигнала постоянна на всем временном диапазоне, затухание колебаний не происходит. Общий уровень колебаний высокий. Сигнал характерен для неисправного ненагруженного привода.

3. Восходящий (нарастающий) – амплитуда колебаний увеличивается во времени. Сигнал характерен для неисправного нагруженного привода.

Если нагрузка постоянная (см. рисунок 4.26, б), то происходит рост амплитуды выше пусковой, а потом ее стабилизация. Если же нагрузка динамическая, как при разрушении муфты сервопривода, то амплитуда колебаний сигнала неуклонно растет во времени.

Для формализации полученной формы сигналов целесообразно использовать математическое преобразование Гильберта [9]. Для каждого характерного масштаба найдена функция непрерывного вейвлет-преобразования $\psi_{ab}(t)$, из которой формируется аналитически сопряженный сигнал $\hat{\psi}_{ab}(t)$, вычисляемый следующим образом (4.3):

$$\hat{\psi}_{ab}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\psi_{ab}(\tau)}{t-\tau} d\tau = \Gamma[\psi_{ab}(t)], \quad (4.3)$$

где $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\psi_{ab}(\tau)}{t-\tau} d\tau$ - несобственный интеграл Коши, вычисляемый из соотношения

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\psi_{ab}(\tau)}{t-\tau} d\tau = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\int_{-\infty}^{t-\varepsilon} \frac{\psi_{ab}(\tau)}{t-\tau} d\tau + \int_{t+\varepsilon}^{\infty} \frac{\psi_{ab}(\tau)}{t-\tau} d\tau \right). \quad (4.4)$$

Аналитический сигнал $s(t)$ действительной временной функции можно сформировать из анализируемого сигнала $\psi_{ab}(t)$ с помощью преобразования Гильберта (4.5):

$$s(t) = \psi_{ab}(t) + j \cdot \hat{\psi}_{ab}(t). \quad (4.5)$$

Тогда мгновенная амплитуда огибающей сигнала (4.6):

$$A(t) = |s(t)| = \sqrt{\psi_{ab}^2(t) + \hat{\psi}_{ab}^2(t)}. \quad (4.6)$$

Огибающая (см. рисунок 4.28) предоставляет возможность выделить в сигнале

области, отличающиеся энергией, которые свидетельствуют об изменении в техническом состоянии привода, что обеспечивает лучшую визуализацию изменения амплитуды вейвлет-коэффициентов во времени.

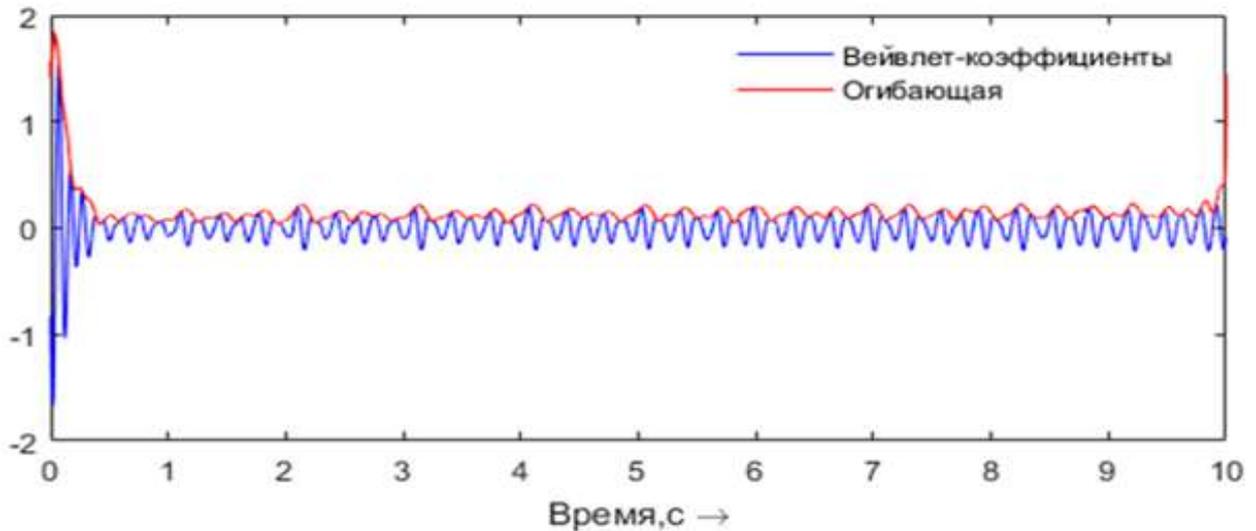


Рисунок 4.28 – Огибающая значений вейвлет-коэффициентов привода на характерном масштабе

Для дальнейшего анализа результатов экспериментов необходимо получить формализованное описание формы сигнала посредством аппроксимации точек его огибающей. Для этого использован метод наименьших квадратов [А 220] с полином степени m , обобщенная формула которого имеет вид (4.7):

$$A(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_m t^m. \quad (4.7)$$

Целью формализации огибающей является однозначное описание процессов, происходящих на заданном масштабе. Исходя из описанной выше характерной взаимосвязи, имеющиеся изменения могут быть описаны с помощью полинома первой степени:

$$A(t) = k \cdot t + b. \quad (4.8)$$

Тогда аппроксимация формы огибающей может быть сведена к расчету коэффициентов уравнения прямой, анализ которых предоставит возможность определить характер изменения вейвлет-коэффициентов на выбранном масштабе.

Для определения технического состояния привода необходимо определить

угол наклона аппроксимирующей прямой к оси абсцисс Ox , расположенной в декартовой системе координат OXY на плоскости. Этот угол вычисляется из соотношения $\operatorname{tg}\alpha = k$ и отсчитывается от положительного направления оси Ox к прямой против часовой стрелки (см. рисунок 4.29).

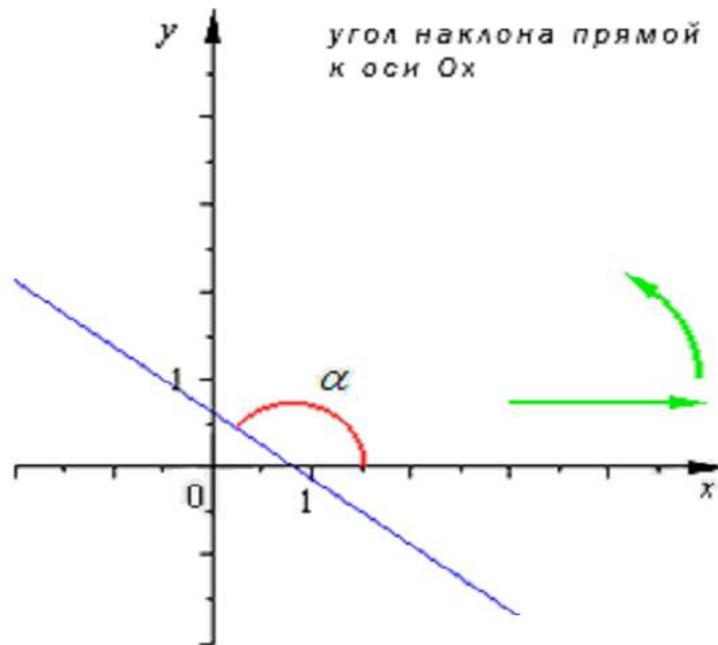


Рисунок 4.29 – Определение угла наклона прямой к оси x

Правило определения угла наклона прямой по коэффициенту k представлено на рисунке 4.30.

Положение прямой на плоскости может быть однозначно определено знаком коэффициента k уравнения прямой. Если $k < 0$, то угол наклона прямой $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$, а аппроксимирующая прямая является нисходящей к оси абсцисс. Если $k > 0$, то угол наклона $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$, а прямая является восходящей относительно оси абсцисс. Если $k = 0$, то угол наклона $\alpha = 0$, а прямая параллельна оси абсцисс. Если $k = \infty$, то угол наклона $\alpha = 90^\circ$, а прямая перпендикулярна оси абсцисс. Если график коэффициентов вейвлет-преобразования является затухающим, то прямая, аппроксимирующая его огибающую, должна быть нисходящей, то есть $k < 0$. Если колебания постоянные незатухающие, то аппроксимирующая прямая параллельна оси времени и $k = 0$. Если имеют место нарастающие колебания, то прямая

является восходящей и $k > 0$. Следовательно, по знаку коэффициента k прямой, аппроксимирующей огибающие коэффициентов вейвлет-преобразования на характерных масштабах, можно определить текущее состояние привода МПКС.

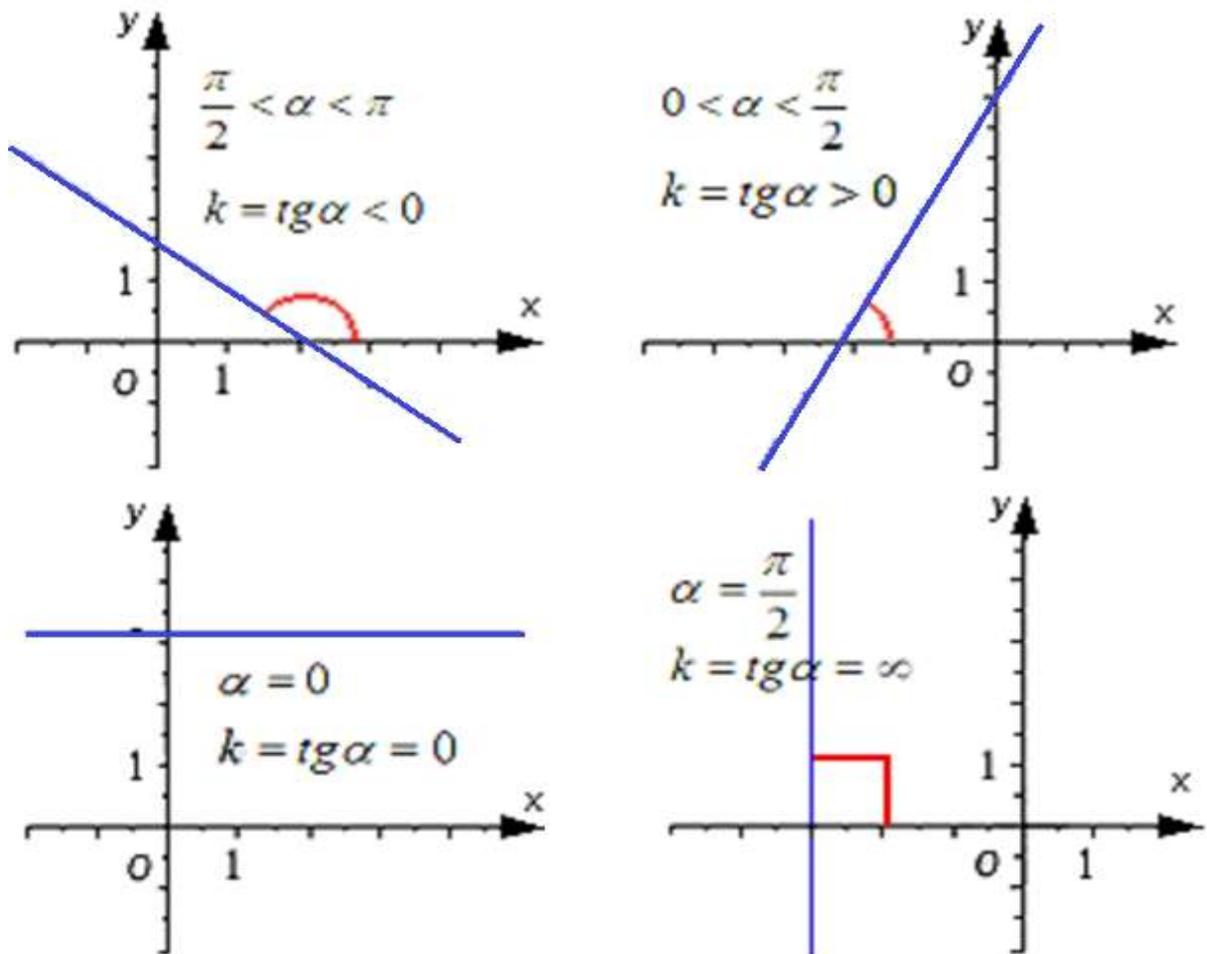


Рисунок 4.30 – Определение угла наклона прямой по коэффициенту k

Для подтверждения данного предположения проведем соответствующие расчеты. На рисунках 4.31 и 4.32 показаны огибающие коэффициентов вейвлет-преобразования для неисправного ненагруженного и неисправного нагруженного приводов. В первом случае имеет место высокий уровень колебаний сигналов при пуске сервопривода и их дальнейшая стабилизация в процессе его работы. Во втором случае колебания сигнала увеличиваются во времени.

Далее для каждой из полученных огибающих (см. рисунок 4.33, а) вычислена аппроксимирующая прямая (см. рисунок 4.33, б).

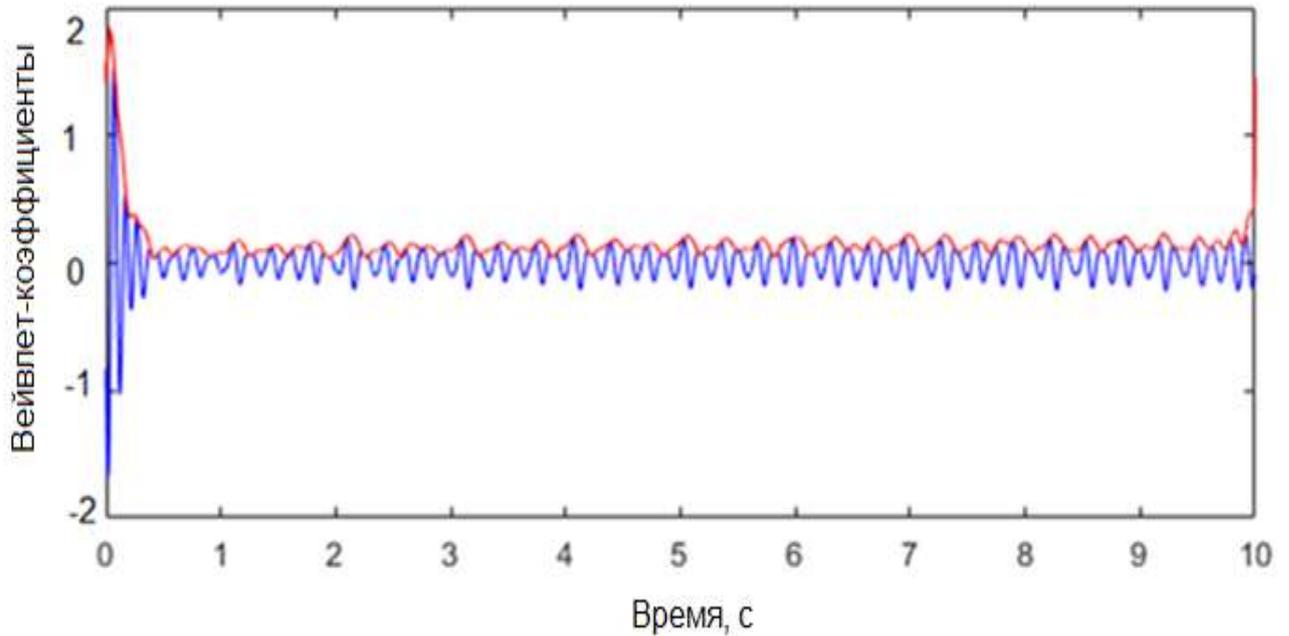


Рисунок 4.31 – Огибающая значений вейвлет-коэффициентов для исправного ненагруженного привода

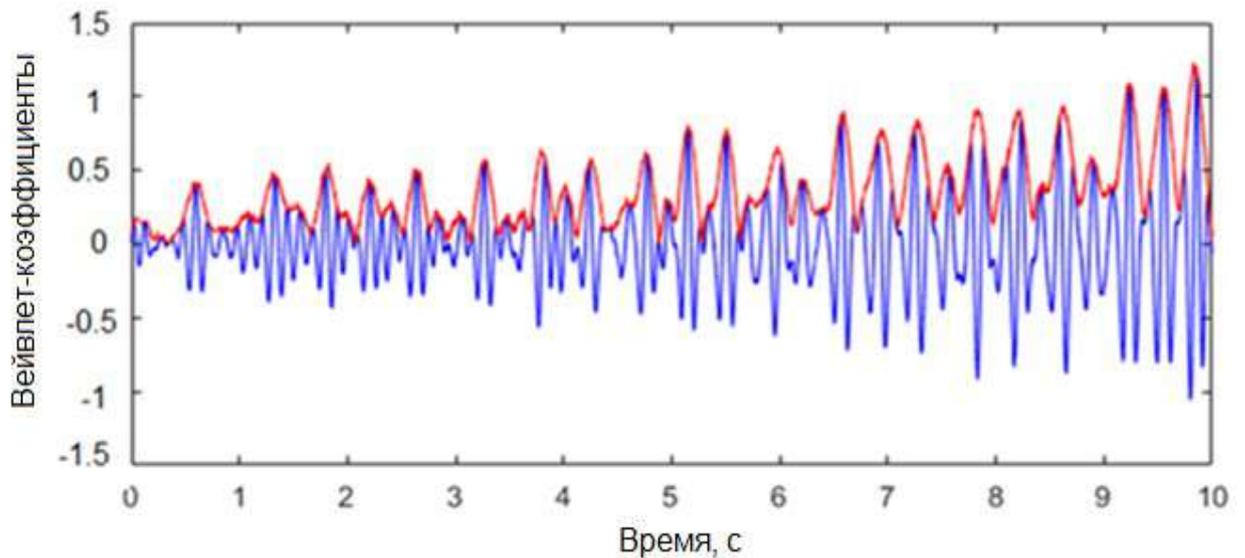
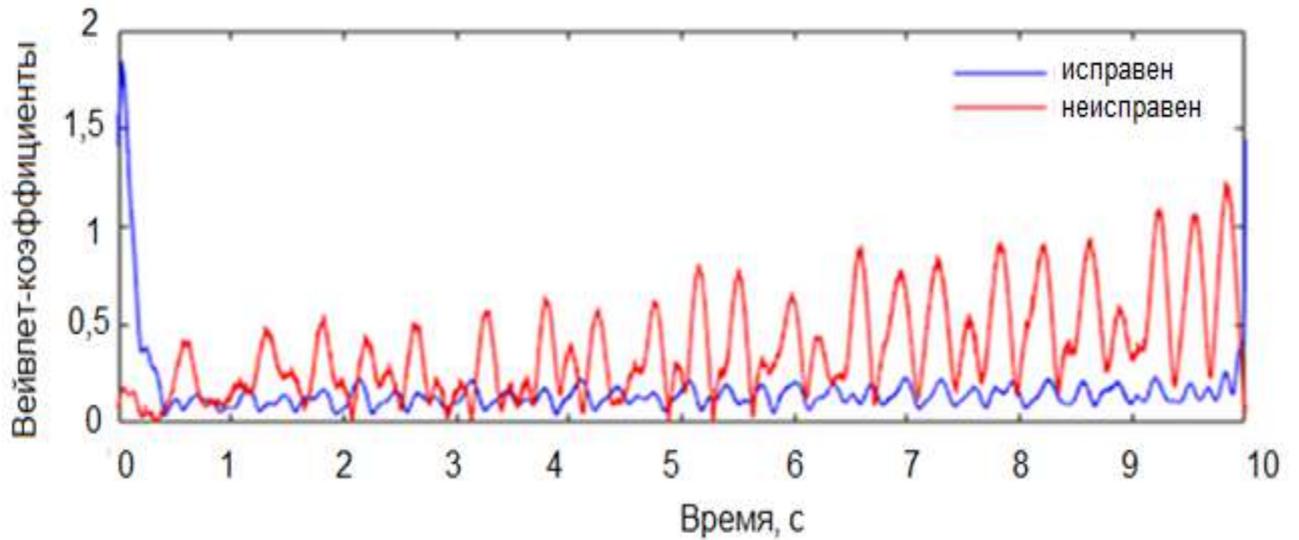
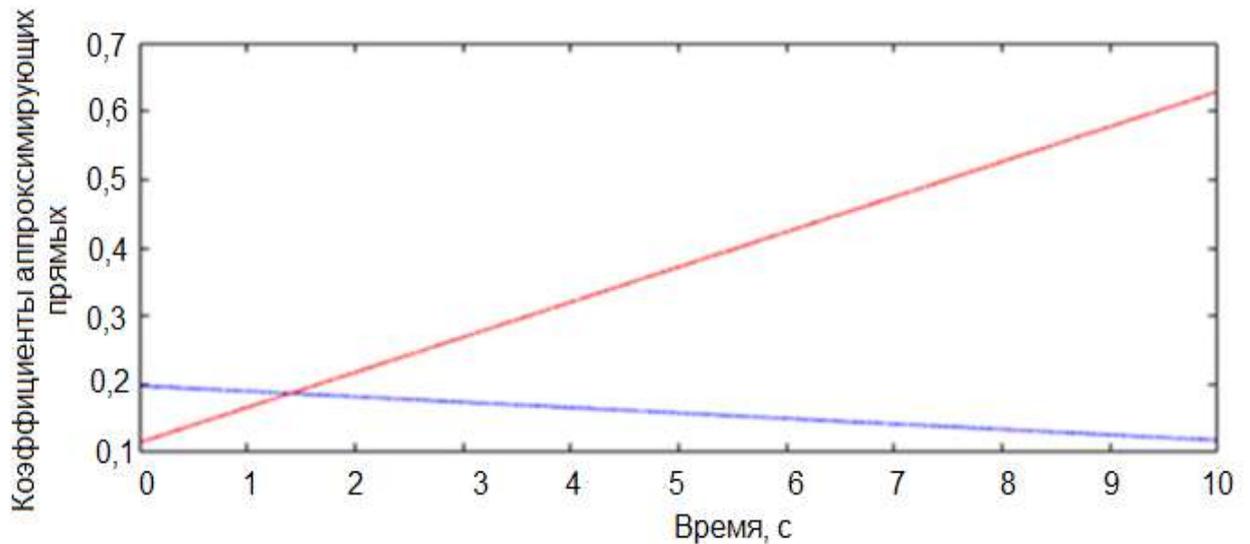


Рисунок 4.32 – Огибающая значений вейвлет-коэффициентов неисправного нагруженного привода

Амплитуда огибающей исправного ненагруженного привода является нисходящей, в то время как для неисправного нагруженного привода – растет во времени, а аппроксимирующая прямая ее огибающей является восходящей.



а)



б)

Рисунок 4.33 – Огибающие (а) и их аппроксимирующие прямые (б) исправного и неисправного приводов

На рисунке 4.34 приведены графики вейвлет-коэффициентов для исправного сервопривода с различной степенью нагружения, а на рисунке 3.35 показаны прямые, аппроксимирующие их огибающие.

Обе аппроксимирующие прямые являются нисходящими, но красная прямая, характерная для сервопривода с более высокой нагрузкой, идет выше и имеет меньший угол наклона к оси времени.

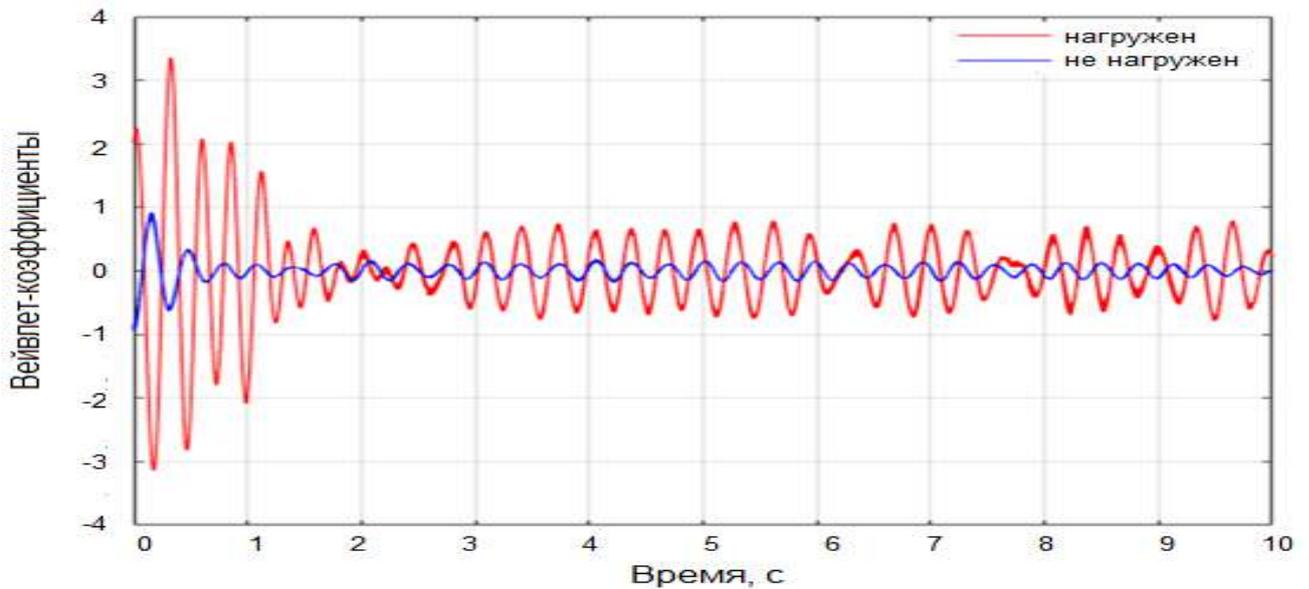


Рисунок 4.34 – Значения вейвлет-коэффициентов исправного нагруженного и исправного ненагруженного приводов

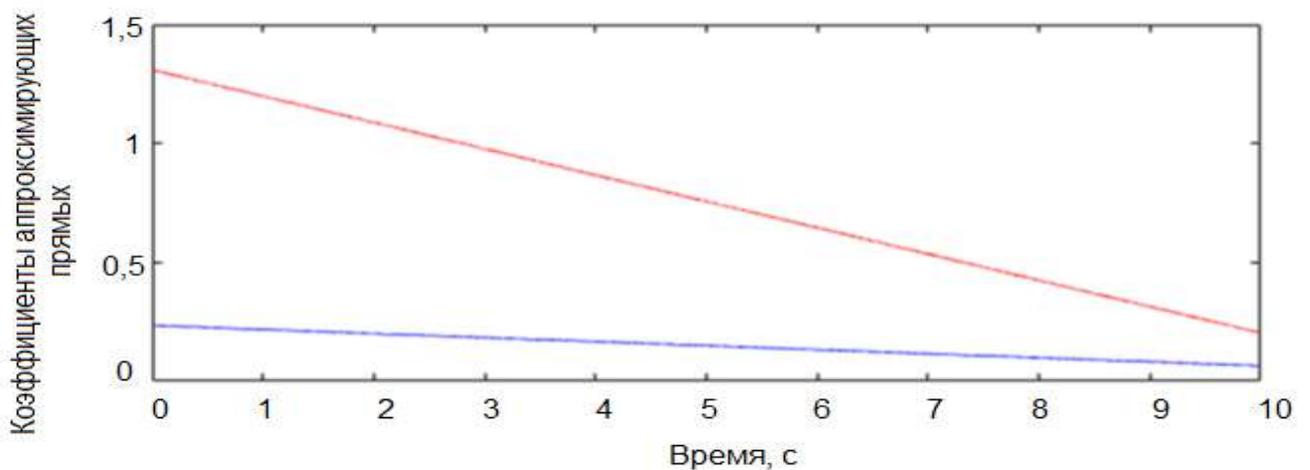


Рисунок 4.35 – Прямые, аппроксимирующие огибающие двух сигналов нагруженного и ненагруженного привода

На рисунке 4.36 показаны графики вейвлет-коэффициентов, огибающая и прямая ее аппроксимирующая для неисправного нагруженного привода, с нагрузкой меньшей, чем на рисунке 4.32.

Сравнительный анализ коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие вейвлет-коэффициентов при различных технических состояниях и нагрузках приведен в таблице 4.15.

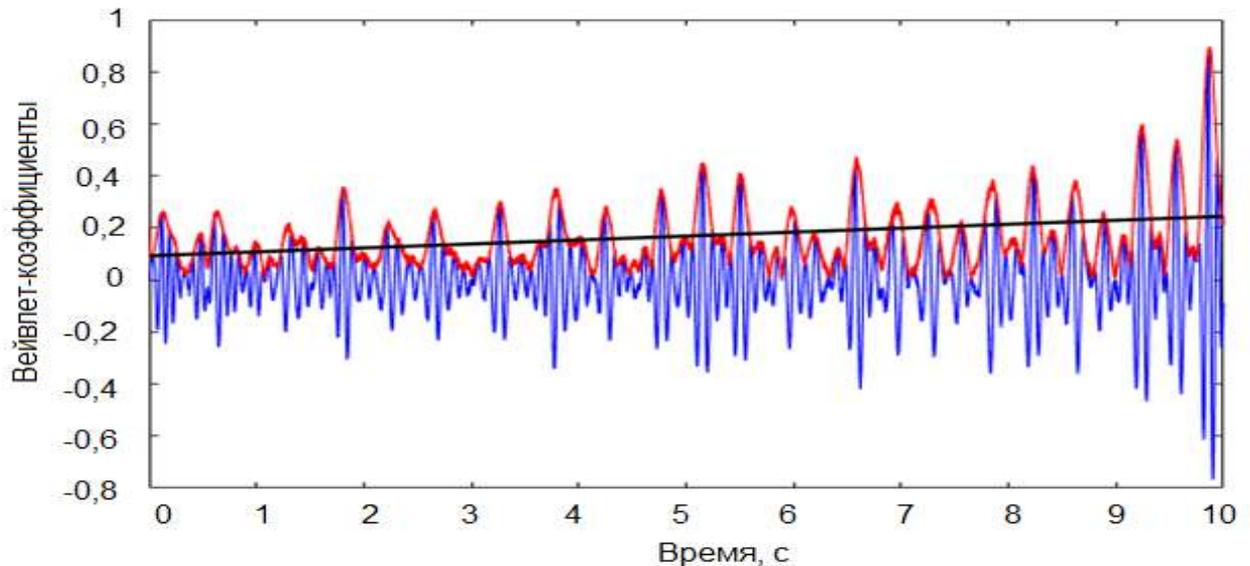


Рисунок 4.36 – Значения вейвлет-коэффициентов, их огибающая и соответствующая аппроксимирующая прямая неисправного нагруженного привода

Таблица 4.15 – Сравнительный анализ параметров аппроксимирующей прямой при различных состояниях электропривода

Состояние привода	Значение параметров аппроксимирующей прямой		
	k	b	α
Исправен, не нагружен (см. рис. 3.31)	-0,008	0,1979	-0,4571
Исправен, нагружен 1 (см. рис. 3.32)	-0,0170	0,2347	-0,9724
Исправен, нагружен 2 (см. рис. 3.35)	-0,1106	0,3093	-6,3096
Неисправен, нагружен 1 (см. рис. 3.36)	0,0152	0,0927	0,8689
Неисправен, нагружен 2 (см. рис. 3.35)	0,0514	0,1146	2,9432

Из таблицы 4.15 следует, что исправному сервоприводу соответствуют отрицательные коэффициенты k и угол наклона α прямой, аппроксимирующей огибающую значений вейвлет-коэффициентов. Для неисправного привода характерны $k \geq 0$ и $\alpha \geq 0$. Увеличение нагрузки на исправный привод приводит к росту коэффициента b и уменьшению k , а рост нагрузки на неисправный привод приведет к увеличению обоих коэффициентов аппроксимирующей прямой.

В результате экспериментальных исследований получены следующие выводы:

1. Колебания значений вейвлет-коэффициентов на выбранном масштабе могут быть: затухающими, постоянными и нарастающими. Первый тип колебаний

присущ исправному приводу, два других – неисправному.

2. Исследование значений вейвлет-коэффициентов на характерных масштабах предоставляет возможность определить текущее техническое состояние и нагрузку на привод.

3. Применение преобразований Гильберта для построения огибающей значений вейвлет-коэффициентов на выбранном масштабе с последующей ее аппроксимацией предоставит возможность определить текущее состояние привода и условия его нагружения.

4. Исправному приводу соответствует отрицательное значение коэффициента k , значения которых уменьшаются с ростом нагрузки. Коэффициент b всегда положительный и растет при росте нагрузки.

5. Неисправному приводу соответствуют положительные значения коэффициента k прямой, аппроксимирующей огибающие, которые увеличиваются при росте нагрузки.

6. Установленная закономерность изменения коэффициента k также справедлива для вибрации, однако данный параметр не предоставляет возможности определить нагрузку на привод. Поэтому для диагностирования электроприводов целесообразно выполнять анализ тока, для гидроприводов – контролировать техническое состояние по параметрам вибрации, а нагрузку – по давлению в гидросистеме.

4.4 Метод и алгоритм оценки текущего технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры

В результате поисковых исследований установлен ряд закономерностей, предоставляющих возможность синтеза метода оценки текущего технического состояния электрических и гидравлических приводов МПКС [A221-A226].

Для определения текущего технического состояния сервопривода необходимо выполнить следующую последовательность действий (рисунок 4.37.):

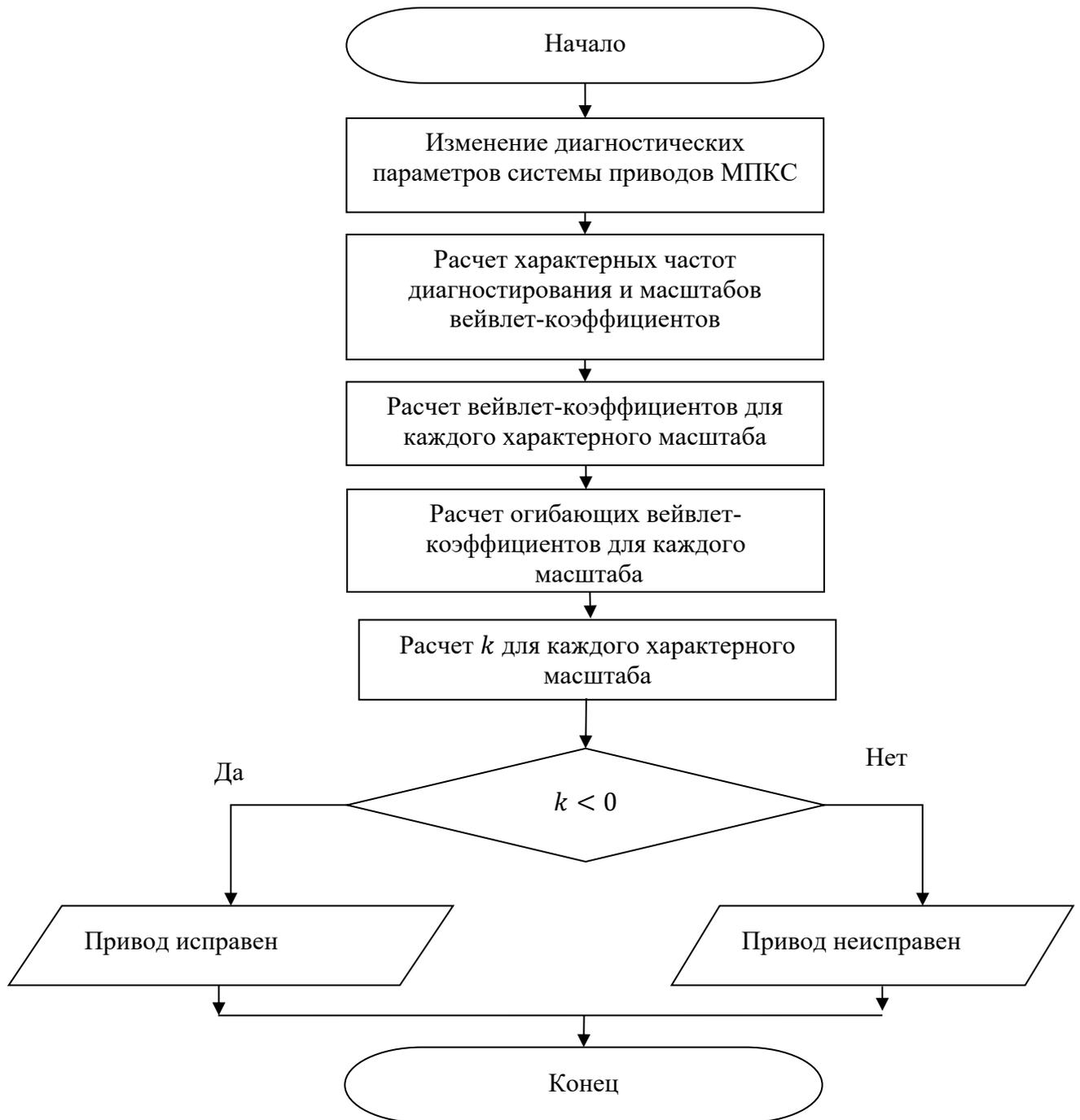


Рисунок 4.37 – Алгоритм оценки текущего технического состояния приводов МПКС

1. Для диагностирования электропривода произвести измерение емкостного и питающего тока. Для диагностирования гидропривода измерить его виброскорость.
2. Произвести расчет характерных частот диагностирования (см. таблицы 4.2, 4.13).
3. Произвести перевод характерных частот в масштаб вейвлета согласно

зависимости (4.2) и таблиц 4.2–4.3 или 4.13–4.14.

4. Выполнить вейвлет-преобразование диагностического сигнала, вычислить значения коэффициентов вейвлет-преобразования на всех характерных масштабах.

5. Для каждого характерного масштаба вычислить огибающую значений вейвлет-коэффициентов, рассчитать коэффициент аппроксимирующей прямой.

Произвести анализ полученных коэффициентов k аппроксимирующих прямых. Если на всех характерных масштабах $k < 0$, то привод исправен. Если $k \geq 0$ – неисправен и его эксплуатацию необходимо прекратить. Номера масштабов, на которых $k \geq 0$, предоставляет возможность определить возникшие неисправности.

Отличительной особенностью предлагаемого метода является возможность диагностирования системы приводом МПКС в режиме реального времени без использования сложных технических средств, больших вычислительных мощностей и специалистов-экспертов. Метод предоставляет возможность идентифицировать текущее состояние каждого привода МПКС, выявить все возникшие неисправности, что предоставляет возможность корректировать условия эксплуатации объекта, избежать внезапного отказа и, как следствие, возникновения аварийных ситуаций, ведущих к падению груза, травмирования людей и финансовым потерям. Отсутствие сложных вычислительных структур и алгоритмов предоставляет возможность избавиться от проблемы обработки больших объемов данных, что предоставит возможность реализовать анализ диагностических сигналов в режиме реального времени, и это является основным требованием при разработке киберфизической системы оценки технического состояния приводов МПКС. Применение классических апробированных численных методов расчета предоставит возможность избежать случайных ошибок и повысить точность вычислений.

4.5 Принципы прогнозирования технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Помимо определения текущего технического состояния приводов МПКС важно знать время и причину будущего отказа оборудования. Это предоставит возможность:

- своевременно внести необходимые изменения в существующий технологический процесс таким образом, чтобы повысить ресурс оборудования и исключить его внезапную аварийную остановку;
- минимизировать время поиска и устранения неисправностей;
- технически обоснованно планировать сроки профилактического обслуживания и ремонта оборудования;
- оптимизировать затраты на закупку запасных частей.

В процессе функционирования в приводе может возникнуть ряд неисправностей, каждая из которых выявляется путем расчета коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие вейвлет-коэффициентов для одного или нескольких характерных масштабов [A227, A228]. Следовательно, для прогнозирования технического состояния привода необходимо определить значения коэффициентов k для каждого характерного масштаба, а затем – развитие неисправностей и состояния всего привода в целом (рисунок 4.38).

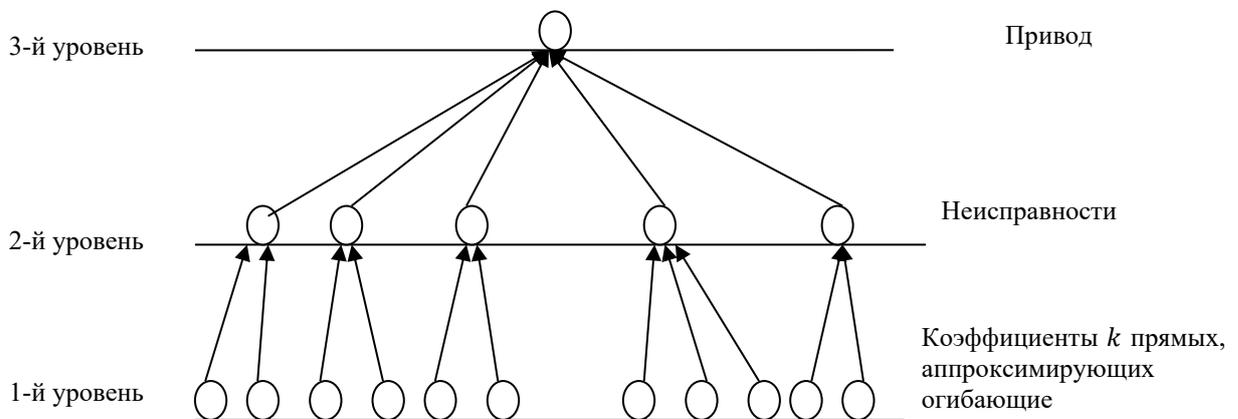


Рисунок 4.38 – Иерархическая структура процесса прогнозирования состояния привода МПКС

Систематизация результатов комплексного исследования принципов прогнозирования технического состояния и определения вероятности отказов приводов МПКС и оборудования с использованием методов и средств лазерной неразрушающей диагностики и моделирования информационно-измерительных и микропроцессорных

робототехнических мехатронных систем контроля и обработки диагностической информации, на основе искусственных нейронных сетей, нечетких моделей экспертного диагностирования и алгоритмов поиска неисправностей, а также моделей построения и интеллектуального управления киберфизической системой диагностирования и прогнозирования технического состояния МПКС и оборудования выполнена в опубликованном цикле авторских работ [A227-A269].

Прогнозирование технического состояния приводов МПКС имеет три функциональных уровня. Первый уровень предусматривает расчет значений коэффициентов k по каждому из характерных масштабов на следующий период эксплуатации $k(t_{N+1})$ привода. На втором уровне рассчитываются коэффициенты, показывающие развитие неисправностей. На третьем – определяется общее состояние привода. Действия, выполняемые на втором и третьем уровнях, аналогичны друг другу и представляют собой аппроксимацию выходов предыдущего уровня.

Для реализации краткосрочного и долгосрочного прогнозирования с определением времени и причин отказов целесообразно использовать иерархическую нейронную сеть, содержащую несколько уровней обратных связей и соответствующую структуре объекта диагностирования (см. рисунок 3.38).

4.6 Модель и метод прогнозирования технического состояния исполнительных приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Согласно методу оценки текущего технического состояния приводов МПКС, предложенному в параграфе 4.4, исходными данными для определения технического состояния в будущие моменты времени являются коэффициенты k на характерных масштабах диагностирования за N предыдущих, равных по времени, периодов эксплуатации. Для каждого масштаба прогнозируются значения коэффициента k в следующий период эксплуатации ($k(t_{N+1})$) с помощью «метода окон» [270], реализованного на базе нейронной сети прямой передачи сигнала (рисунок 4.39).

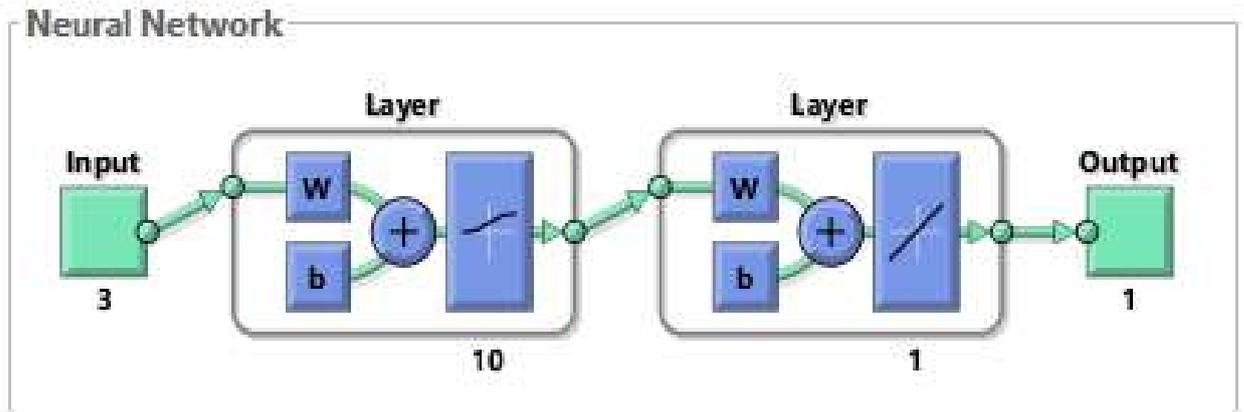


Рисунок 4.39 – Структура сети прямой передачи сигнала для прогнозирования коэффициента k

Исходными данными для обучения являются значения коэффициента k за предыдущие периоды эксплуатации $k(t_1) \dots k(t_N)$.

Входной вектор формируется смещением параметров предыдущего входа на единицу вправо, то есть может быть записан (4.9):

$$P = [k(t_1), \dots, k(t_{N-3}); k(t_2), \dots, k(t_{N-2}); k(t_3), \dots, k(t_{N-1})]. \quad (4.9)$$

Вектор цели H – значения коэффициентов k , которые необходимо получить на выходе (4.10):

$$H = [k(t_4), \dots, k(t_N)]. \quad (4.10)$$

По заданному входному вектору P нейронная сеть рассчитывает некоторое выходное значение параметра C , которое должно соответствовать целевому вектору H . Ошибка обучения сети рассчитывается по (4.11):

$$E = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^m (H - C)^2, \quad (4.11)$$

где m – количество нейронов на выходе сети; H – целевое значение выхода; C – фактическое значение выхода.

Идея алгоритма обучения заключается в использовании ошибки нейронной сети E для корректировки значений весов в скрытых слоях. На каждую итерацию алгоритма приходится два прохода сети – прямой и обратный. На первом этапе происходит передача значений вектора P к выходам нейронной сети. В результате

формируется некоторый выходной вектор C и определяется отклонение его значений E от заданного целевого вектора H . Полученная ошибка E распространяется от выхода к входу, а веса нейронов корректируются в соответствии с правилом :

$$\Delta\omega_{j,i}(n) = -\eta \cdot \partial E \cdot (\partial\omega_{ij})^{-1},$$

где $\omega_{j,i}$ – вес i -го сообщения j -го нейрона; η – параметр скорости обучения, который помогает дополнительно контролировать размер шага коррекции $\Delta\omega_{j,i}$ с целью более точной настройки на минимальную ошибку.

Шаг коррекции подбирается экспериментально в процессе обучения и варьируется от 0 до 1. При условии, что выходная сумма j -го нейрона

$$S_j = \sum_{i=1}^m \omega_{ij} \cdot k(t_i).$$

Дифференциал функции активации нейронов сети $f(S)$ должен быть вещественным и не быть равен нулю в любой точке. Данному условию соответствует сигмоидальная функция, которая использована для активации нейронов скрытого слоя.

На «прямом проходе» алгоритм использует стохастический градиентный спуск в многомерном пространстве весов в направлении антиградиента для достижения функции минимизации ошибки. Условием остановки алгоритма обучения является достижение заданного минимума функции ошибки с заданной точностью. Это предоставляет возможность сократить время обучения и избежать переобучения сети. Преимуществами алгоритма обратного распространения ошибок является простота его реализации и устойчивость к аномалиям и выбросам в данных.

Для определения коэффициента $k(t_{N+1})$ в следующий период эксплуатации сервопривода на вход сети подается следующий вектор-столбец (4.11):

$$C = [k(t_{N-2}); k(t_{N-1}); k(t_N)]. \quad (4.11)$$

Результат обучения нейронной сети приведен на рисунке 4.40.

Полученная нейронная сеть предоставляет возможность спрогнозировать значение коэффициента для одного характерного масштаба привода МПКС.

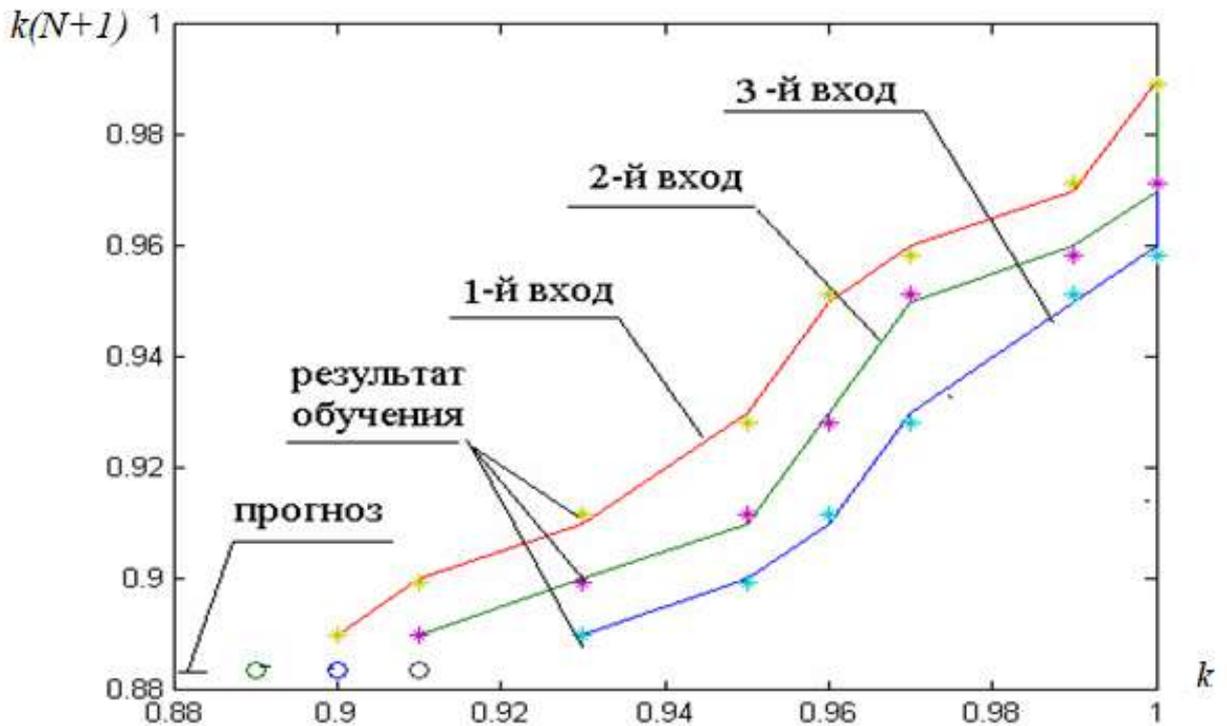


Рисунок 4.40 – Результат обучения сети прогнозирования коэффициента k на один период эксплуатации

Для определения технического состояния всего привода необходимо выполнить аналогичный расчет для всех его характерных масштабов. Если все коэффициенты k отрицательны, то привод сохранит работоспособность в следующий период эксплуатации. Если хотя бы один $k \geq 0$, то отказ привода произойдет в следующий период эксплуатации. Для выявления причины отказа выполняется аппроксимация выходов нейронных сетей, прогнозирующих значения $k(t_{N+1})$ на всех характерных масштабах, согласно таблицам 4.2 и 4.13.

Отрицательные значения выходов сетей первого уровня соответствуют исправному состоянию, а нулевые и/или положительные – неисправному. О наступлении каждой конкретной неисправности можно судить в случае, если спрогнозированные коэффициенты всех характерных масштабов положительны, что соответствует логической операции «ИЛИ» или «максимум». Принятие решения о прогнозном состоянии привода выполняется по худшему варианту, что соответствует логической операции «ИЛИ» или «максимум». Тогда расчет коэффициентов развития неисправностей

K_{FAULT_j} и состояния всего привода K_{MOTOR} выполняется в соответствии со структурой прогнозирования (см. рисунок 4.38) согласно (4.12) (4.13):

$$K_{FAULT_j} = \max(k_i); \quad (4.12)$$

$$K_{MOTOR} = \max(K_{FAULT_j}). \quad (4.13)$$

Для расчета времени отказа привода необходимо добавить полученные результаты прогнозирования во входной вектор сети и повторять весь процесс, пока прогнозируемый коэффициент не станет $K_{MOTOR} \geq 0$. Число пройденных итераций равно количеству периодов сохранения работоспособности T . На рисунке 4.41 представлена функциональная схема, иллюстрирующая синтезированный метод прогнозирования технического состояния. Согласно предложенной структуре прогнозирования (см. рисунок 4.38) разработана иерархическая нейронная сеть (см. рисунок 4.42), имеющая три функциональных подсистемы:

- прогнозирование значения коэффициента k на каждом характерном масштабе;
- определение уровня развития неисправностей привода;
- определение состояния привода в последующий период эксплуатации.

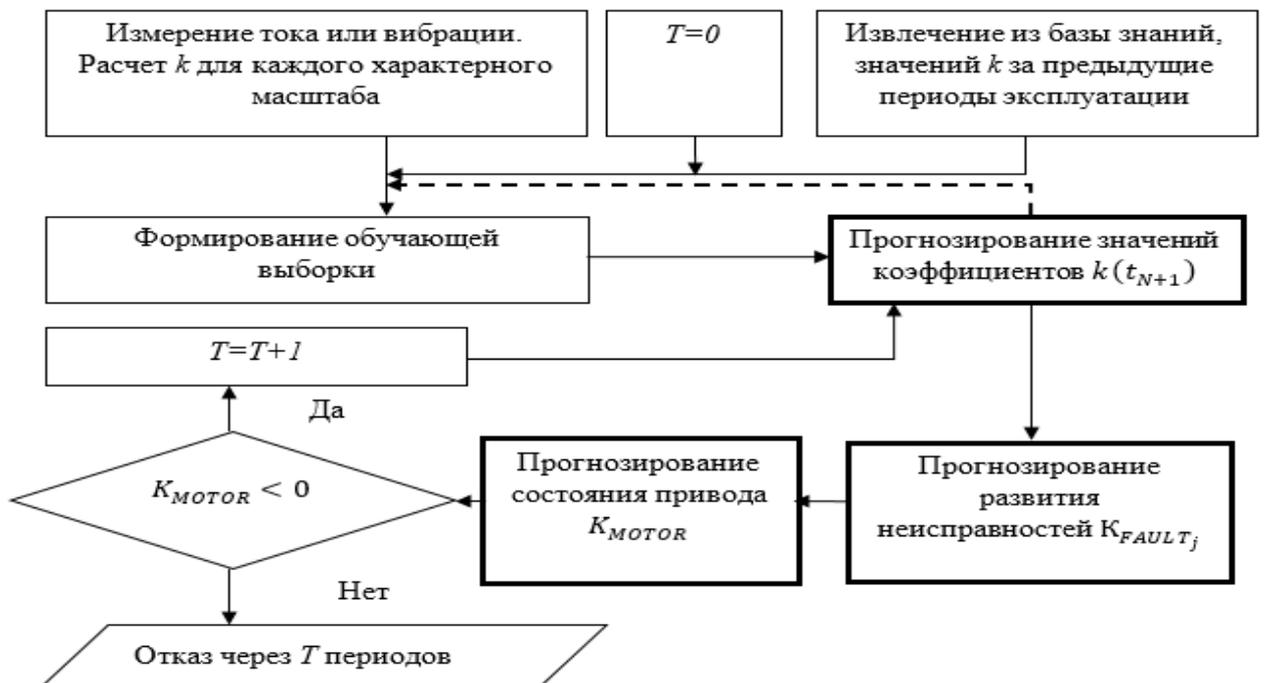


Рисунок 4.41 – Структура реализации метода долгосрочного прогнозирования технического состояния приводов МПКС

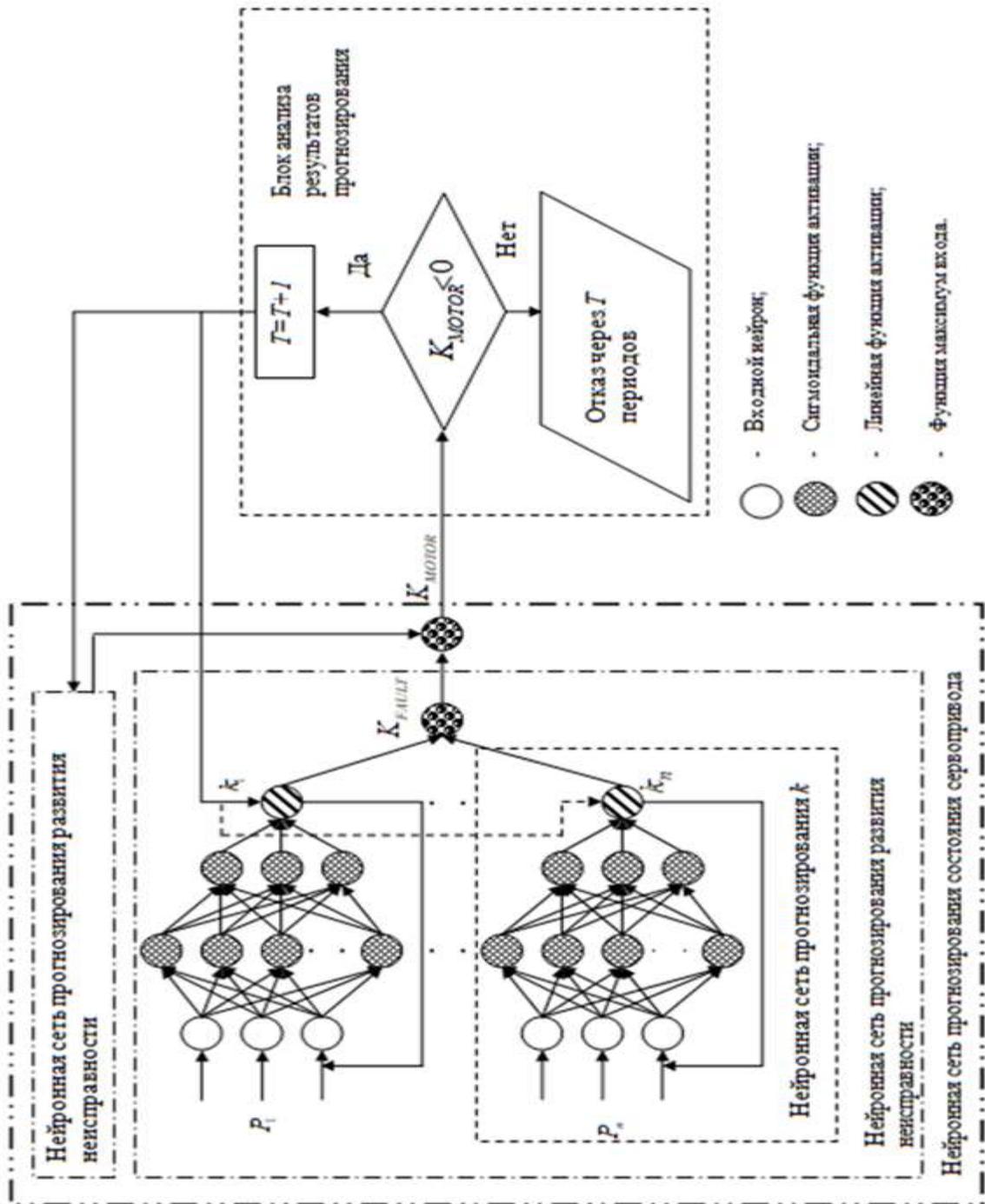


Рисунок 4.42 - Структура нейронной сети прогнозирования технического состояния приводов МПКС

Синтезированная нейронная сеть содержит блок анализа результатов прогнозирования, оценивающий значение коэффициента технического состояния привода $K_{МОТОР}$, а также период сохранения работоспособности T .

Для реализации долгосрочного прогнозирования предложенная нейронная

сеть имеет гибкую обратную связь (пунктирная линия на рисунке 4.41 и 4.42), передающую результат прогнозирования первого уровня (коэффициентов k) на вход сети. Данная обратная связь активируется только в том случае, если полученное значение $K_{МОТОР} < 0$. Выход нейронной сети в формате периода сохранения работоспособности T предоставит возможность технически обоснованно планировать сроки технического обслуживания и ремонта оборудования, рассчитать время появления и причину неисправности в будущем, оптимизировать режим эксплуатации МПКС, избежать внезапного отказа его исполнительных приводов и длительного простоя технологического оборудования.

4.7 Выводы по главе 4

1. Установленная закономерная взаимосвязь предоставляет возможность по результатам вейвлет - разложения сигналов тока и/или вибрации определить техническое состояние и внешнюю нагрузку на приводы МПКС.

2. Предложен метод оценки текущего технического состояния приводов МПКС, отличающийся расчетом коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие вейвлет-коэффициентов на характерных масштабах и предоставляющий возможность без применения сложных технических средств определить техническое состояние объекта в текущий момент времени.

3. Предложен метод оценки прогнозного технического состояния приводов МПКС, отличающийся ступенчатой экстраполяцией спрогнозированных значений коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие значений вейвлет-коэффициентов на характерных масштабах для определения периода сохранения работоспособности приводом.

4. Предложенная система оценки технического состояния предоставляет возможность по тренду значений коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие за равные периоды эксплуатации, определить текущее состояние привода и время сохранения работоспособности.

Глава 5 Метод синтеза отказоустойчивых машин и механизмов параллельной кинематической структуры

5.1 Анализ способов повышения надежности механизмов параллельной кинематической структуры

Синтез отказоустойчивых систем предполагает применение различных способов резервирования, однако структура МПКС не предусматривает установку дополнительных приводов на рабочие стойки, а нагрузка на имеющиеся приводы в 100% не предоставляет возможность выполнять резервирование системы. Поэтому единственным возможным подходом к синтезу отказоустойчивой системы приводов МПКС является применение методов нагрузочного резервирования, предполагающего использование в составе системы параллельных элементов с пониженной нагрузкой [270].

Надежность любой технической системы может быть охарактеризована вероятностью безотказной работы (ВБР) $p(t)$ и вероятностью отказа $q(t)$ (см. рисунок 5.1).

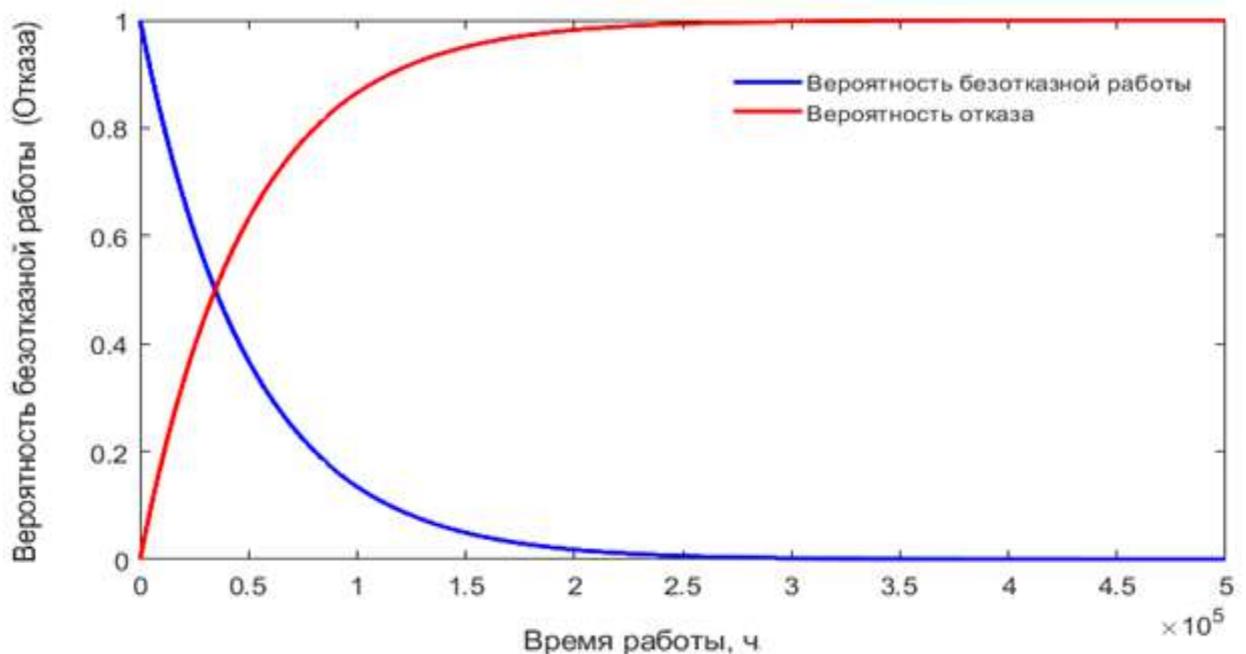


Рисунок 5.1 – Вероятность безотказной работы и вероятность отказа привода

Пусть λ_{100} – интенсивность отказа при нагрузке 100%, рассчитанная для каждого типа объектов и приведенная в справочной литературе. Снижение нагрузки на элемент приводит к пропорциональному снижению интенсивности отказа элемента.

Интенсивность отказа недогруженного элемента рассчитывается по:

$$\lambda = \lambda_{100} \cdot Load,$$

где $Load \in [0,1]$ – коэффициент текущей нагрузки на элемент.

Тогда вероятность отказа ненагруженного элемента может быть рассчитана (5.1):

$$q(t) = 1 - \exp(-\lambda_{100} \cdot Load \cdot t), \quad (5.1)$$

где t – время работы элемента, ч.

Снижение нагрузки приводит к снижению вероятности отказа (5.2) (см. рисунок 5.2) и увеличению ВБР (см. рисунок 5.3):

$$p(t) = \exp(-\lambda_{100} \cdot Load \cdot t).$$

Абсолютное увеличение ВБР при снижении нагрузки на элемент приведено на рисунке 5.4.

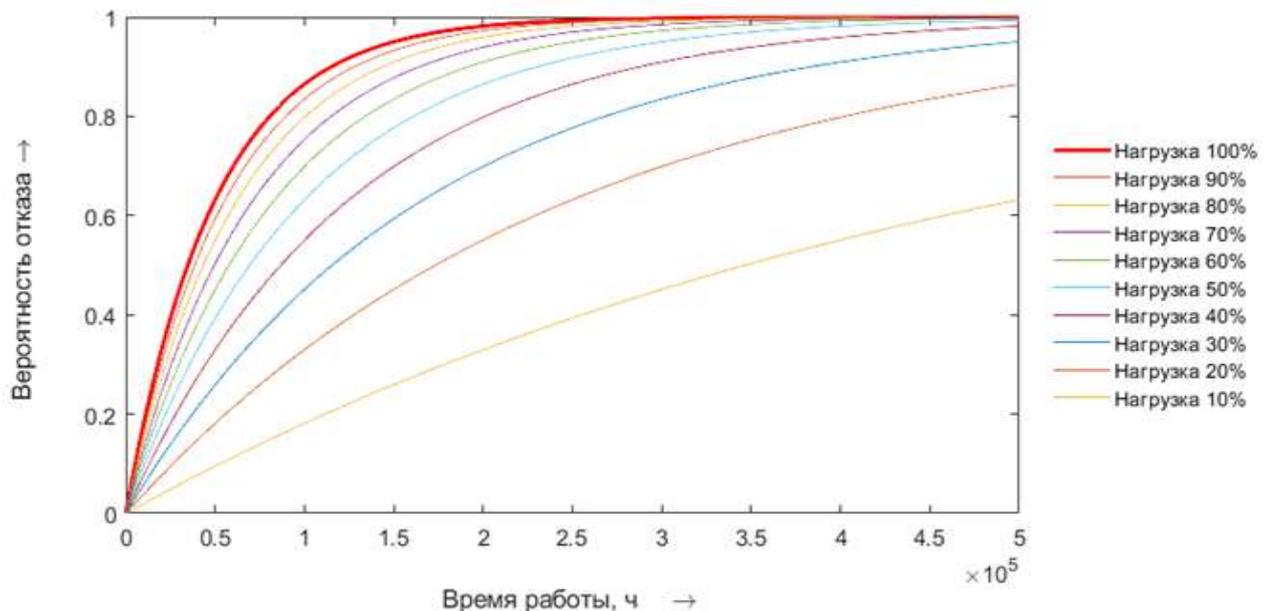


Рисунок 5.2 – Зависимость вероятности отказа от нагрузки на привод

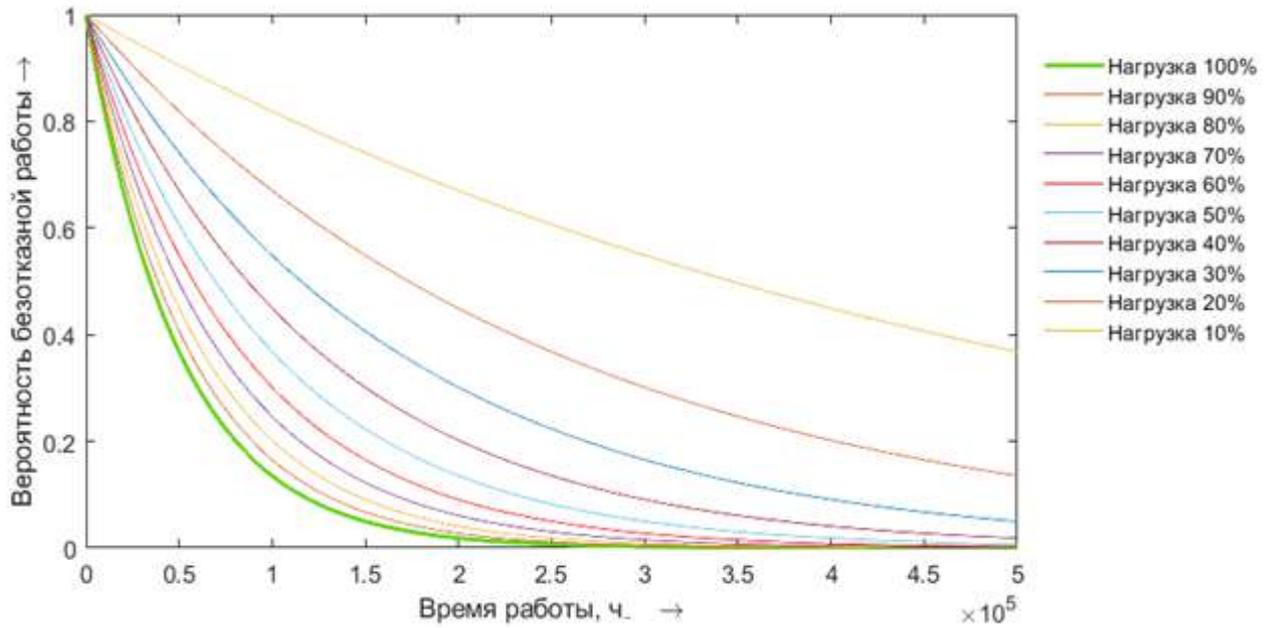


Рисунок 5.3 – Зависимость ВБР от нагрузки на привод

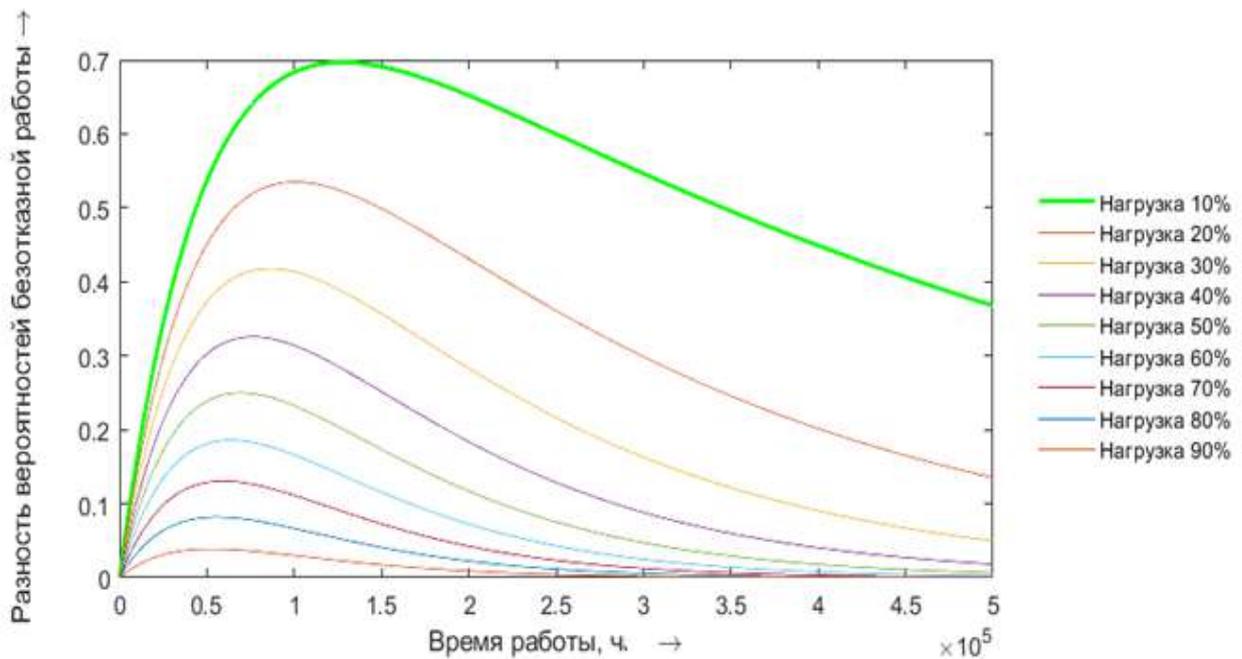


Рисунок 5.4 – Абсолютное отклонение ВБР при различных нагрузках

Из приведенного анализа следует, что снижение нагрузки на элемент существенно повышает его надежность и продлевает срок эксплуатации. МПКС имеет несколько идентичных приводов, функционирующих параллельно на одну общую внешнюю нагрузку (см. рисунок 5.5).

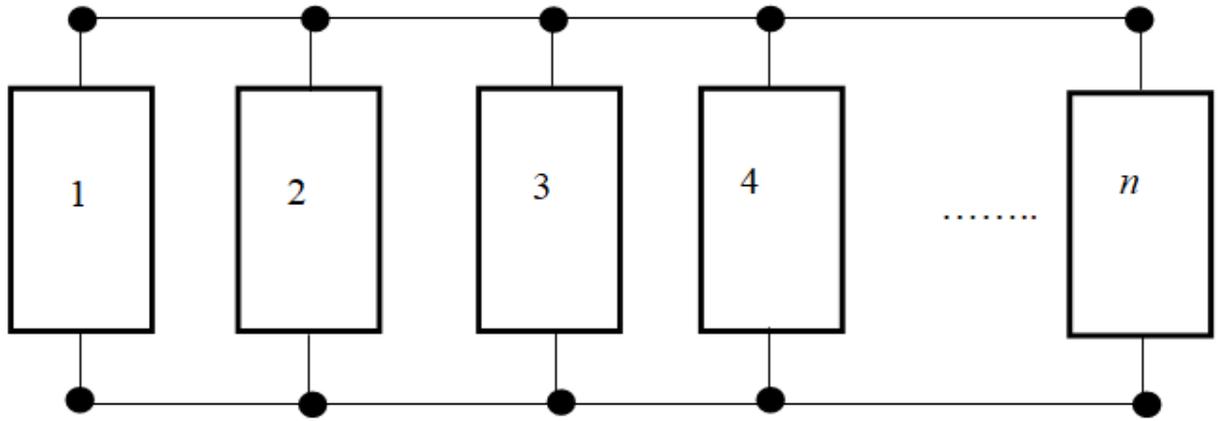


Рисунок 5.5 – Схема расчета надежности системы приводов МПКС

Для реализации нагрузочного резервирования необходимо, чтобы все приводы МПКС работали при пониженной нагрузке. В этом случае каждый из приводов является одновременно основным и резервным, способным в случае наступления отказов в системе принять дополнительную нагрузку.

В общем случае ВБР системы приводов МПКС определяется по

$$P_{\text{МПКС}} = 1 - \prod_{i=1}^n q_i(t),$$

где $q_i(t)$ может быть найдена согласно (5.1).

Максимальное увеличение ВБР системы приводов МПКС при различных нагрузках представлено в таблице 5.1. и на рисунке 5.6.

Таблица 5.1 – Максимальное увеличение ВБР МПКС при различных нагрузках на систему приводов

Доля нагрузки, %	Максимальное увеличение ВБР, %
10	99,661
20	96,021
30	87,7
40	76,043
50	62,7
60	48,89
70	35,38
80	22,613
90	10,793

Максимальное увеличение ВБР

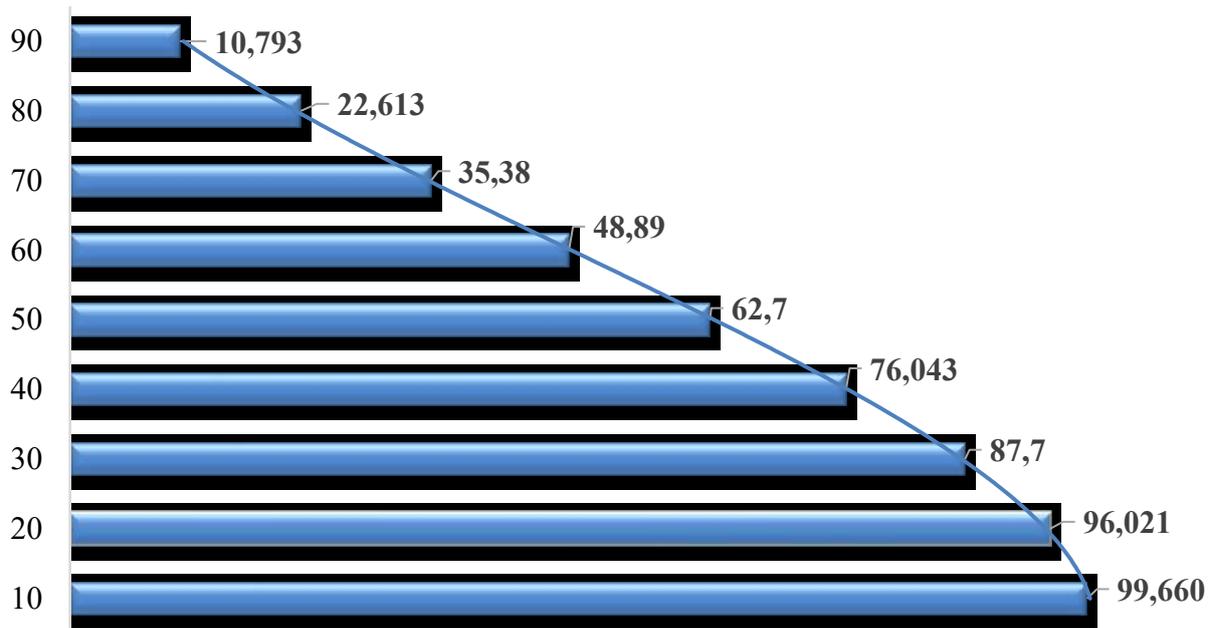


Рисунок 5.6 – Зависимость между процентом нагрузки и увеличением ВБР МПКС

Изменение ВБР системы при снижении нагрузки происходит нелинейно (см. рисунок 5.7).

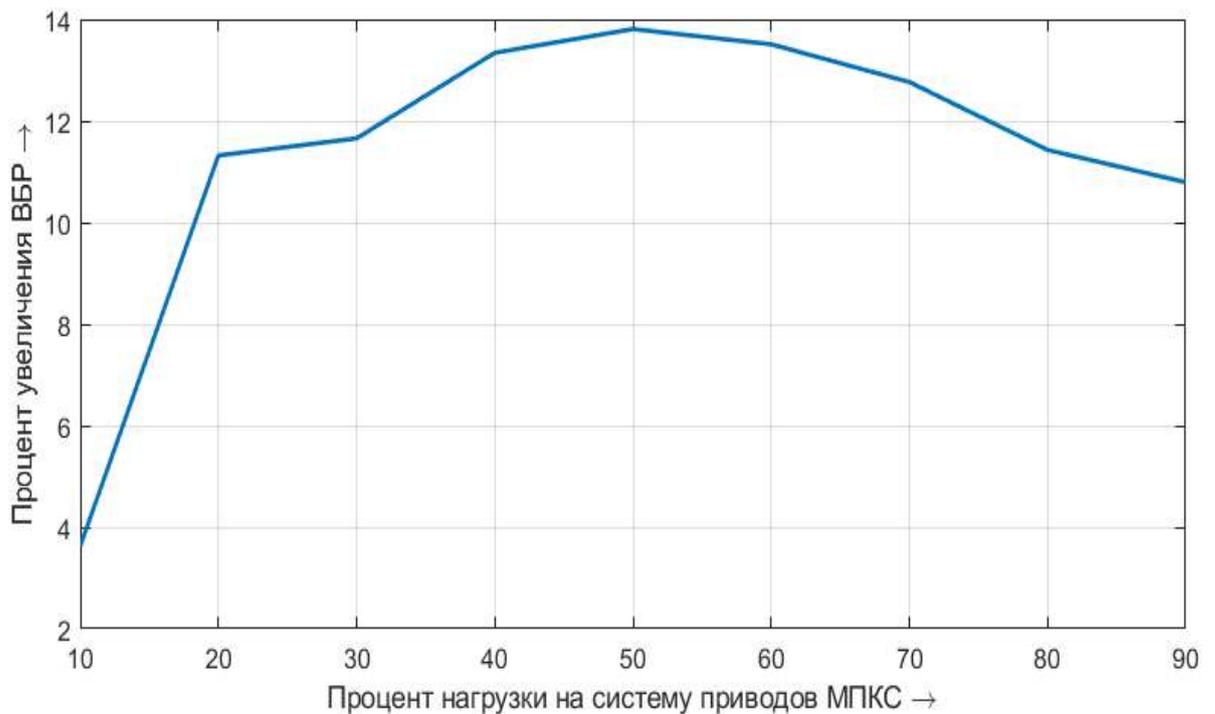


Рисунок 5.7 – Процент увеличения ВБР при изменении нагрузки на 10%

Снижение нагрузки со 100 до 90 % предоставляет прирост ВБР на 10,793 %. При дальнейшем снижении нагрузки данная разница увеличивается и при переходе с 60 на 50 % достигает своего максимума в 13,81 %. При дальнейшем снижении нагрузки процент увеличения ВБР снижается и при переходе с 20 на 10 % нагрузки составляет всего 3,629 %. Следовательно, режим загрузки менее 30 % неэффективен с позиции надежности МПКС.

Целью нагрузочного резервирования МПКС является возможность перераспределения нагрузки в случае отказа одного или нескольких приводов системы. Таким образом, при определении необходимого понижения нагрузки следует выполнять перераспределение таким образом, чтобы при увеличении нагрузки на резервный привод она не превысила 100 %. Увеличение нагрузки на привод при ее перераспределении приведет к мгновенному увеличению интенсивности отказа:

$$\lambda'_j = \lambda_{100} \cdot (Load_j + \Delta Load_j),$$

где $\Delta Load$ – коэффициент дополнительной нагрузки на привод.

Тогда ВБР системы приводов МПКС при перераспределении нагрузки:

$$P_{\text{пер}} = 1 - \prod_{j=1}^{n^*} (1 - \exp(-\lambda_{100} \cdot (Load_j + \Delta Load_j)) \cdot t),$$

где $n^* \leq n$ – количество исправных приводов МПКС.

Нагрузка, высвободившаяся при отказе привода, может быть перераспределена на один, два и более приводов. В случае переноса на один привод основная нагрузка не должна превышать 50 %, на два привода – не более 66 %. Применение большего количества резервных приводов предоставит возможность повысить основную нагрузку на систему приводов. Для выбора наиболее эффективного режима нагружения необходимо выполнить анализ ВБР при различных вариантах первоначального нагружения. На рисунке 5.8 представлены графики ВБР МПКС при нагрузке 100 и 50 %, а также при двух вариантах перераспределения нагрузки: на один или два привода.

Вероятность безотказной работы системы с неисправным приводом при переносе нагрузки на один привод выше, чем при ее равномерном перераспределении на два соседних привода примерно на 2 % (рисунок 5.9).

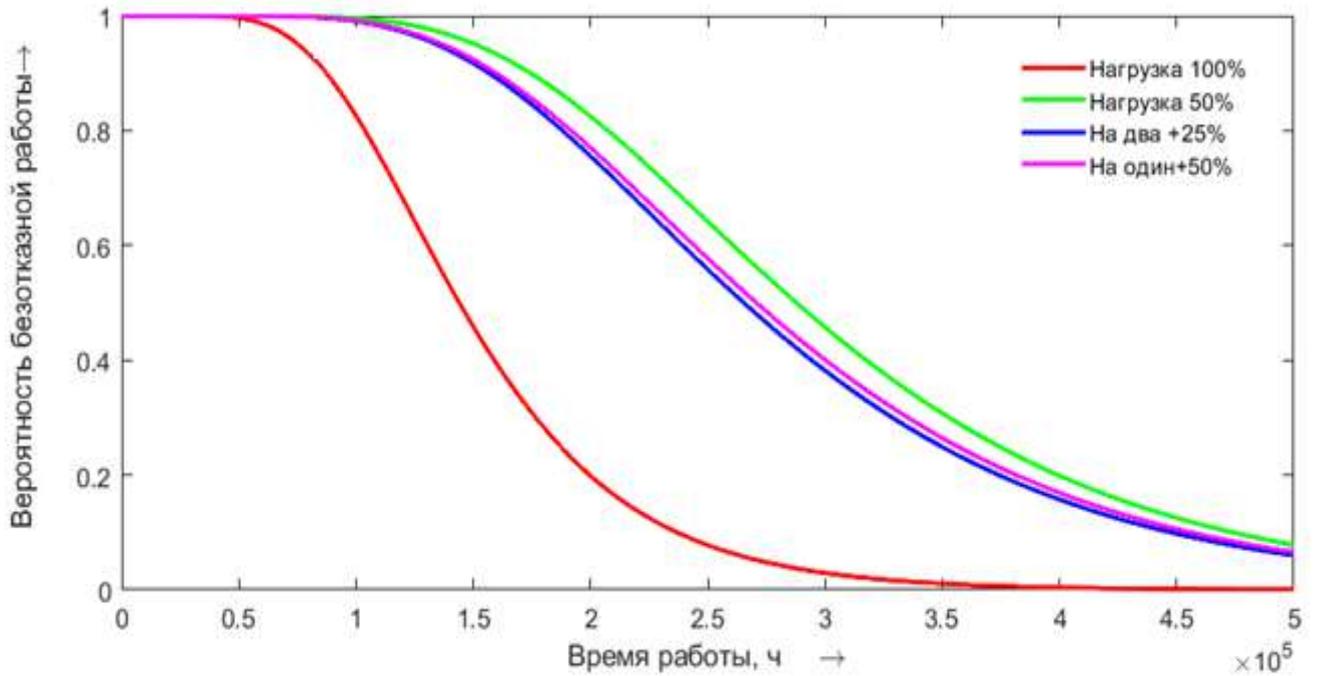


Рисунок 5.8 – Исследование вариантов перераспределения нагрузки при нагрузке на систему приводов МПКС 50 %

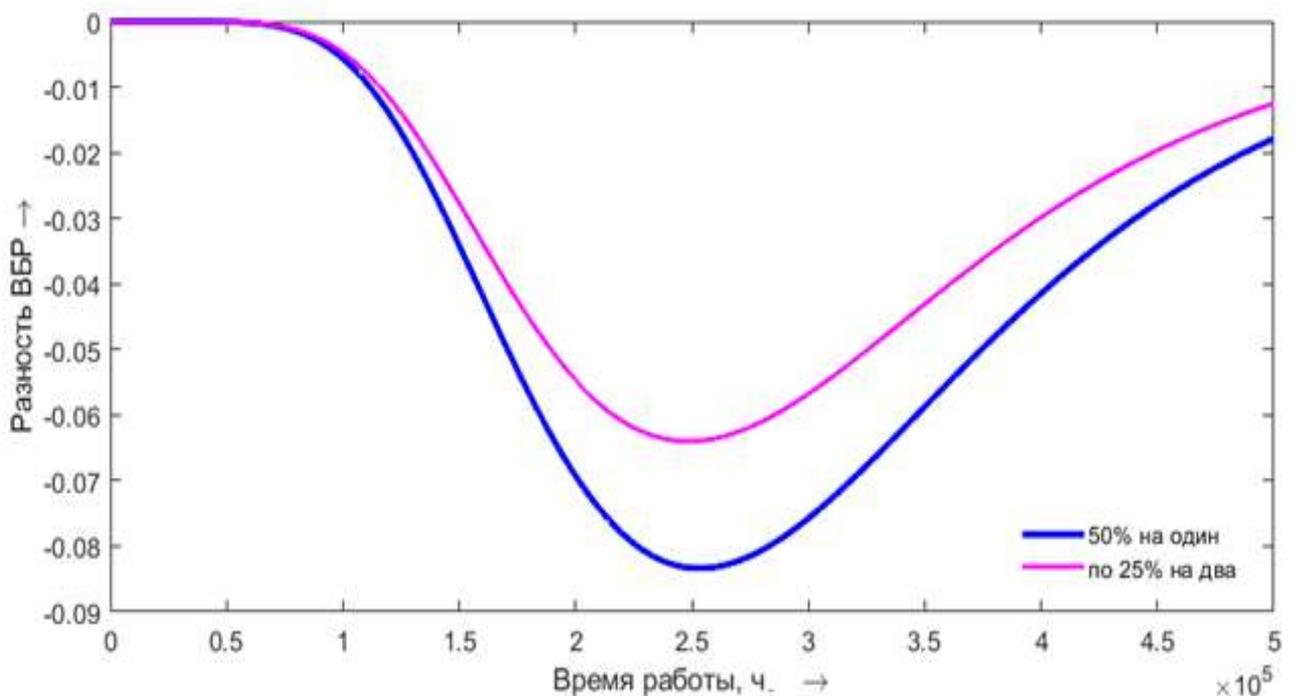


Рисунок 5.9 – Разность ВБР исправной системы с нагрузкой 50 % и при отказе одного привода и перераспределении на один или два привода

При эксплуатации системы приводов с нагрузкой 50 %, отказе одного привода и перераспределении его нагрузки на два соседних в равных долях (по 25 % на каждый) надежность системы снизится на 8,34 %, а при перераспределении на один – на 6,4 %. Однако в обоих случаях ВБР существенно выше по сравнению с исправным МПКС, имеющим полную нагрузку на приводы без возможности резервирования. Если система приводов имеет основную нагрузку 66 %, то при отказе одного привода его нагрузка может быть распределена на два соседних привода в равных долях по 33 % на каждый (см. рисунок 5.10).

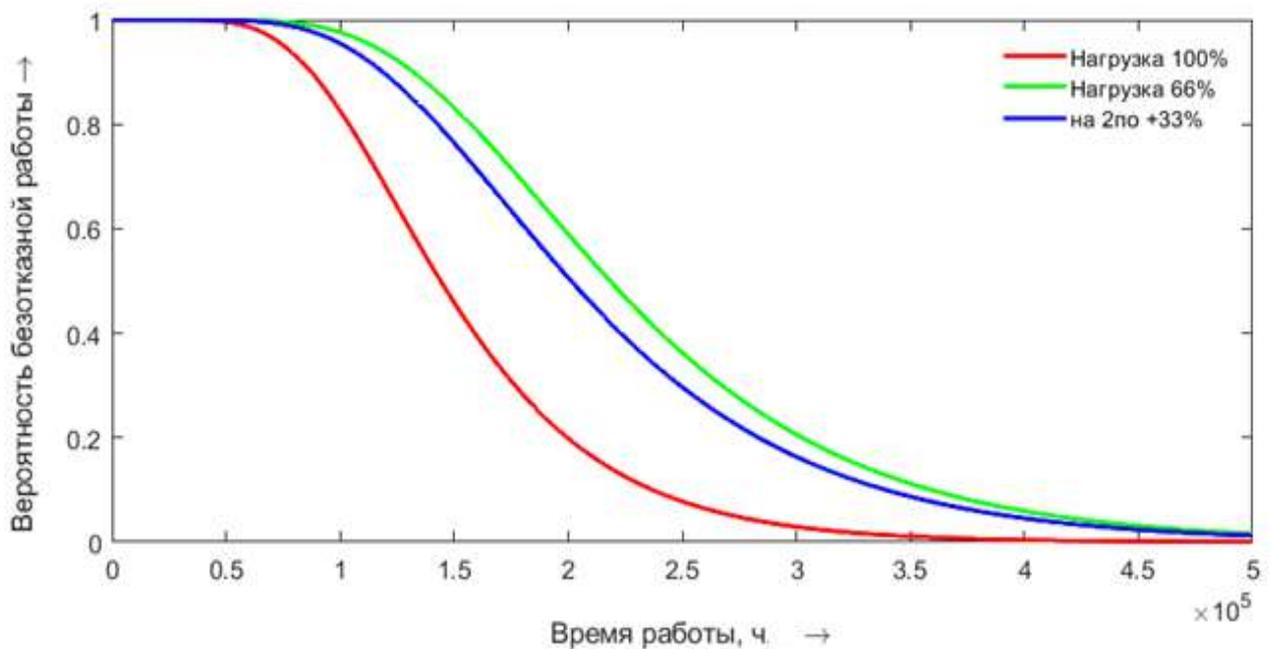


Рисунок 5.10 – Сравнительный анализ параметра ВБР для нагрузки 100, 66 и 66 % с отказом одного привода с равномерным распределением на два привода

Полученное снижение общей нагрузки на 34 % предоставляет повышение ВБР на 40,72 %. При этом перераспределение на два резервных элемента снижает ВБР на 8,34 %. Тем не менее ВБР такой системы будет на 32,38 % выше по сравнению с полностью нагруженной системой без резервирования.

На рисунке 5.11 рассмотрен вариант нагружения МПКС на 60 % и перераспределения нагрузки с одного неисправного привода на четыре исправных. Из прове-

денных исследований следует, что процент потери надежности при перераспределении нагрузки зависит исключительно от количества резервных приводов и не зависит от первоначальной нагрузки на них.

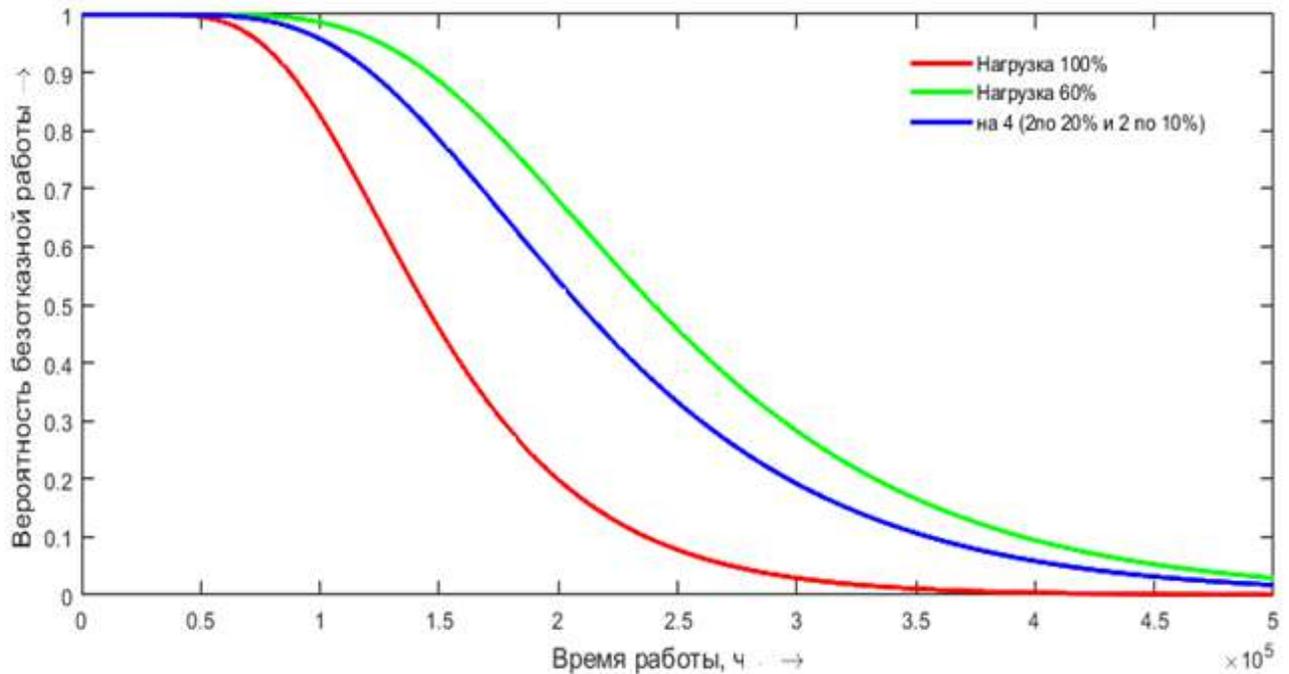


Рисунок 5.11 – Вероятность безотказной работы МПКС при перераспределении нагрузки на четыре привода

Перераспределение нагрузки, реализованное из соотношения два привода по 20 и два по 10 %, приводит к снижению ВБР на 14 %. При этом снижение нагрузки на 40 % повышает ВБР на 48,89 %, следовательно, такое перераспределение также обеспечивает более высокую надежность по сравнению с полностью нагруженной системой приводов без резервирования.

5.2 Критерии выбора режима эксплуатации механизмов параллельной кинематической структуры с учетом технического состояния системы приводов

В главе 4 предложены теоретические основы оценки технического состояния

приводов МПКС, удовлетворяющие ограничениям, предъявленным к киберфизическим системам (см. гл. 3). Согласно структуре киберфизической системы, предложенной в параграфе 3.2, разработаны уровни интеллектуального соединения, обработки данных и познание (когнитивный). Следующим этапом синтеза является разработка уровня «конфигурация», осуществляющего выбор режима эксплуатации МПКС с учетом технического состояния системы исполнительных приводов.

Параллельный механизм с параллельными кинематическими цепями (см. рисунок 2.1) состоит из n активных, параллельно направленных кинематических цепей, каждая из которых имеет независимое соединение с основанием и выходной платформой с помощью шарниров. Механизм со сходящимися кинематическими цепями (рисунок 2.7) также имеет n активных приводов, но они попарно сходятся в сферических шарнирах выходного звена механизма. Перемещение платформы в обоих случаях осуществляется за счет работы поступательных степеней подвижности, выполненных на основе электромеханических или гидравлических приводов.

В процессе функционирования на приводы МПКС оказывает воздействие эквивалентная статическая нагрузка $Q_{ст}$ (2.1).

Для реализации программного движения МПКС следует задавать необходимые управляющие силы F_i для каждого исполнительного привода, которые являются суммой статической $F_{ст}$ и дополнительной динамической ΔF_i управляющих сил (2.21). Статические силы определяются внешней нагрузкой на платформу и рассчитываются в зависимости от кинематической структуры МПКС. При определении данных сил необходимо проверять условие статической устойчивости платформы согласно (2.22).

Для достижения высокого качества выполнения технологических операций необходимо обеспечить равномерность распределения нагрузок между приводами МПКС [21] при выполнении линейного перемещения платформы, что, в случае МПКС достигается за счет их равномерного распределения относительно основания и выходной платформы. Тогда нагрузку на каждую параллельную кинематическую цепь МПКС (см. рисунок 2.1) можно рассчитать по:

$$F_{cti} \approx Q_{ct} \cdot n^{-1},$$

где n – проектное количество приводов в МПКС; $i=1 \dots n$ – номер исправного привода.

Эквивалентная нагрузка МПКС со сходящимися кинематическими цепями (см. рисунок 2.7) равномерно распределяется на все шарниры выходной платформы механизма. Так как количество шарниров в два раза меньше, чем активных приводов, то статическая нагрузка на каждый шарнир (G_{ctj}) составит:

$$G_{ctj} \approx 2 \cdot F_{cti} \cdot n^{-1}.$$

Кинематические цепи, сходящиеся в шарнире, расположены под углом друг к другу, следовательно, исходя из условия равновесия (см. рисунок 2.9), нагрузка на каждую кинематическую цепь механизма (см. рисунок 2.7) может быть определена по :

$$F_{cti} = G_{ctj} \cdot (2 \cdot \cos\alpha)^{-1} = Q_{ct} \cdot (n \cdot \cos\alpha)^{-1},$$

где α – угол наклона кинематической цепи к вертикали.

Для перемещения платформы необходимо к каждой стойке МПКС приложить дополнительные управляющие силы ΔF_i , закон изменения которых полностью зависит от заданного закона движения.

При частичном отказе систем приводов МПКС эквивалентная нагрузка на платформу Q_{ct} должна быть перераспределена между соседними исправными приводами n^* . Количество исправных исполнительных приводов в любой момент времени может быть $n^* \leq n$, следовательно, общая перераспределяемая нагрузка может быть определена из:

$$\Delta Q_{ct} = Q_{ct} \cdot (n - n^*) \cdot n^{-1}.$$

Тогда скорректированное значение управляющей силы после перераспределения нагрузки F_i^* (5.2) будет являться суммой статической силы F_{cti} , дополнительных управляющих сил ΔF_i и дополнительных, полученных за счет перераспределения нагрузки ΔF_{cti} .

$$F_i^* = F_{cti} + \Delta F_{cti} + \Delta F_i. \quad (5.2)$$

Для МПКС с параллельными кинематическими цепями (см. рисунок 2.1) дополнительная нагрузка на j -й исправный привод ΔF_{cti} рассчитывается в зависимо-

сти от количества неисправных приводов и их взаимного расположения друг относительно друга. В случае отказа одного из приводов кинематических цепей, сходящихся в одной точке (см. рисунок 2.7), всю нагрузку, приходящуюся на данный шарнир, должен взять на себя второй привод группы. Поскольку система является жесткой, то искривления положения платформы не произойдет, а суммарная нагрузка на исправный привод может быть определена, исходя из условия статического равновесия шарнира (рисунок 5.12) по выражению (5.3):

$$2 \cdot F_{cti} \cdot \cos\alpha = G_j \cdot \cos\alpha \rightarrow G_j = 2 \cdot F_{cti}. \quad (5.3)$$

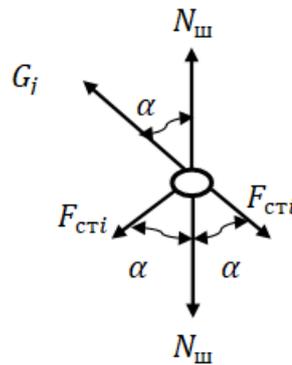


Рисунок 5.12 – Условие равновесия шарнира МПКС со сходящимися кинематическими парами при отказе одного из приводов

С учетом условия (5.3) выражение (5.2) принимает вид:

$$F_i^* = 2F_{cti} + \Delta F_i \rightarrow \Delta F_{cti} = F_{cti}.$$

Для сохранения статической устойчивости МПКС с параллельными кинематическими цепями (см. рисунок 2.1) в процессе эксплуатации необходимо выполнить соотношение (2.22).

Зная текущую нагрузку на платформу $Q_{ст}$ и критическую силу $F_{кр}$, можно рассчитать критическое количество исполнительных приводов МПКС с параллельными кинематическими цепями:

$$n_{кр}^* = \text{round}(Q_{ст} \cdot F_{кр}^{-1}).$$

Снижение количества одновременно работающих приводов ниже критического

значения ($n^* < n_{кр}^*$) приведет к аварийной ситуации, связанной с изгибом кинематических цепей механизма. Поэтому граничным условием по статической устойчивости МПКС с параллельными кинематическими цепями является ограничение на количество одновременно работающих приводов (5.4):

$$n_{кр}^* < n^* \leq n. \quad (5.4)$$

Основным параметром, определяющим качество работы МПКС, является закон управления выходной платформой во времени $u(t)$, определяемый заданным технологическим процессом, требующий четкой отработки всех программных движений МПКС. Отказ одного или нескольких приводов может привести к невыполнению данного условия, а, следовательно, к невозможности дальнейшей эксплуатации МПКС. Граничное условие оптимизации режима работы МПКС по управляемости будет иметь следующий вид (5.5):

$$u(t) = u(t)_{зад}. \quad (5.5)$$

Также при выборе режима работы МПКС необходимо учитывать нагрузку на каждый привод системы. В паспортных данных любых электродвигателей указана их перегрузочная способность по току K_T , которая вычисляется по (5.6):

$$K_T = I_{max} \cdot I_{ном}^{-1}, \quad (5.6)$$

где I_{max} , $I_{ном}$ - максимально допустимый и номинальный токи соответственно.

В процессе эксплуатации важно не допустить перегрузки электропривода по току, следовательно, граничное условие по нагрузке электроприводов для МПКС различных кинематических структур имеет вид (5.7):

$$I_{тек} \leq K_T I_{ном} \text{ или } I_{тек} \leq 0,5 \cdot K_T I_{ном}. \quad (5.7)$$

В случае с гидроприводом важно не допустить превышения давления в гидроцилиндрах, тогда граничное условие по нагрузке в гидроприводе для МПКС различных кинематических структур может быть записано как (5.8):

$$p_{тек} \leq p_{max} \text{ или } p_{тек} \leq 0,5 \cdot p_{max}. \quad (5.8)$$

Также в процессе выбора режима эксплуатации важным является техническое состояние приводов в составе системы, которое может быть однозначно оха-

рактировано количеством периодов сохранения работоспособности T , определяемым с помощью метода прогнозирования, предложенного в главе 4. Если $T = 0$, то привод находится в предотказном состоянии и необходимо прекратить его эксплуатацию. Отсюда граничное условие по надежности (5.9):

$$T > 0. \quad (5.9)$$

Управляющая сила, действующая на каждый привод МПКС F_i пропорциональна току электропривода $I_{\text{тек}}$ или давлению в гидроприводе $p_{\text{тек}}$. Поэтому изменение внешней нагрузки на привод $Load_{\text{пр}}^*$ может быть косвенно оценено путем анализа данных параметров. Тогда условие (5.7), применительно к нагрузке на валу электропривода или по давлению в гидроприводе (5.10):

$$\sum_{i=1}^n Load_{\text{пр}i} = \sum_{j=1}^{n^*} Load_{\text{пр}j}^*. \quad (5.10)$$

При частичном отказе приводов системы высвободившаяся нагрузка должна быть перераспределена на исправные приводы таким образом, чтобы суммарная разница нагрузок стремилась к нулю. Тогда целевая функция выбора режима эксплуатации отказоустойчивого МПКС (5.11):

$$\theta = \sum_{i=1}^n Load_{\text{пр}i} - \sum_{j=1}^{n^*} Load_{\text{пр}j}^* \rightarrow 0. \quad (5.11)$$

Нагрузка на исполнительный привод при n^* одновременно работающих приводах (5.12):

$$Load_{\text{пр}j}^* = Load_{\text{пр}i} + \Delta Load_{\text{пр}j}^*, \quad (5.12)$$

где $Load_{\text{пр}i}$ – нагрузка на i -й привод при n работающих исполнительных механизмах; $\Delta Load_{\text{пр}j}^*$ – дополнительная нагрузка на j -й привод при n^* исправных исполнительных механизмах.

Оптимизационная функция (5.11) будет зависеть от следующих параметров (5.13):

$$\theta = f(Load_{\text{пр}i}, \Delta Load_{\text{пр}j}^*) \rightarrow 0. \quad (5.13)$$

С учетом введенных ограничений (2.22), (5.4), (5.5), (5.7) – (5.9) целевая функция выбора режима эксплуатации (5.11) отказоустойчивого МПКС с параллельными кинематическими цепями (см. рисунок 2.1) (5.14) [A271-A273]:

$$\theta = f(\text{Load}_{\text{пр}_i}, \Delta\text{Load}_{\text{пр}_j}^*) \rightarrow 0 \left\{ \begin{array}{l} n_{\text{кр}}^* < n^* \leq n; \\ u(t) = u(t)_{\text{зад}} | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n]; \\ I_{\text{тек}}(p_{\text{тек}}) \leq I_{\text{max}}(p_{\text{max}}) | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n]; \\ T > 0 | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n]. \end{array} \right. \quad (5.14)$$

Механизмы со сходящимися кинематическими цепями имеют большую жесткость и отказ части приводов не приведет к деформации звеньев, следовательно, целевая функция выбора режима их эксплуатации (5.14):

$$\theta = f(\text{Load}_{\text{пр}_i}, \Delta\text{Load}_{\text{пр}_j}^*) \rightarrow 0 \left\{ \begin{array}{l} u(t) = u(t)_{\text{зад}} | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n]; \\ I_{\text{тек}}(p_{\text{тек}}) \leq 0,5 \cdot I_{\text{max}}(p_{\text{max}}) | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n]; \\ T > 0 | \forall n^* \in [n_{\text{кр}}^*, n]. \end{array} \right. \quad (5.15)$$

Задача режима эксплуатации отказоустойчивого МПКС формулируется следующим образом: необходимо обеспечить максимальную работоспособность МПКС при заданной статической устойчивости приводов, максимальной допустимой нагрузке на приводы системы и надежности приводов.

Введенные граничные условия (5.14) или (5.15) являются количественными критериями выбора режима эксплуатации МПКС. Явные количественные показатели вычисляются в зависимости от конфигурации каждого конкретного эксплуатируемого МПКС. Решение задачи выбора режима эксплуатации предполагает определение уровня текущей и дополнительной нагрузок на работающие приводы системы. Поэтому необходимо разработать модели и методы расчета текущей и дополнительной нагрузок на исполнительные приводы МПКС.

5.3 Метод синтеза отказоустойчивых систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры

5.3.1 Модель и метод расчета текущей нагрузки на приводы МПКС

В результате проведенных исследований (см. гл. 4) установлено, что техническое состояние приводов МПКС можно определить по знакам коэффициентов кап-

проксимирующих прямых (см. таблицы 4.3, 4.14). Если данные параметры отрицательны, то привод исправен. Если же они равны нулю или положительны, то привод неисправен. Причину неисправности можно определить по номерам масштабов (см. таблицы 4.3, 4.14), для которых $k \geq 0$.

Согласно принятым принципам построения системы оценки технического состояния (см. гл. 3), для проектирования отказоустойчивой системы приводов МПКС, помимо определения текущего и прогнозного состояния каждого привода системы, необходимо реализовать выбор режима работы МПКС, удовлетворяющего граничным условиям оптимизационной функции (5.14) или (5.15). Для этого необходимо определить режим нагружения каждого привода МПКС, входящего в состав системы [274, 275].

В случае с электроприводом необходимо выполнить анализ коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие вейвлет-коэффициентов тока и/или вибрации на характерных масштабах для заведомо исправного привода, работающего в основном режиме эксплуатации. Полученные значения будут использованы в качестве эталонных коэффициентов k_0 , b_0 , с которыми будут сравниваться текущие значения параметров k, b . Максимальные допустимые значения коэффициентов могут быть рассчитаны по перегрузочной способности сервопривода по току K_T :

$$k_{max} = k_0 \cdot K_T;$$

$$b_{max} = b_0 \cdot K_T.$$

Тогда текущие коэффициенты аппроксимирующей прямой k, b диагностируемого привода будут находиться в диапазоне:

$$k_0 \leq k \leq k_0 \cdot K_T; \quad b_0 \leq b \leq b_0 \cdot K_T.$$

Изменения коэффициентов k, b могут быть найдены согласно:

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

$$\Delta b = (b - b_0) \cdot (b_0(K_T - 1))^{-1}.$$

Если $k = k_0$, $b = b_0$ и $\Delta k = 0$, $\Delta b = 0$, то сервопривод эксплуатируется в номинальном режиме. При $k = k_{max}$, $b = b_{max}$ и $\Delta k = 1$, $\Delta b = 1$ – нагрузка предельная. Если $\Delta k < 0$ – привод неисправен, $\Delta k > 1$ – привод перегружен.

Исходя из этого, допустимым будет являться режим:

$$k \in [k_0, k_{max}]; \quad b \in [b_0, b_{max}]; \quad \Delta k \in [0,1]; \quad \Delta b \in [0,1].$$

Для проверки возможности повышения нагрузки на приводы МПКС целесообразно использовать нечеткую логическую модель, входами которой являются относительные коэффициенты Δk и Δb , а выходом – коэффициент нагрузки на сервопривод. Для описания такой модели используется система нечеткого логического вывода типа *Sugeno*. Для каждого входного параметра на интервале $[0; 1]$ задаются соответствующие функции принадлежности (см. рисунок 5.13).

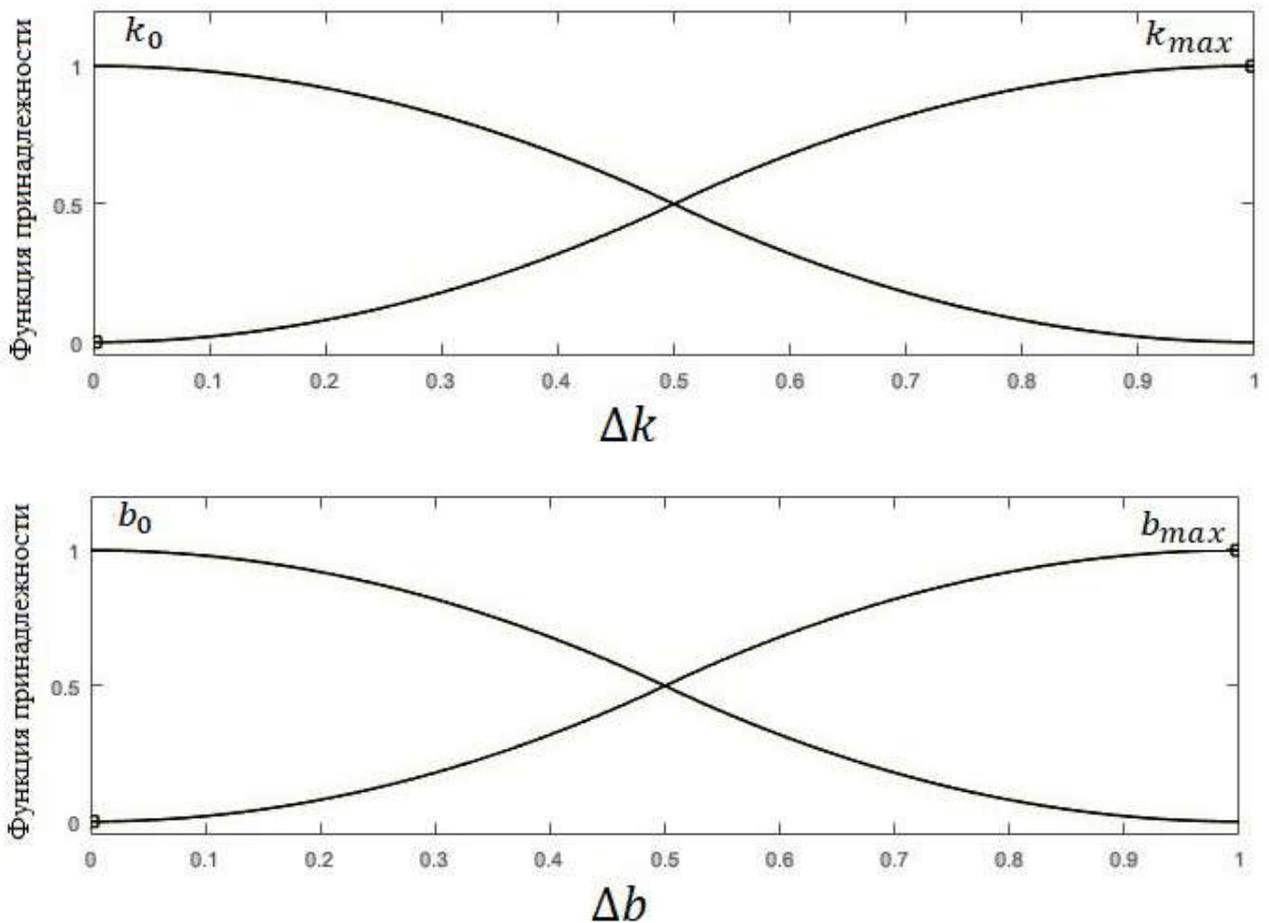


Рисунок 5.13 – Входы нечеткой модели определения текущей нагрузки на привод

Выходным параметром будет являться коэффициент $l \in [0,1]$, показывающий текущий уровень нагрузки на привод от критической. Если $l = 0$, то привод эксплуатируется без нагрузки, если $l = 1$ – привод имеет максимальную нагрузку.

Взаимосвязь между введенными нечеткими множествами может быть записана в виде следующей базы знаний:

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

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

Для определения значения выходной переменной используется алгоритм нечеткого логического вывода *Sugeno* [A276, A277]:

1. Входные переменные принимают некоторые четкие значения k^*, b^* и находятся уровни «усечения» для каждого правила:

$$\alpha_1 = \min[k_0(k^*), b_0(b^*)];$$

$$\alpha_2 = \min[k_{max}(k^*), b_{max}(b^*)].$$

2. Рассчитывается выход системы (5.16):

$$Load_{пр_i} = (\alpha_1 \cdot l_1^* + \alpha_2 \cdot l_2^*) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2)^{-1}. \quad (5.16)$$

Предложенная модель предоставляет возможность по изменению коэффициентов аппроксимирующей прямой рассчитать текущую нагрузку на приводы МПКС.

При использовании в составе МПКС гидравлических приводов текущая нагрузка на каждый привод (5.17):

$$Load_{пр_i} = p_{тек} \cdot (p_{max})^{-1}. \quad (5.17)$$

Приведенные модели расчета текущей нагрузки (5.16), (5.17) предопределяют возможность определить текущую нагрузку на каждый привод МПКС. Однако для синтеза отказоустойчивой системы приводов МПКС, согласно проведенному исследованию надежности (см. параграф 5.1) и сформулированному критерию оптимизации (5.14) или (5.15), необходимо определить дополнительную нагрузку на каждый привод в случае возникновения отказов в системе.

5.3.2 Модель и метод определения дополнительной нагрузки на приводы МПКС

Если число исправных приводов МПКС с параллельными кинематическими звеньями (см. рисунок 2.1) $n^* < n$, то возникает необходимость перераспределения

нагрузки на исправные приводы.

Поскольку $Q_{ст} \sim \sum_{i=1}^n Load_{пр_i}$, то согласно (5.7) перераспределяемая нагрузка на привод:

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

Наиболее простым способом перераспределения нагрузки является равномерное распределение:

$$\Delta Load_{пр_j}^* = \Delta Load_{пр} \cdot n^{*-1}.$$

Согласно результатам исследований (см. параграф 5.1) для синтеза отказоустойчивой системы приводов МПКС, требующей высокой грузоподъемности, точности позирования и надежности эксплуатации, целесообразно установить основную нагрузку на каждый привод 0,3–0,5 от предельной [А278].

Пример расчета приращения нагрузки МПКС с двенадцатью исполнительными приводами для нагрузки 0,3 приведен в таблице 5.2, а графическая интерпретация результатов исследования – на рисунке 5.14.

Таблица 5.2 – Соотношение процента приращения нагрузки и числа исправных приводов МПКС

Суммарный коэффициент изменения нагрузки на группу приводов	Число работающих приводов	Дополнительная нагрузка, $\Delta Load_{пр}$	Коэффициент увеличения нагрузки на каждый привод при равномерном распределении
3,6	12	0	0
3,3	11	0,3	0,03
3,0	10	0,6	0,06
2,7	9	0,9	0,10
2,4	8	1,2	0,15
2,1	7	1,5	0,21
1,8	6	1,8	0,3
1,5	5	2,1	0,42
1,20	4	2,4	0,6
0,9	3	2,7	0,9
0,6	2	3	1,5
0,3	1	3,3	3,3

Если приводы МПКС эксплуатируются с нагрузкой 0,3 от предельной, а допустимая нагрузка в продолжительном режиме составляет 0,5 [5], то допустимое приращение нагрузки на каждый привод, который не нанесет ущерба его исполнительным приводам, составляет 0,2. В случае крайней необходимости допустима эксплуатация привода в кратковременном режиме при нагрузке 0,7 от предельной [А277], то есть с увеличением на 0,4.

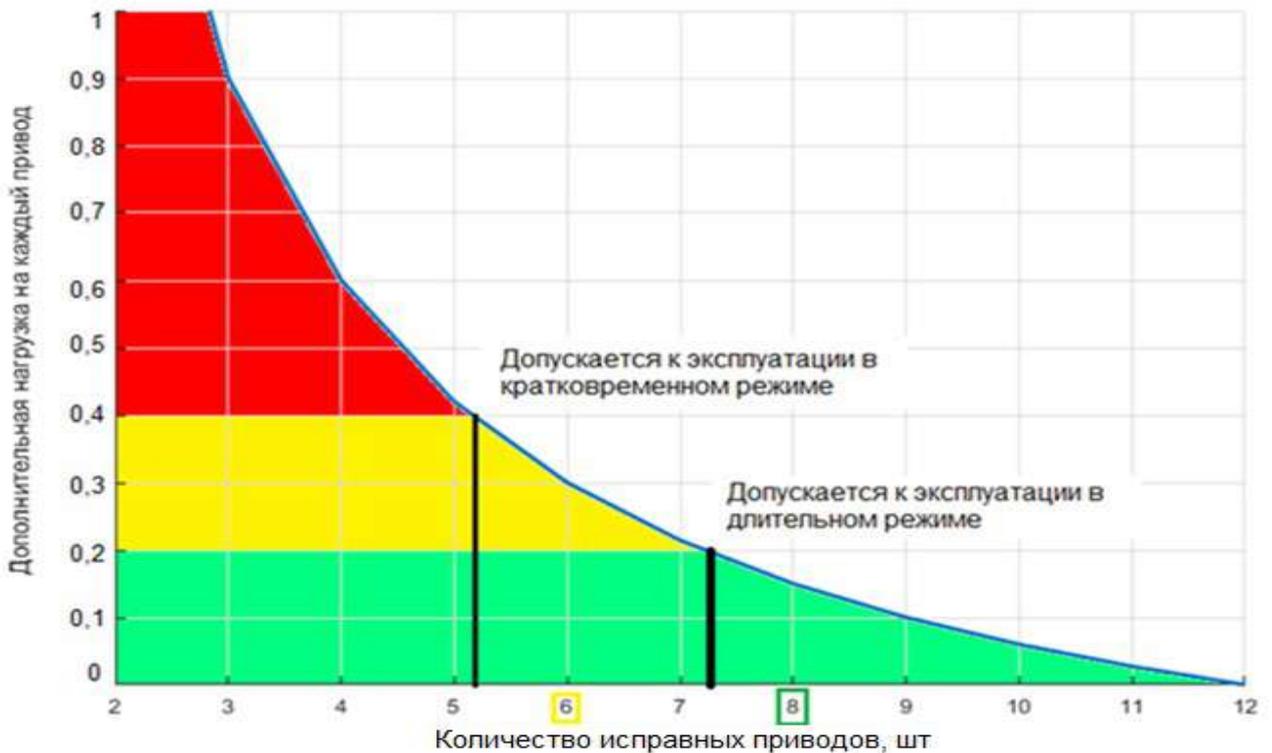


Рисунок 5.14 – Нагрузочная диаграмма системы приводов МПКС при равномерном распределении нагрузки

Согласно нагрузочной диаграмме (см. рисунок 5.14) МПКС, у которого проектное количество стоек $n = 12$, может функционировать в длительном режиме при восьми работающих приводах, а в кратковременном – при шести.

Отказ одного или нескольких приводов приводит к отклонению выходной платформы МПКС от требуемого положения, неравномерной нагрузке на соседние стойки и невозможности реализации требуемого закона управления (5.4). Равномерное перераспределение нагрузки не предоставляет возможность решить данную

проблему. Поэтому при распределении высвободившейся нагрузки $\Delta Load_{\text{пр}}$ необходимо учитывать не только общее количество неисправных приводов МПКС, но и их положение друг относительно друга. Пусть МПКС имеет n активных приводов и параллельно расправленными кинематическими цепями (см. рисунок 5.15), осуществляющей равномерное линейное перемещение груза.

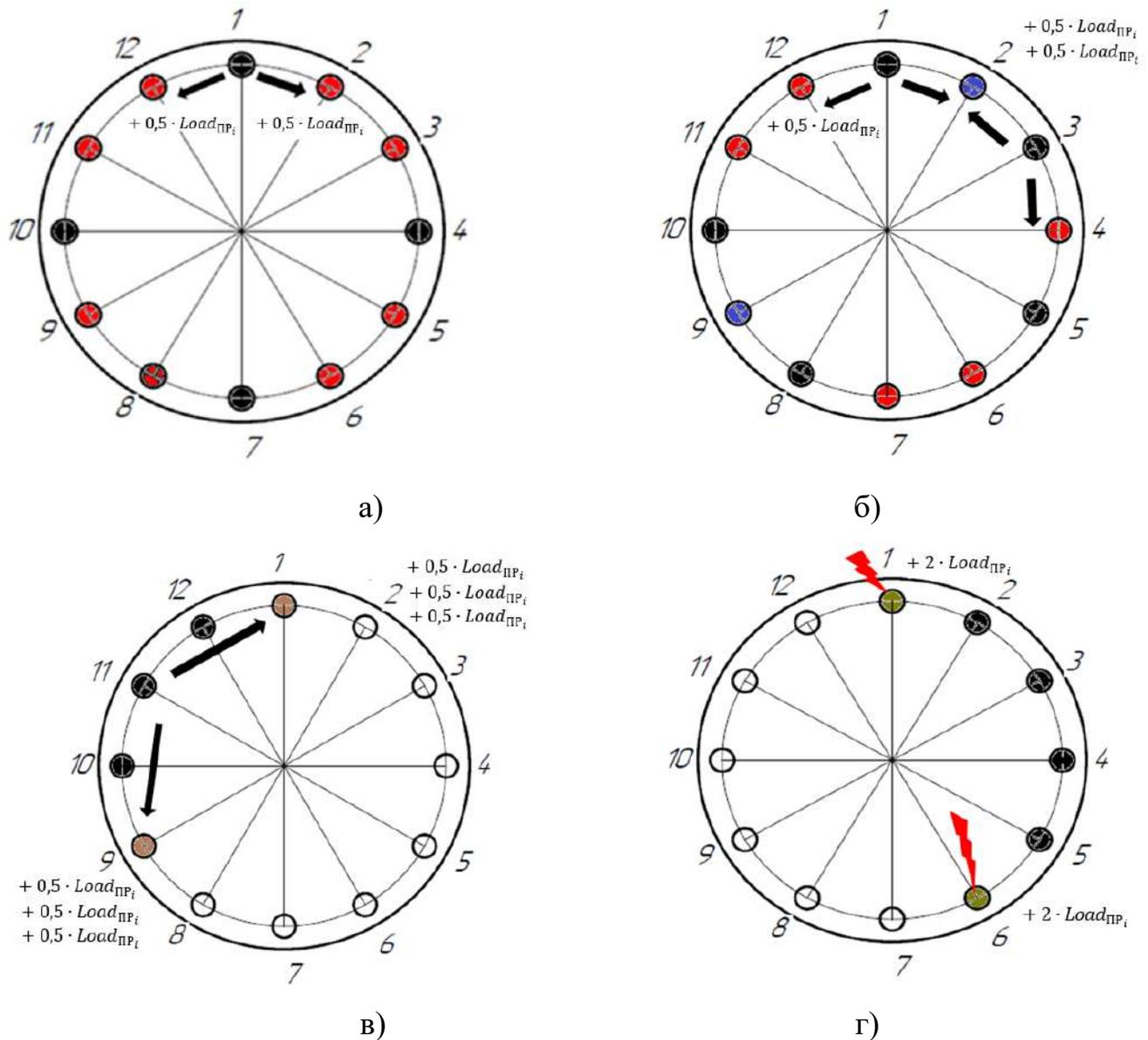


Рисунок 5.15 – Варианты расположения неисправных приводов МПКС и возможная коррекция нагрузки

Пример такого распределения нагрузок показан на рисунке 5.15, а. В данном

случае рассмотрены четыре неисправных привода (1, 4, 7, 10), между которыми расположены по два исправных, каждый из которых возьмет на себя половину нагрузки неисправного. Если предположить, что каждый привод имеет нагрузку 0,3 от критической, то приращение составит 0,15, а суммарная нагрузка – 0,45, что согласно диаграмме нагружения (см. рисунок 5.14) предоставляет возможность эксплуатировать МПКС в продолжительном режиме. Все кинематические цепи нагружены равномерно, что исключает возможность искривления стоек МПКС и перегрузки приводов.

На рисунке 5.15, б показан вариант расположения неисправных стоек через одну. В этом случае на промежуточный исправный механизм (например, 2) перейдет половина нагрузки с неисправных приводов 1 и 3, а дополнительная нагрузка на привод 2 составит (5.18)

$$\Delta Load_{прj}^* = Load_{прi}. \quad (5.18)$$

Если $Load_{прi} = 0,3$, то суммарная нагрузка на данный привод составит 0,6, что согласно нагрузочной диаграмме (см. рисунок 5.14) предоставляет возможность эксплуатировать МПКС.

На рисунках 5.15, в, г показаны варианты с тремя или четырьмя неисправными приводами, расположенным подряд. В этом случае на соседние исправные приводы приходится примерно половина нагрузки от трех или четырех приводов (5.19), (5.20):

$$\Delta Load_{прj} = 1,5 \cdot Load_{прi}; \quad (5.19)$$

$$\Delta Load_{прj}^* = 2 \cdot Load_{прi}. \quad (5.20)$$

При стандартной нагрузке 0,3 и учете перераспределенной полная нагрузка на привод составит 0,75 и 0,9 соответственно, что недопустимо при длительном режиме эксплуатации. Таким образом, статическая устойчивость МПКС зависит не только от количества исправных приводов, но и от их взаимного расположения.

Из формул (5.18) – (5.20) следует, что дополнительная нагрузка на систему приводов МПКС с параллельными кинематическими цепями (см. рисунок 2.1) определяется величиной коэффициента изменения нагрузки L_{ch} , который зависит от количе-

ства и взаимного расположения неисправных приводов и может изменяться в диапазоне от 0 до n с шагом 0,5. Для расчета L_{ch} целесообразно разработать нечеткую логическую модель, входами которой является текущее техническое состояние каждого привода МПКС, а выходами – коэффициент изменения нагрузки. Структура данной модели представлена на рисунке 5.16.



Рисунок 5.16 – Структура нечеткой модели расчета коэффициента изменения нагрузки

Для каждого входа модели на интервале $[0\ 1]$ задаются Z - и S -образные функции принадлежности (рисунок 5.17, а) таким образом, чтобы исправному приводу соответствовало значение входа 1, а неисправному – 0.

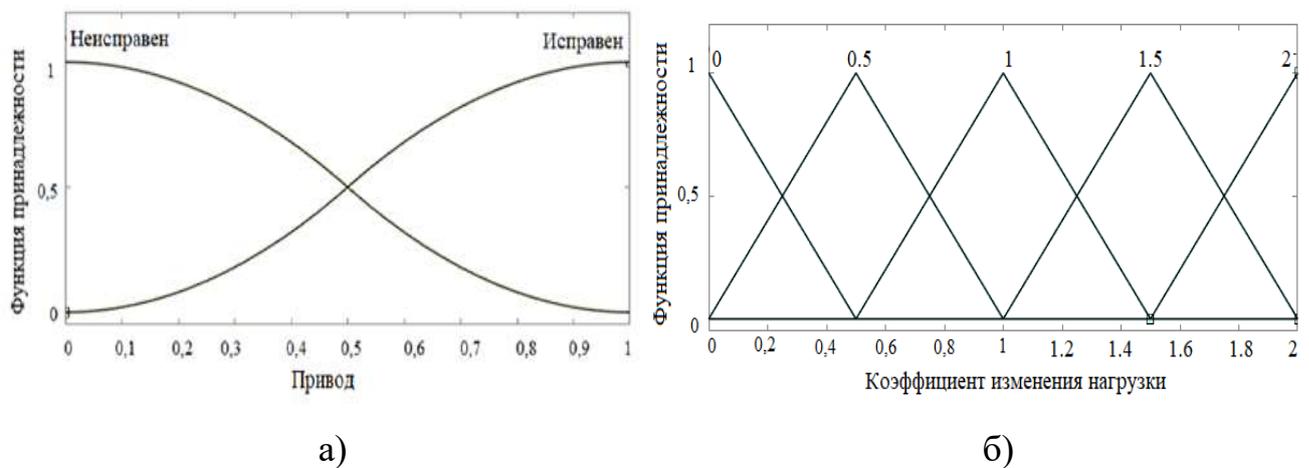


Рисунок 5.17 – Функции принадлежности модели расчета коэффициентов изменения нагрузки: а – входные переменные; б – выходные переменные

Согласно описанного выше анализу (5.35) – (5.38) искомым коэффициент изменения нагрузки находится в диапазоне $L_{ch} \in [0; 2]$. На данном отрезке задается пять треугольных функций принадлежности с шагом 0,5 (рисунок 5.17, б).

Взаимосвязь между введенными множествами представляет собой нечеткую базу знаний, фрагмент которой приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Нечеткая база знаний модели расчета коэффициента дополнительной нагрузки

Номер привода								Коэффициент изменения нагрузки на привод МПКС							
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	0	1	1	1	...	...	1	0	0	1	0	0	...	...
1	0	0	0	1	1	...	...	1,5	0	0	0	1,5	0	...	...
1	0	0	0	0	1	...	...	2	0	0	0	0	2	...	...
1	0	1	0	1	1	...	...	0,5	0	1	0	0,5	0	...	...
....

Для определения четкого значения коэффициента увеличения нагрузки использован алгоритм нечеткого логического вывода типа *Mamdani* [А 279 - А288].

Задаются четкие значения входных переменных и определяются степени истинности для каждого из правил нечеткой базы знаний (см. таблицу 4.3). Далее с использованием операции «минимум» рассчитываются уровни отсечения δ_c , $c \in [1; z]$ функций принадлежности:

$$\delta_c = \min_c (Cond(cond_0): c \in [1; z]),$$

определяются их «усеченные» значения $l'_c(L_{ch})$:

$$l'_c(\tilde{L}) = \delta_1 \wedge l_c(\tilde{L}_{ch}).$$

Производится объединение полученных «усеченных» функций с помощью операции максимум:

$$\mu_\Sigma(\tilde{L}_{ch}) = \max (l'_c(\tilde{L}_{ch})).$$

Расчет значения выходной переменной:

$$L_{ch} = \int_G \widetilde{L}_{ch} \cdot \mu_{\Sigma}(\widetilde{L}_{ch}) d\widetilde{L}_{ch} \cdot \left(\int_G \mu_{\Sigma}(\widetilde{L}_{ch}) d\widetilde{L}_{ch} \right)^{-1}.$$

Данная нечеткая модель предоставляет возможность по результатам оценки технического состояния всех приводов МПКС, с учетом количества и взаимного расположения неисправных приводов, рассчитать коэффициент дополнительной нагрузки на каждый исправный исполнительный элемент [А289]. Для определения дополнительной нагрузки на каждый привод необходимо каждый вычисленный коэффициент дополнительной нагрузки L_{ch_j} умножить на определенную ранее текущую нагрузку на приводы исправного МПКС (5.21):

$$\Delta Load_{пр_j}^* = L_{ch_j} \cdot Load_{пр_i}. \quad (5.21)$$

Тогда максимальную нагрузку на исправный привод можно вычислить по (5.22):

$$\Delta Load_{max} = \max(\Delta Load_{пр_j}^*), \forall j \in [1, n^*]. \quad (5.22)$$

Объединение двух предложенных моделей формализует модель перераспределения нагрузок на исправные приводы МПКС с учетом их взаимного расположения (рисунок 5.18).

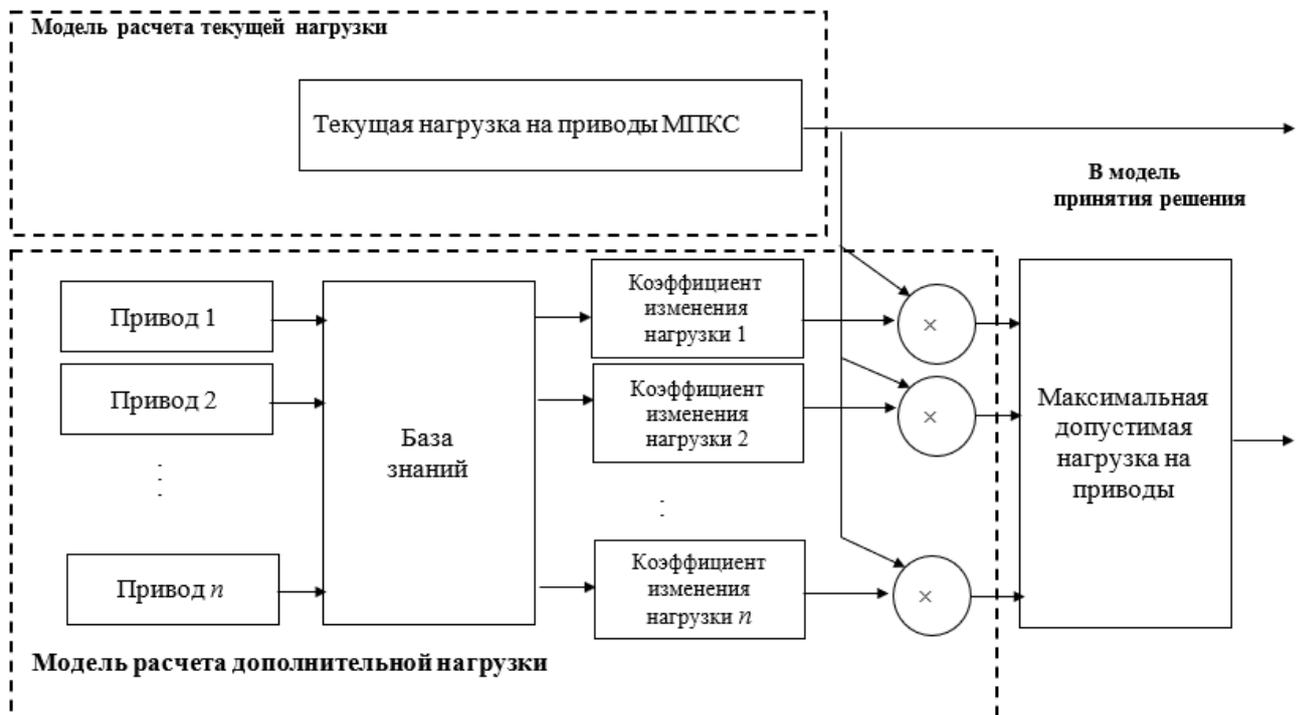


Рисунок 5.18 – Структура модели перераспределения нагрузок на приводы МПКС

Представленная модель расчета дополнительной нагрузки справедлива для кинематической структуры МПКС $nU\underline{H}S$ или $nUV\underline{S}$, состоящей из n активных, параллельно направленных кинематических цепей, каждая из которых имеет независимое соединение с основанием и выходной платформой с помощью шарниров, расположенных на равном расстоянии друг от друга (см. рисунок 2.1).

Такие механизмы обладают высокой грузоподъемностью при сравнительно малой мощности активных исполнительных элементов и хорошей управляемостью при условии исправности приводов. Однако в случае возникновения отказа части приводов задача реализации заданного технологического процесса и выполнения граничного условия по управляемости (5.6) существенно усложняется и в ряде случаев (см. рисунок 5.5, г) становится невозможным. Для решения данной проблемы необходимо ввести кинематическую избыточность путем увеличения числа активных кинематических цепей или применение МПКС типа $n-U\underline{H}0,5n-S$ или $n-UV\underline{0},5n-S$, у которых пары сферических шарниров выходного звена механизма сходятся в одной точке (см. рисунок 2.7). Такая модернизация МПКС привела к существенному увеличению нагрузки на кинематические цепи, а, следовательно, и приводы системы, но повысила его управляемость и расширила области применения.

Перераспределение нагрузки для МПКС данной конфигурации выглядит следующим образом. В случае отказа одного из приводов кинематических цепей, сходящихся в одном узле, всю его нагрузку должен взять привод другой кинематической цепи, приходящей в эту же точку:

$$\Delta Load_{прj}^* = Load_{прi}$$

В этом случае отказ привода не приведет к потере управляемости МПКС и предопределяет возможность продолжить заданный технологический процесс, тем самым выполнить граничное условие управляемости (5.7). Однако для возможности практической реализации данного подхода необходимо, чтобы максимальная рабочая нагрузка на каждый привод системы не превышала 50 % от предельно допустимой.

В случае отказа приводов обеих кинематических цепей, сходящихся в одном узле, механизм становится неисправным и его эксплуатацию необходимо прекратить.

Целью оптимизации режима эксплуатации МПКС является обеспечение возможности продолжения технологического процесса при частичном отказе исполнительных приводов. Для этого необходимо разработать модель принятия решения по выбору режима эксплуатации по результатам оценки технического состояния и перераспределению нагрузок на исполнительные приводы МПКС.

5.3.3 Выбор режима эксплуатации системы приводов МПКС

После того, как определено текущее и прогнозное состояние всех приводов МПКС, рассчитаны текущие и дополнительные нагрузки, необходимо принять решение о выборе режима дальнейшей работы [А290]. Решение данной задачи зависит от применяемой структуры МПКС. Так для МПКС с параллельными кинематическими цепями целесообразно разработать математическую модель принятия решения, основанную на методах нечеткой логики.

Для формализации модели рассчитываются:

- средняя нагрузка на сервоприводы МПКС:

$$Load = (\sum_{j=1}^{n^*} Load^*_{прj}) \cdot (n^*)^{-1},$$

где $j \in Load^*_{прj} [1, n^*]$ – нагрузка на каждый исправный привод МПКС (см. параграф 5.3);

- максимальная дополнительная нагрузка на приводы (5.22);
- минимальный прогнозный срок исправной работы приводов МПКС:

$$T_g = \min (T_j),$$

где $T_j, j \in [1, n^*]$ – прогнозный срок исправной работы каждого привода МПКС, рассчитанный согласно модели прогнозирования (см. гл. 4).

Например, МПКС имеет основную нагрузку на каждый привод 0,3 от предельно-допустимой. При этом работа приводов в продолжительном режиме с нагрузкой 0,5 от предельно-допустимой не нанесет ущерба их техническому состоянию [5]. Следовательно, увеличение нагрузки на привод на 0,2 является допустимым и не по-

влияет на их техническое состояние. В случае крайней необходимости допустима эксплуатация привода в кратковременном режиме при нагрузке 0,7 от предельной [16], то есть с увеличением 0,4 (см. рисунок 5.14).

Теоретически текущая и дополнительная нагрузки на приводы могут изменяться в диапазоне от 0 до 1. В качестве возможной средней нагрузки на привод задаются термы «менее 0,3», «0,5» или «более 0,6». Входное терм-множество «Средняя нагрузка на группу приводов» представлено на рисунке 5.19.

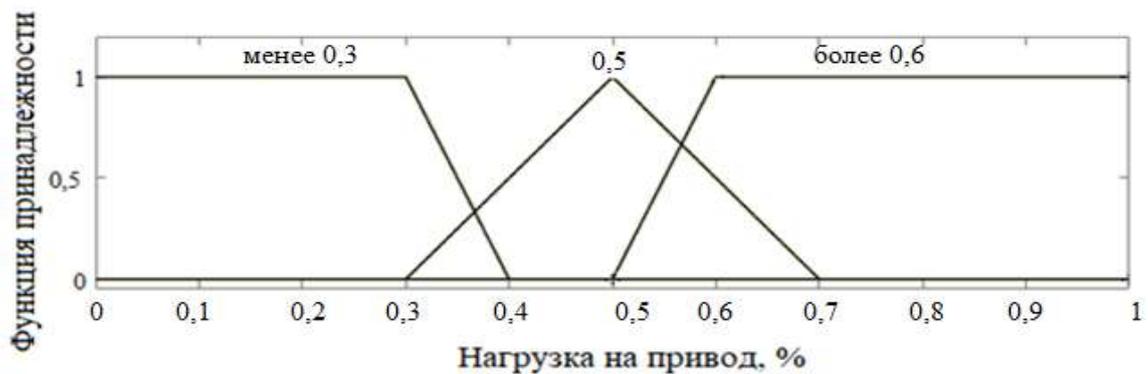


Рисунок 5.19 – Терм-множество «Средняя нагрузка на группу приводов»

Функции принадлежности термов данного множества могут быть представлены следующим образом:

$$\text{"Менее 0.3\%"} = (0, 0.4)_0 \cup (0, 0.3)_1;$$

$$\text{"0.5"} = (0.3, 0.7)_0 \cup (0.5)_1;$$

$$\text{"Более 0.6"} = (0.5, 1)_0 \cup (0.6, 1)_1.$$

В качестве максимального увеличения нагрузки на приводы задаем «менее 0,2», «0,3-0,4» или «более 0,5». Входное терм-множество «Максимальная дополнительная нагрузка на привод» представлено на рисунке 5.20.

Функции принадлежности термов имеют трапецевидную или треугольную форму:

$$\text{"Менее 0.2"} = (0, 0.3)_0 \cup (0, 0.2)_1;$$

$$\text{"0.3 – 0.4"} = (0.15, 0.55)_0 \cup (0.3, 0.4)_1;$$

$$\text{"Более 0.5"} = (0.4, 1)_0 \cup (0.5, 1)_1.$$



Рисунок 5.20 – Терм-множество «Максимальная дополнительная нагрузка»

Согласно разработанной модели прогнозирования (см. гл. 4) прогнозный срок безотказной работы определяется по тренду предыдущих значений коэффициентов k прямых, аппроксимирующих огибающие. В качестве периода диагностирования принимается 1 месяц.

Если по результатам оценки текущего и прогнозного технического состояния получено, что в течение следующего периода эксплуатации механизма произойдет отказ привода, то его необходимо признать неисправным и отключить, перераспределив нагрузку на другие приводы. Приемлемым результатом прогнозирования является число периодов эксплуатации от 6 месяцев и более. Поэтому для формализации входного терм-множества «Минимальный прогнозный срок исправной работы» на временном интервале 12 месяцев задаются следующие термы: «1 месяц», «3 месяца» и «более 6 месяцев». Функции принадлежности данного терм-множества представлены на рисунке 5.21.

Функции принадлежности введенных термов имеют треугольную или трапециевидную формы:

функция принадлежности – "1" = $(0, 2)_0 \cup (1)_1$;

функция принадлежности – "3" = $(1, 5)_0 \cup (3)_1$;

функция принадлежности – "Более 6" = $(5, 12)_0 \cup (6, 12)_1$.



Рисунок 5.21 – Терм-множество «Минимальный прогнозный срок исправной работы»

Выходом нечеткой модели является режим работы системы приводов, для формализации которого на интервале от -1 до 1 задаются три нечетких треугольных термина (рисунок 5.22), содержащих решение о выборе режима дальнейшей работы:

"-1" = $(-1, -0.2)_0 \cup (-1)_1$ – необходимо прекратить эксплуатацию;

"0" = $(-0.8, 0.8)_0 \cup (0)_1$ – допустима эксплуатация в текущем режиме;

"1" = $(0.2, 1)_0 \cup (1)_1$ – допустима эксплуатация при увеличении нагрузки на величину $\Delta Load_{max}$.

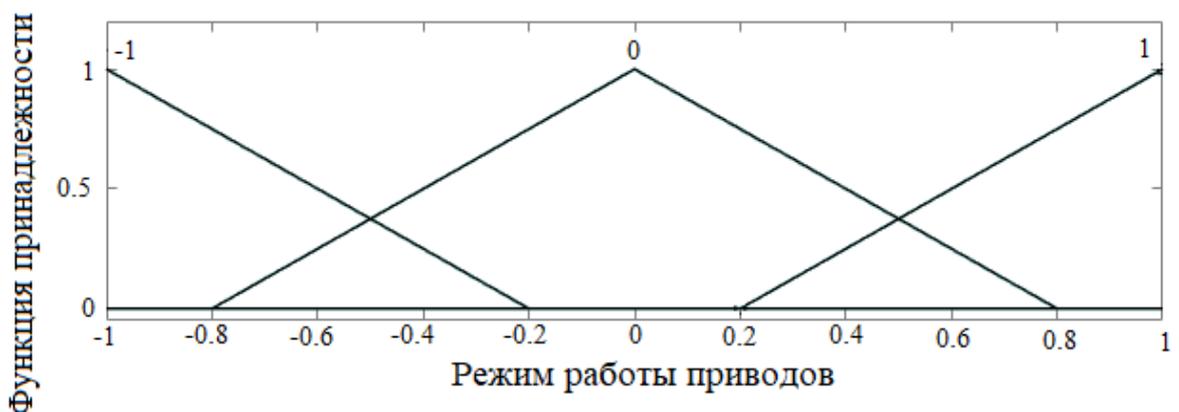


Рисунок 5.22 – Функции принадлежности выходной переменной «Режим работы приводов»

Выбор режима эксплуатации оборудования напрямую зависит от технического состояния каждого привода, количества и взаимного расположения неисправных приводов и минимального прогнозного периода сохранения работоспособности [А287]. Взаимосвязь между введенными множествами представляет собой базу знаний нечеткой логической системы (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – База знаний 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 нечеткой логической системы принятия решения для МПКС с параллельными кинематическими цепями представлена на рисунке 5.23.



Рисунок 5.23 – Структура интеллектуальной модели принятия решения для МПКС с параллельными кинематическими цепями

Если минимальный срок исправной работы составляет 1 месяц, что соответствует предотказному состоянию основной части приводов группы, и если основная нагрузка менее 0,3, то безопасным будет увеличение нагрузки на приводы до 0,25%. В остальных случаях нагружения эксплуатация группы приводов должна быть остановлена. Если прогнозный срок исправной работы 3 месяца, то кратковременная дополнительная нагрузка (не более 1 рабочей смены) до 0,4 допустима при исходной нагрузке на приводы до 0,3 и до 0,2 при исходной нагрузке до 0,5.

Если прогнозный срок исправной работы более полугодя, то кратковременная дополнительная нагрузка на группу приводов (не более 1 рабочей смены) до 0,4 допустима при исходной нагрузке на приводы до 0,3 – 0,5 и дополнительная нагрузка до 0,2 при исходной до 0,6.

Для принятия решения об изменении условий нагружения сервоприводов МПКС с параллельными кинематическими цепями использован алгоритм *Mamdani* [A291]. Задаются четкие значения входных переменных ($load_0, \Delta load_{max.0}, t_{g0}$) и определяются степени истинности для каждого из правил ($Load(load_0), \Delta Load_{max}(\Delta load_{max.0})$). Далее использованием операций минимум (« \wedge ») рассчитываются уровни усечения $\alpha_i, l \in [1; r]$ функций принадлежности:

$$\alpha_1 = Load_l(load_0) \wedge \Delta Load_{max.l}(\Delta load_{max.0}) \wedge T_{g_l}(t_{g0});$$

.....

$$\alpha_r = Load_r(load_0) \wedge \Delta Load_{max.r}(\Delta load_{max.0}) \wedge T_{g_r}(t_{g0});$$

определяются их «усеченные» значения $d'_1(D)$:

$$d'_1(\tilde{D}) = \alpha_1 \wedge d_1(\tilde{D});$$

$$d'_r(\tilde{D}) = \alpha_r \wedge d_r(\tilde{D}).$$

Производится объединение полученных «усеченных» функций с помощью операции максимум (« \vee »):

$$\mu_{\Sigma}(\tilde{D}) = d(\tilde{D}) = d'_1(\tilde{D}) \vee d'_2(\tilde{D}) \vee \dots \vee d'_r(\tilde{D}).$$

Расчет значения выходной переменной:

$$D = \int_G \tilde{D} \cdot \mu_{\Sigma}(\tilde{D}) d\tilde{D} \cdot \left(\int_G \mu_{\Sigma}(\tilde{D}) d\tilde{D} \right)^{-1}.$$

Полученная модель [163, 164] предоставляет возможность по результатам расчета средней текущей и максимальной дополнительной нагрузок, а также минимального прогнозного периода безотказной эксплуатации приводов реализовать интеллектуальное принятие решения о выборе дальнейшего режима эксплуатации МПКС с параллельными кинематическими цепями (см. рисунок 2.1).

Результат расчета представлен в виде коэффициента $D \in [-1,1]$. Если на выходе получено положительное значение, то нагрузку на приводы МПКС необходимо увеличить на величину дополнительной нагрузки $\Delta Load_{пр}$, рассчитаную с помощью соответствующей модели. Если $D = 0$, то изменение режима работы не требуется. Если $D < 0$, то эксплуатацию МПКС необходимо прекратить.

При использовании МПКС со сходящимися кинематическими цепями (см. рисунок 2.7) основным условием принятия решения о выборе режима эксплуатации является совместная оценка технического состояния приводов кинематических цепей, сходящихся в одном узле. Если оба привода исправны, то коррекция режима работы не требуется. При отказе одного из приводов происходит увеличение нагрузки на второй привод в два раза. При отказе обоих приводов узла, необходимо прекратить эксплуатацию МПКС. Для формализации приведенных условий используется нечеткая логическая система типа *Mamdani*, содержащая два входа и один выход (см. рисунок 5.24).

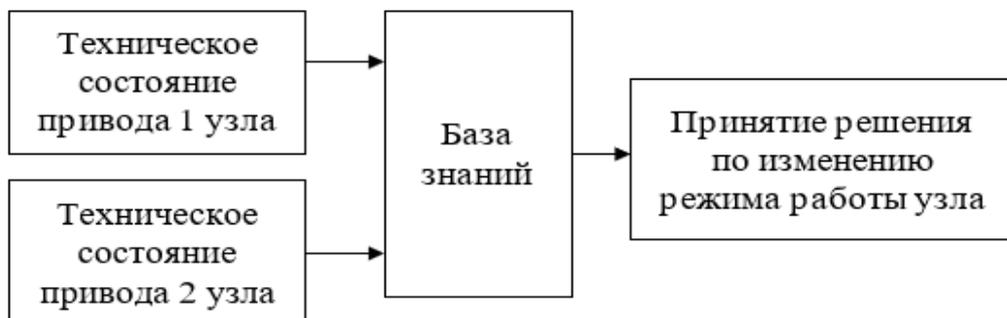


Рисунок 5.24 – Структура нечеткой подмодели принятия решения о выборе режима эксплуатации приводов кинематических цепей МПКС, сходящихся в одном узле

Для описания входных переменных используются функции принадлежности, приведенные на рисунке 5.17, описывающие техническое состояние привода. Если в результате диагностирования установлено, что привод является исправным, а в результате прогнозирования, что его остаточный ресурс более одного периода эксплуатации ($T \geq 1$), то такой привод считается исправным и ему присваивается значение входной переменной, равное единице. В противном случае привод считается неисправным, и ему соответствует значение входной переменной, равное нулю.

Выходом нечеткой подсистемы является решение о дальнейшем режиме эксплуатации, функция принадлежности которого приведена на рисунке 5.22. На интервале от -1 до 1 задаются три нечетких треугольных терма, содержащие решение о необходимости коррекции режима работы узла: "-1" – необходимо прекратить эксплуатацию; "0" – эксплуатация в текущем режиме; "1" – необходимо увеличить нагрузку на исправный привод в два раза. Нечеткая база знаний подмодели принятия решения о выборе дальнейшего режима работы узла МПКС со сходящимися кинематическими цепями приведена в таблице 5.5.

Для принятия решения об изменении условий нагружения сервоприводов узла МПКС со сходящимися кинематическими цепями использован алгоритм *Mamdani*.

Задаются четкие значения входных переменных и определяются степени истинности для каждого из правил нечеткой базы знаний. Далее с использованием операции «минимум» рассчитываются уровни отсечения δ_c , $c \in [1; z]$ функций принадлежности:

$$\delta_c = \min_c (Cond(cond_0)): c \in [1; z];$$

определяются их «усеченные» значения $d_1'(D)$ (5.55):

$$d_1'(\bar{D}_y) = \delta_c \wedge d_1(\bar{D}_y);$$

.....

$$d_r'(\bar{D}_y) = \delta_c \wedge d_r(\bar{D}_y).$$

Производится объединение полученных «усеченных» функций с помощью операции максимум (« \vee »):

$$\mu_{\Sigma}(\bar{D}_y) = d(\bar{D}_y) = d_1'(\bar{D}_y) \vee d_2'(\bar{D}_y) \vee \dots \vee d_r'(\bar{D}_y).$$

Расчет значения выходной переменной:

$$D_y = \int_G \bar{D}_y \cdot \mu_{\Sigma}(\bar{D}_y) d\bar{D}_y \cdot \left(\int_G \mu_{\Sigma}(\bar{D}_y) d\bar{D}_y \right)^{-1}$$

Таблица 5.5 – База знаний нечеткой подмодели принятия решения о выборе режима эксплуатации приводов узла МПКС со сходящимися кинематическими цепями

Техническое состояние приводов в узле		Выбранный режим эксплуатации узла
Первый привод	Второй привод	
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	-1

Полученное значение D_y предопределяет возможность принятия решение о целесообразности увеличения нагрузки на приводы кинематических цепей, сходящихся в одном узле. МПКС со сходящимися кинематическими цепями имеет в своем составе $n/2$ узлов. Поэтому аналогичный расчет необходимо выполнить для каждого узла. Полученные на выходе решения должны быть обобщены для принятия общего решения по МПКС. Для этого моделируется нечеткая подмодель принятия решения по выбору режима эксплуатации МПКС со сходящимися кинематическими цепями, объединяющая выходы подсистем принятия решения первого уровня.

Входами подсистемы второго уровня являются выходы подмодели принятия решения первого уровня (см. рисунок 5.23), выходом – окончательное принятие решения по выбору режима эксплуатации МПКС. Функции принадлежности входов и выхода системы имеют вид, приведенный на рисунке 5.23, и описываются термножествами, представленными выше. Фрагмент нечеткой базы знаний подмодели принятия решения о выборе режима эксплуатации МПКС со сходящимися кинематическими цепями приведен в таблице 5.6.

Если на выходах подмоделей первого уровня есть отрицательные значения, то необходимо прекратить эксплуатацию МПКС.

Для принятия решения об изменении режима эксплуатации МПКС со сходящимися кинематическими цепями использован алгоритм *Mamdani*.

Таблица 5.6 – 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	...	1	1
-1	1	...	0	-1
0	0	...	0	0

Задаются четкие значения входных переменных и определяются степени истинности для каждого из правил нечеткой базы знаний. Далее с использованием операции «минимум» рассчитываются уровни отсечения $D_y, c \in [-1; 1]$ функций принадлежности:

$$D_y = \min_c (D_y(d_{y0}): c \in [1; z]);$$

определяются их «усеченные» значения $d_1'(D)$:

$$d_1'(\tilde{D}) = D_y \wedge d_1(\tilde{D});$$

$$d_r'(\tilde{D}) = D_y \wedge d_r(\tilde{D}).$$

Производится объединение полученных «усеченных» функций с помощью операции максимум (« \vee »):

$$\mu_\Sigma(\tilde{D}) = d(\tilde{D}) = d_1'(\tilde{D}) \vee d_2'(\tilde{D}) \vee \dots \vee d_r'(\tilde{D}).$$

Расчет значения выходной переменной:

$$D = \int_G \tilde{D} \cdot \mu_\Sigma(\tilde{D}) d\tilde{D} \cdot \left(\int_G \mu_\Sigma(\tilde{D}) d\tilde{D} \right)^{-1}$$

Полученный на выходе подмодели коэффициент предопределяет возможность $D \subset [-1, 1]$ показывает необходимость коррекции режима эксплуатации каждого из узлов МПКС.

Если $D > 0$, то необходимо увеличить нагрузку на соответствующий исправный привод в два раза. Если $D = 0$, то изменение режима работы не требуется. Если $D < 0$, то эксплуатацию МПКС необходимо прекратить.

Итоговая модель принятия решения по выбору режима эксплуатации систем приводов МПКС со сходящимися кинематическими цепями представлена на рисунке 5.25.



Рисунок 5.25 – Структура нечеткой модели принятия решения по выбору режима эксплуатации системы приводов МПКС со сходящимися кинематическими цепями

Данная иерархическая нечеткая модель имеет два функциональных уровня: узла и МПКС. Результат принятия решения данной модели интерпретируется аналогично модели для МПКС с параллельными кинематическими цепями.

Для практической реализации метода синтеза отказоустойчивой системы приводов разработаны алгоритмы интеллектуального принятия решения по выбору режима эксплуатации приводов МПКС различной кинематической структуры (рисунки 5.26 и 5.27) [A292, A293].

Данные алгоритмы определяют возможность на основе предложенной методологии оценки технического состояния, сформулированных критериев (5.14)

или (5.15) с применением моделей перераспределения нагрузки и оптимизации режима эксплуатации определить необходимое безопасное увеличение нагрузки на каждый привод МПКС.

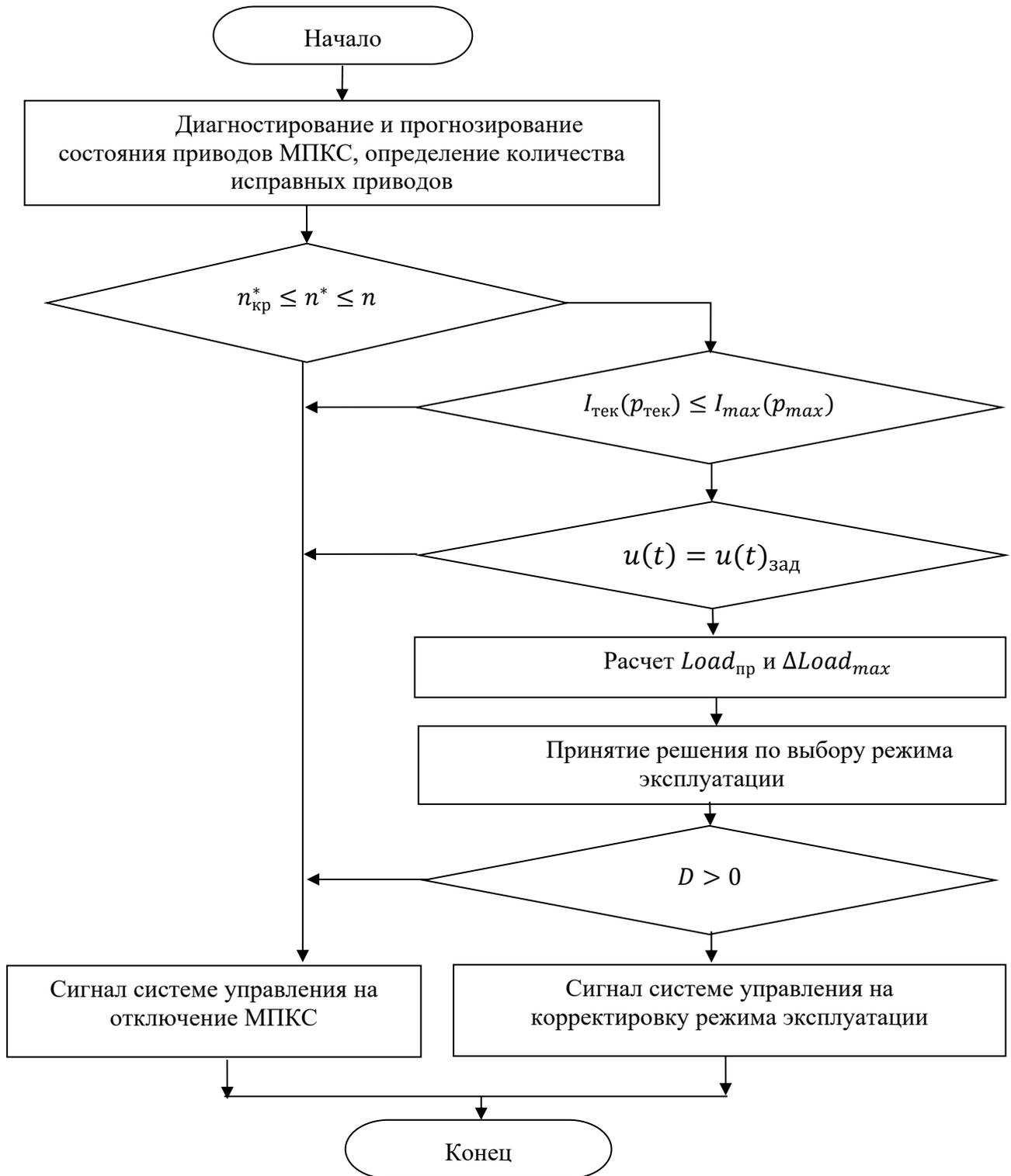


Рисунок 5.26 – Алгоритм интеллектуального принятия решения по выбору режима эксплуатации МПКС с параллельными кинематическими цепями

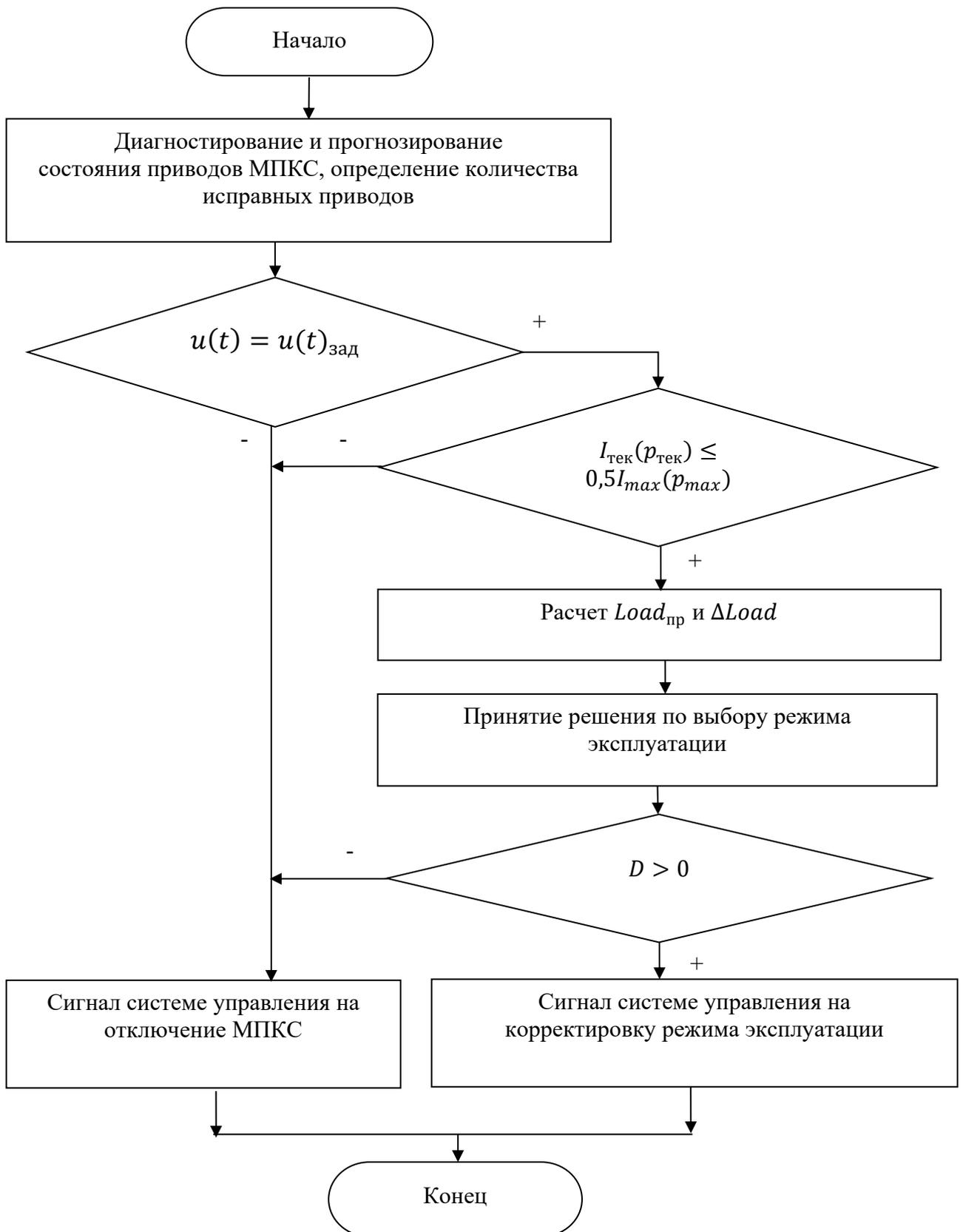


Рисунок 5.27 – Алгоритм интеллектуального принятия решения по выбору режима эксплуатации МПКС со сходящимися кинематическими цепями

В процессе оптимизации режима эксплуатации МПКС выполняется анализ следующих параметров:

- текущее и прогнозное состояние приводов;
- токи/или давление на приводах МПКС;
- закон управления движением платформы МПКС;
- текущая и дополнительная нагрузки на приводы.

В случае идентификации частичного отказа системы приводов выполняется корректировка работы МПКС в следующем порядке:

1. С помощью моделей диагностирования и прогнозирования технического состояния определяется текущее техническое состояние каждого привода МПКС и количество исправных приводов, для которых период сохранения работоспособности $T > 0$.

2. Выполняется проверка граничных условий и возможности корректировки в случае отклонения.

3. В случае выполнения всех граничных условий производится расчет оптимизационной функции (5.14) или (5.15), а также текущей и максимального дополнительной нагрузок на каждый исправный привод МПКС.

4. С помощью интеллектуальной модели оптимизации режима эксплуатации для рассматриваемой кинематической структуры определяется режим дальнейшей эксплуатации приводов МПКС.

5. Если $D > 0$ – подается сигнал системе управления на изменение режима эксплуатации.

6. В случае невыполнения любого из граничных условий (5.14) или (5.15) или $D \leq 0$ – подается сигнал на отключение МПКС.

Изначально граничное условие статической устойчивости кинематических цепей МПКС (5.15) выведено из условия равномерности распределения нагрузок [21], лежащего в основе проектирования отказоустойчивых МПКС. Однако помимо общего количества неисправных приводов определяющим является их вза-

имное положение друг относительно друга, которое учитывает предложенная модель расчета дополнительной нагрузки на приводы МПКС соответствующей кинематической структуры. Предложенные алгоритмы (см. рисунки 5.26, 5.27) определяют возможность реализовать управление МПКС с учетом технического состояния приводов, не допустив их перегрузок и преждевременного отказа. Применение данных алгоритмов предопределяет возможность существенно продлить срок эксплуатации МПКС. Однако для его реализации необходимо рассмотреть вопрос корректировки режима эксплуатации, разработав теоретические основы управления МПКС с учетом технического состояния исполнительных приводов.

5.4 Метод управления механизмами параллельной кинематической структуры с учетом технического состояния системы исполнительных приводов

В случае принятия положительного решения о возможности корректировки режима эксплуатации МПКС возникает необходимость пересчета управляющих сил F_i на каждом исправном приводе (см. параграф 2.3). При перераспределении нагрузки на приводы увеличивается статическая составляющая $F_{ст}$ управляющей силы, отвечающая за удержание груза. При этом дополнительная управляющая сила ΔF_i (2.21), отвечающая за выполнения заданного закона движения, остается неизменной.

В п 2.3 для расчета скорректированной управляющей силы (F_i^*) предлагается ввести интегральный коэффициент $K_{инт}$, учитывающий техническое состояние, текущую и дополнительную нагрузку на привод. Умножение данного коэффициента на статическую составляющую управляющей силы $F_{ст}$ предопределяет возможность расчета F_i^* по (2.22). Для реализации предложенной идеи необходимо выполнить синтез интегрального коэффициента $K_{инт}$ и разработать систему управления МПКС при частичном отказе системы приводов.

Управление приводами МПКС строится по принципу линейной обратной связи по положению звена [23]. Пример функциональной схемы локальной системы управления электромеханическим приводом звена МПКС, представлен на рисунке 5.28.

На приводе устанавливается регулятор положения, в котором управление движением стоек манипулятора реализуется изменением напряжения питания [24].



Рисунок 5.28 – Локальная система управления электромеханическим приводом звена МПКС

Сформированный системой управления верхнего уровня управляющий сигнал ($U_h^{\text{зад}}$), пропорциональный управляющей силе F_i , поступает на регулятор положения звена и перемещает его на требуемую величину h с заданной скоростью $v_{\text{зв}}$.

При частичном отказе системы приводом МПКС неисправные приводы не могут создавать управляющую силу F_i , а следовательно, возникает проблема ее возможного перераспределения на соседние приводы для продолжения эксплуатации платформы согласно заданному закону движения. Для решения этой задачи целесообразно добавить в существующую локальную систему контроля положения (см. рисунок 5.28) подсистему управления скоростью в зависимости от внешней нагрузки. Согласно методу операционного интегрального преобразования Лапласа [158], динамика локальной системы управления скоростью сервопривода постоянного тока звена МПКС может быть описана передаточной функцией:

$$W_{\text{ДПТ}}(p) = k_{\text{дв}} \cdot (T_{\text{м}} \cdot T_{\text{я}} \cdot p^2 + T_{\text{м}} \cdot p + 1)^{-1},$$

где $k_{\text{дв}} = (C_{\text{м}} \cdot \Phi)^{-1}$ – коэффициент передачи привода;

$T_M = J_d \cdot R_{я} \cdot (C_e \cdot C_M)^{-1}$ - электромеханическая постоянная времени;

$T_{я} = L_{я} \cdot R_{я}^{-1}$ - электромагнитная постоянная времени.

Редуктор и винтовая передача МПКС в динамическом отношении представляют интегрирующее звено:

$$W_{РВП}(p) = (K_p \cdot K_{ВП}) \cdot p^{-1},$$

где $K_p, K_{ВП}$ – коэффициенты передачи редуктора и винтовой пары звена МПКС соответственно.

Тогда структурная схема привода звена МПКС как объекта управления имеет вид, представленный на рисунке 5.29, где $U_{дв}$ – напряжение на якорной обмотке, В; $I_{я}$ – ток якорной обмотки, А; c_M, c_E – конструктивные постоянные привода, Н·м/А; J_d – момент инерции якоря, кг·см²; $M_{дв}$ – момент на валу привода, Н·м; M_c – момент сил сопротивления, Н·м; $\omega_{дв}$ – угловая скорость вращения вала привода, рад/с; $M_{тр} = M_{тр0} \cdot \text{sign}(\omega_{дв})$ – момент сил сухого трения, Н·м; $M_{в.тр} = k_{в.тр} \cdot \omega_{дв}$ – момент сил вязкого трения, Н·м; $k_{в.тр}$ – коэффициент вязкого трения, Н·м·с.

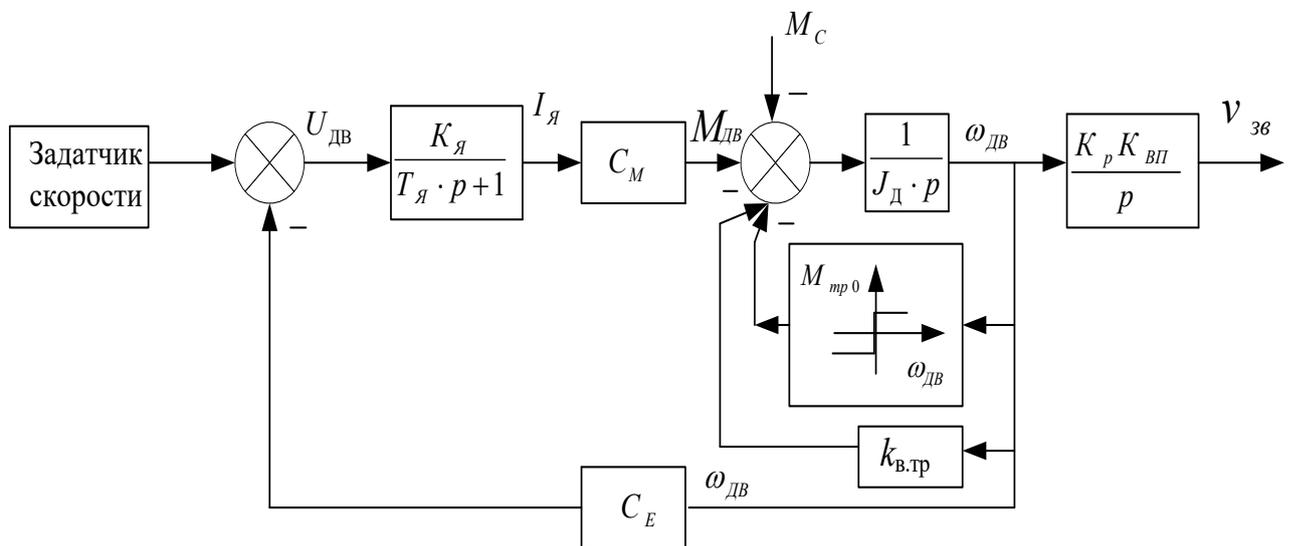


Рисунок 5.29 – Модель привода звена МПКС

Все необходимые параметры привода могут быть рассчитаны согласно таблице 5.7. На привод постоянного тока подается напряжение, пропорциональное

управляющей силе F_i и заданной скорости вращения привода $\omega_{двj}$. На выходе привода расположена механическая часть звена, преобразующая вращательную скорость электропривода в поступательную скорость звена $u_{зв}$.

В процессе эксплуатации на данную систему оказывает влияние возмущение – момент сопротивления M_c , который при работе привода на холостом ходу

$$M_{c_ном} = M_H \cdot 0.4.$$

Таблица 5.7 – Исходные данные для расчета параметров системы управления скоростью звена МПКС

Основные параметры сервопривода	Расчетная формула
Номинальный КПД привода	$\eta = P_H \cdot (U_H \cdot I_H)^{-1}$
Сопротивление якорной цепи, Ом	$R_я = 0.5 \cdot U_H \cdot (1 - \eta) \cdot I_H^{-1}$
Номинальная частота вращения, с ⁻¹	$\omega_H = (2\pi \cdot n_H) \cdot 60^{-1}$
Скоростной коэффициент, В с	$C_E = (U_H - I_H \cdot R_я) \cdot \omega_H^{-1}$
Момент номинальный, Н м	$M_H = P_H \cdot \omega_H^{-1}$
Момент сопротивления, Н м	$M_c = M_H \cdot 0.4$
Постоянная времени якорной цепи, с	$T_я = L_я \cdot R_я^{-1}$
Коэффициент усиления цепи якоря, Ом ⁻¹	$k_я = R_я^{-1}$
Электромеханическая постоянная времени, с	$T_M = J_{пр} \cdot R_я \cdot (C_e \cdot C_M)^{-1}$

Коэффициенты передачи редуктора и винтовой передачи выбраны так, чтобы при заданном напряжении и номинальном моменте сопротивления $M_{c_ном}$ звено поднималось с заданной скоростью. При частичном отказе системы приводов происходит перераспределение нагрузки на соседние приводы, что является причиной увеличения момента сопротивления M_c и снижения скорости вращения сервоприводов, а следовательно, и подъема соответствующих звеньев. На рисунке 5.30 показано изменение выходной скорости звена МПКС при увеличении нагрузки в полтора, два и три раза. Из данного графика следует, что изменение внешней нагрузки существенно снижает скорость движения звена, что приводит к невыполнению за-

данного закона управления. Разработка системы управления по возмущению (изменению момента сопротивления привода МПКС) предопределяет возможность не допустить снижение скорости, а, следовательно, реализовать заданный закон движения звена (см. рисунок 5.31).

Для решения задачи синтеза регулятора по нагрузке необходимо определить корректирующую функцию $U_n = f(M_c)$, зависящую от момента сопротивления.

На основе моделей оценки текущей и дополнительной нагрузки на привод МПКС перераспределенная нагрузка на каждую j -ю стойку МПКС:

$$Load_{пр_j} = Load_{пр_i}(1 + L_{ch_j}),$$

где $Load_{пр_i}$ – текущая нагрузка на исправный привод МПКС; L_{ch_j} – коэффициент дополнительной нагрузки на каждый j -й исправный привод.

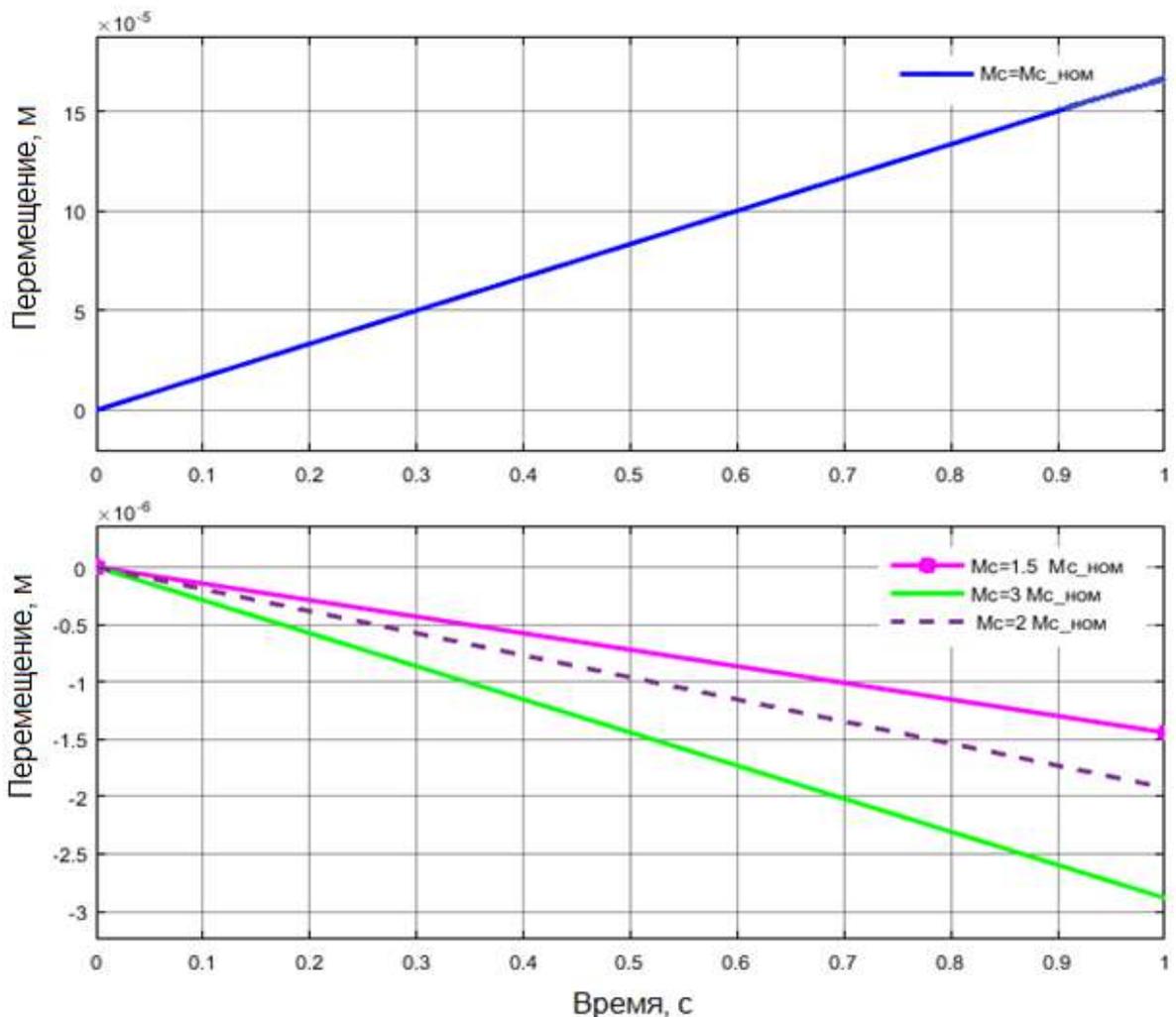


Рисунок 5.30 – Взаимосвязь скорости звена и момента сопротивления привода

Поскольку нагрузка на привод пропорциональна статической составляющей управляющей силы $Load_{пр_i} \sim F_{ст_i}$, то интегральный коэффициент определяется по:

$$K_{инт} = 1 + L_{ch_j}.$$

Тогда (2.97) может быть записано как:

$$F_i^* = F_{ст} (1 + L_{ch_j}) + \Delta F_i.$$

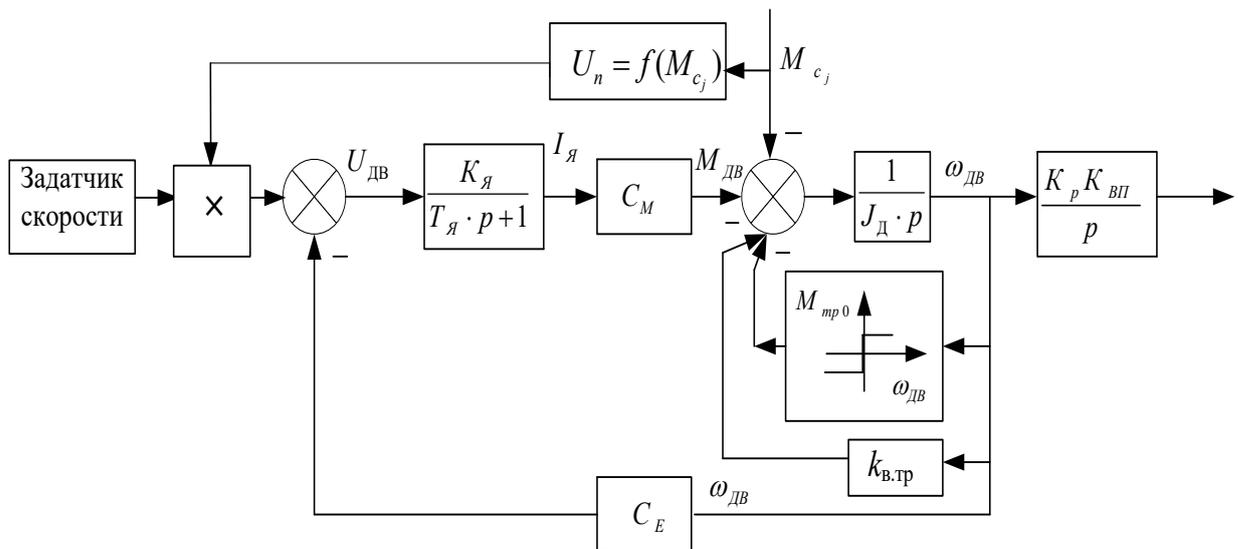


Рисунок 5.31 – Модернизированная модель привода звена МПКС с компенсацией изменения внешней нагрузки

Скорректированные управляющие силы F_i^* вычисляются для каждого исправного привода МПКС и могут существенно отличаться друг от друга в зависимости от их расположения относительно неисправных приводов. Разработанная (см. параграф 5.4) модель принятия решения для разных кинематических структур МПКС исключает перегрузку исправных приводов за счет контроля выполнения условия (2.22) и граничных условий критерия оптимизации (5.14), (5.15).

Согласно разработанным моделям текущая и дополнительная нагрузки вычисляются в процентах от предельной. Для того, чтобы избавиться от процентов, запишем выведенные формулы следующим образом:

$$l_{пр_i} = Load_{пр_i} / 100\% - \text{текущая нагрузка на привод};$$

$l_{прj} = Load_{прj}/100\%$ – дополнительная нагрузка на привод.

Тогда:

$$\Delta l_{прj} = l_{прi} \cdot L_{chj};$$

$$l_{прj} = l_{прi} \cdot K_{инт}.$$

Момент сопротивления привода звена МПКС зависит от момента сопротивления электропривода, редуктора и винтовой передачи. Также на момент сопротивления оказывают существенное влияние углы наклона стоек к горизонтали (γ_i) и друг к другу α_i (см. параграф 2.3). Поэтому при расчете момента сопротивления привода звена необходимо ввести коэффициент увеличения момента сопротивления $K_{мс} = f(\gamma_i, \alpha_i)$, зависящий от данных параметров.

Поскольку $M_{с_ном} \sim l_{прj}$, то текущий момент сопротивления:

$$M_{сj} = M_{с_ном} (1 + L_{chj}) \cdot K_{мс} = M_{с_ном} \cdot K_{инт} \cdot K_{мс},$$

где $M_{с_ном}$ – момент сопротивления сервопривода на холостом ходу.

Таким образом, L_{chj} рассчитанной в процессе синтеза модели дополнительной нагрузки:

$$M_{сj}(L_{chj}) = M_{с_ном} \cdot K_{инт} \cdot K_{мс}.$$

Из этого следует, что корректирующая функция по моменту сопротивления также должна зависеть от L_{chj} , то есть (5.23):

$$U_n = f(M_{сj}) = f(L_{chj}). \quad (5.23)$$

На основе вышеизложенного и анализа зависимостей, приведенных на рисунке 5.32, установлено, что корректирующая функция по моменту нагрузки системы управления скоростью звена МПКС имеет вид (5.24):

$$U_n = 1 + K_{пр} \cdot L_{chj}^{-1}, \quad (5.24)$$

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

Модернизированная локальная система управления приводом звена МПКС с коррекцией по изменению нагрузки представлена на рисунке 5.32 [A294-A299].

На каждой винтовой передаче МПКС устанавливается датчик момента сопротивления M_{cj} , результаты измерения которого поступают в киберфизическую систему оценки технического состояния, где реализуется оценка технического состояния, текущей и дополнительной нагрузки на каждый привод, а также принятие решения по оптимизации режима эксплуатации.



Рисунок 5.32 – Модернизированная локальная система управления приводом звена МПКС с коррекцией внешней нагрузки

В случае положительного решения для каждого привода происходит увеличение питающего напряжения в $K_{инт}$ раз:

$$U_h^{зад*} = U_h^{зад} K_{инт}.$$

При отказе привода или отрицательном решении по оптимизации киберфизическая система подает сигнал на отключение привода.

Применение корректирующей функции U_n (5.23) предопределяет возможность полностью компенсировать влияние момента нагрузки (5.24) на скорость движения звеньев МПКС.

Разработаны теоретические основы управления МПКС с учетом технического состояния исполнительных приводов, предопределяющие возможность, на основе рассчитанного коэффициента дополнительной нагрузки L_{ch_j} определить необходимое значение питающего напряжения $U_n^{\text{зад}^*}$ и корректирующей функции U_n , которая предоставляет возможность обеспечить заданную скорость подъема звена МПКС независимо от внешней нагрузки на его сервопривод.

5.5 Выводы по главе 5

1. Выполненный анализ способов повышения надежности МПКС показал целесообразность применения нагрузочного резервирования систем приводов. Данное заключение предопределило возможность:

- 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.
- разработать алгоритмы принятия решения по результатам диагностирования и прогнозирования технического состояния с учетом кинематической структуры, граничных условий, перераспределения нагрузок на приводы с помощью моделей принятия решения.

2. Предложен метод управления МПКС с учетом технического состояния и внешней нагрузки для обеспечения поддержания заданной скорости движения звеньев и выполнения необходимого технологического процесса.

Глава 6 Принципы структурирования киберфизических систем оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры

6.1 Синтез системы оценки технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Для реализации методологии оценки технического состояния приводов МПКС разработаны модели, предоставляющие возможность по результатам измерения тока и/или вибрации определить текущее и прогнозное состояние привода, а также определить все его неисправности. Для успешной реализации концепции построения киберфизических систем оценки технического состояния приводов МПКС необходим метод, способный осуществить совместно диагностирование и прогнозирование в режиме реального времени, для реализации которого целесообразно объединить полученные модели. Полученная объединенная модель оценки текущего и прогнозного технического состояния приводов МПКС выполняет следующую последовательность действий:

1. В режиме нормального функционирования привода происходит измерение сигнала тока или вибрации во времени.
2. Расчет характерных частот Фурье-преобразования и определение соответствующих характерных масштабов согласно таблицам 4.2, 4.14 и формулам (4.1), (4.2).
3. Для каждого характерного масштаба вейвлет-коэффициентов, согласно (4.3) – (4.6), вычисляется огибающая значений вейвлет-коэффициентов и, согласно (4.7) – (4.10), производится ее аппроксимация по методу наименьших квадратов с использованием полинома первой степени. Определяются значения коэффициентов k и b .

4. Полученные значения k подаются на блоки сравнения, где определяется их знак. Если для всех масштабов $k < 0$, то привод исправен. Если хотя бы для одного из масштабов $k \geq 0$, то диагностируемый сервопривод является неисправным. Все полученные значения k заносятся в базу данных для прогнозирования технического состояния.

5. Для каждого масштаба вейвлет-коэффициентов из базы данных извлекается тренд коэффициентов k за предыдущие периоды эксплуатации привода, формируется обучающая выборка и происходит обучение нейронной сети с использованием алгоритма обратного распространения ошибки. Далее на вход сети для каждого масштаба подается вектор S и происходит прогнозирование коэффициентов k на последующий период эксплуатации.

6. Если хотя бы для одного из масштабов спрогнозированное значение $k \geq 0$, то диагностируемый привод выйдет из строя в течение последующего периода эксплуатации и процесс прогнозирования необходимо прекратить. Если для всех масштабов $k < 0$, то привод сохранит свою работоспособность в последующий период эксплуатации. В этом случае спрогнозированные значения k добавляются в базу данных, где формируется новая тестовая выборка. Данный процесс продолжается до тех пор, пока на выходе сети не будет получено $k \geq 0$. Количество пройденных итераций равно периоду сохранения работоспособности T приводом.

7. Определение причины будущей неисправности согласно (4.12).

8. Определение технического состояния привода в следующий период эксплуатации согласно (4.13).

Полученная модель имеет восемь уровней, включающих операции измерения, вычисления, сравнения и аппроксимации. Используемые блоки измерений и вычислений выполняют функцию «модуля генерации данных» (см. рисунок 3.7), следовательно, могут быть объединены. Блок аппроксимации, представленный нейронной сетью, предназначен для определения причины неисправностей и может быть использован для решения задач диагностирования и прогнозирования. Таким образом, приведенная структура подсистемы диагностирования и прогнозирования может быть преобразована к виду, представленному на рисунке 6.1.

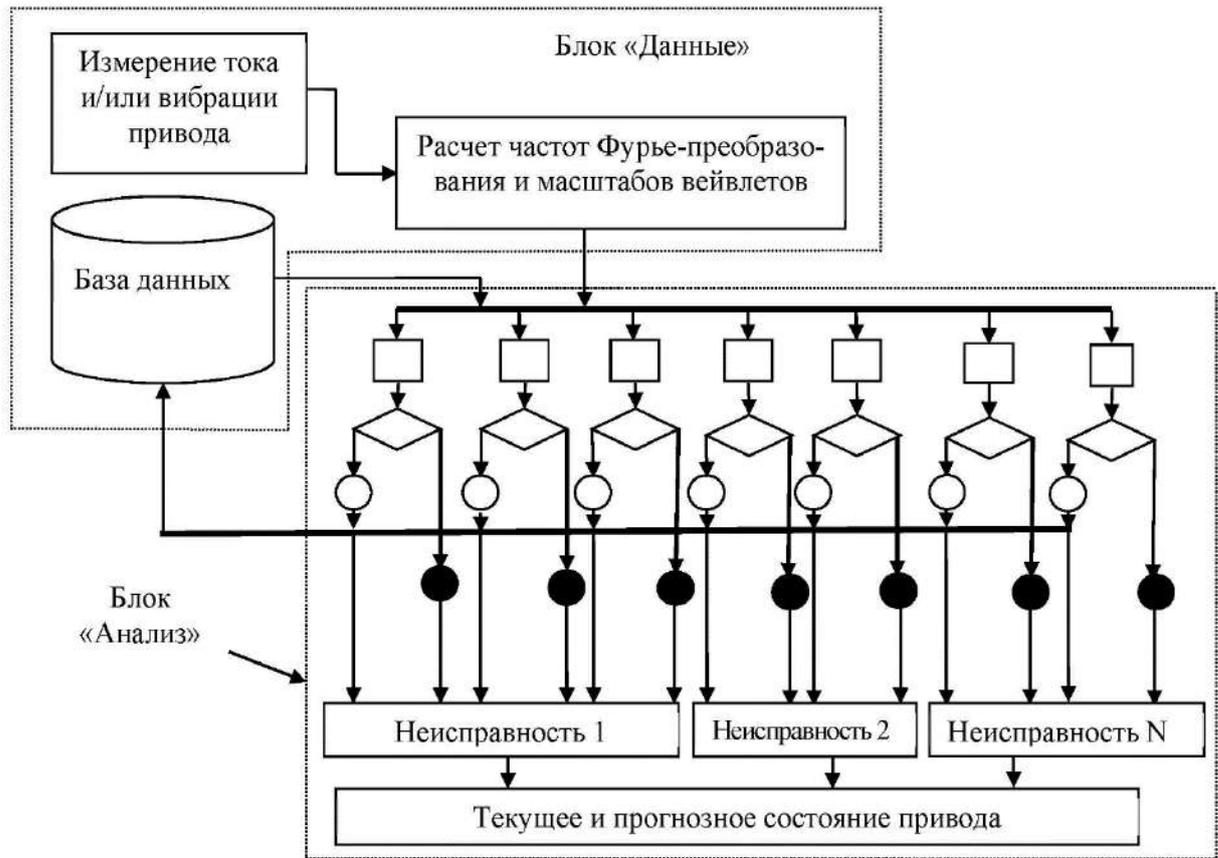


Рисунок 6.1 – Блок-схема подсистемы оценки технического состояния приводов МПКС

С привода снимается сигнал тока или вибрации, который подается в блок «Данные», где происходит расчет частот Фурье-преобразования и соответствующих характерных масштабов вейвлет-преобразования согласно (4.1), (4.2).

Далее информация попадает в блок «Анализ», где происходят параллельные вычисления огибающей вейвлет-коэффициентов для каждого характерного масштаба согласно (4.3) – (4.8) и производится ее аппроксимация по методу наименьших квадратов согласно (4.9), (4.11). В результате получены коэффициенты k прямых, аппроксимирующих огибающие, которые подаются в блок сравнения, где определяется их знак. Если хотя бы для одного из масштабов $k \geq 0$, то полученные коэффициенты подаются на блок аппроксимации, где осуществляется поиск неисправностей и определяется общее техническое состояние привода. Если для всех масштабов $k < 0$, то полученные коэффициенты записываются в базу данных и

формируется новая тестовая выборка, происходит прогнозирование технического состояния привода.

Если в результате прогноза для всех масштабов $k < 0$, то спрогнозированные коэффициенты подаются на вход нейронной сети и весь процесс прогнозирования повторяется до тех пор, пока хотя бы один из коэффициентов станет $k \geq 0$. Число пройденных итераций равняется количеству периодов сохранения работоспособности сервоприводом.

Приведенная блок-схема содержит блоки «Данные» и «Анализ», характерные для структуры киберфизического взаимодействия (см. рисунок 3.8). Все вычисления реализуются программным способом в режиме реального времени, следовательно, удовлетворяют требованиям, предъявленным к методам диагностирования и прогнозирования для киберфизического взаимодействия (см. параграф 3.3).

Возможность поиска неисправностей в данной системе иллюстрирует диаграмма прохождения сигнала, представленная на рисунке 6.2.

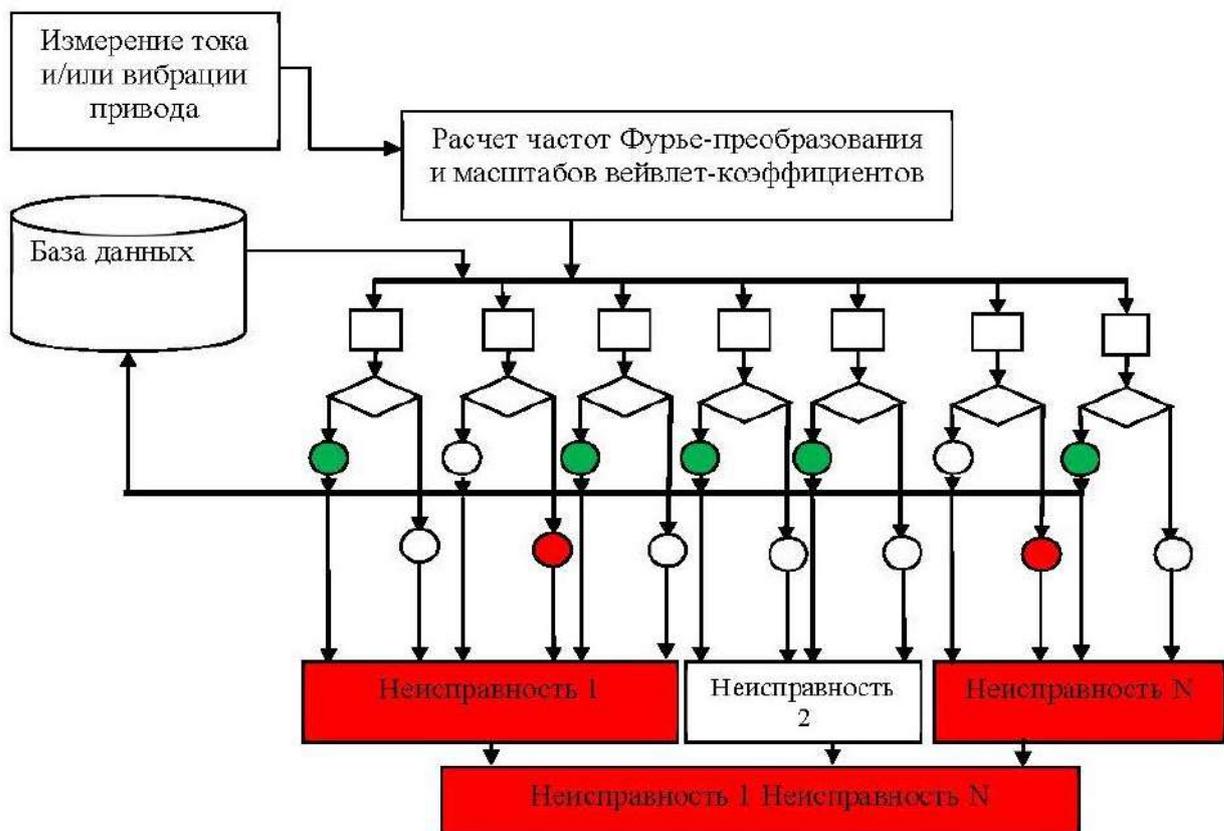


Рисунок 6.2 – Диаграмма прохождения сигнала в подсистеме оценки технического состояния приводов МПКС

В случае, когда в процессе диагностирования или прогнозирования получен хотя бы один коэффициент $k \geq 0$, происходит поиск неисправностей (4.18) и определение текущего состояния привода согласно (4.19). На рисунке 6.2 показан вариант неисправного состояния привода и наличие двух неисправностей. В случае прогнозирования технического состояния определение будущих неисправностей определяется числом периодов сохранения работоспособности сервоприводом.

Программная часть подсистемы диагностирования и прогнозирования приводов МПКС состоит из четырех подпрограмм (Приложение А), выполняющих расчет вейвлет-коэффициентов на характерном масштабе, построение огибающей, определение текущей нагрузки и прогноз технического состояния

Объединение данных подпрограмм, согласно приведенного алгоритма, предоставляет возможность получить программу работы описанного уровня с учетом особенностей диагностируемого объекта.

6.2 Синтез отказоустойчивой системы приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры

Анализ разработанных в главах 4 и 5 теоретических основ показал, что диагностирование, прогнозирование и определение текущей нагрузки выполняется для каждого привода МПКС в отдельности, а расчет дополнительной нагрузки и принятие решения по выбору режима эксплуатации – для МПКС в целом. При этом модель принятия решения включает проверку граничных условий оптимизационной функции (5.15) и расчет максимальной дополнительной нагрузки на приводы [300].

В процессе проектирования МПКС предусматривается равномерное распределение нагрузки на каждый его привод. Для выполнения этого условия введена оптимизационная функция (5.17) или (5.18) с рядом граничных условий, описывающих статическую устойчивость, надежность, степень нагружения и управляемость МПКС. Отказ одного или нескольких приводов происходит при нарушении равновесия выходной платформы и необходимости перераспределения нагрузки с неис-

правных исполнительных элементов на соседние исправные. При этом определяющим является взаимное положение неисправных приводов друг относительно друга. В параграфе 4.4 предложены модели расчета дополнительной нагрузки с учетом кинематической структуры МПКС, количества и взаимного положения неисправных приводов МПКС. Учет максимальной дополнительной нагрузки на привод в модели интеллектуального принятия решения предоставляет возможность изменить режим работы МПКС в режиме реального времени и не допустить перегрузки приводов. Получена отказоустойчивая МПКС с учетом технического состояния системы приводов, блок-схема которой представлена на рисунке 6.3.



Рисунок 6.3 – Блок-схема отказоустойчивых МПКС с учетом технического состояния системы их приводов

Подсистема функционирует следующим образом:

1. С помощью системы оценки технического состояния (см. параграф 6.1) выполняется техническое диагностирование и прогнозирование состояния для каждого привода МПКС.
2. Если в результате диагностирования получен коэффициент $k \geq 0$ или прогнозный период сохранения работоспособности менее единицы, считать данный привод неисправным и вывести из эксплуатации.
3. Определение количества исправных приводов и проверка граничных условий оптимизационной функции (5.16) или (5.17).
4. В случае выполнения (5.16) или (5.17) рассчитываются максимальная дополнительная нагрузка на каждый исправный сервопривод МПКС, средняя нагрузка на приводы группы и минимальная прогнозная продолжительность сохранения работоспособности приводов группы.
5. С помощью интеллектуальной модели принятия решения определяется режим дальнейшей эксплуатации МПКС соответствующей структуры.

Результатом работы моделей принятия решения являются значения решения $D \in [-1, 1]$. Если $D > 0$, то целесообразно изменить нагрузку на исправные приводы группы на значение $\Delta Load_{прj}$, рассчитанное в соответствии с кинематической структурой МПКС. Если $D \leq 0$, то состояние приводов неудовлетворительное или имеется недопустимая дополнительная нагрузка, необходимо остановить технологический процесс. Графическая интерпретация интеллектуальной подсистемы принятия решения представлена в виде блока «Принятие решения» (см. рисунок 6.3), который характерен для киберфизической системы (см. рисунок 3.8). Все вычисления реализуются программным способом в режиме реального времени, следовательно, предложенный метод принятия решения удовлетворяет требованиям, предъявленным к киберфизической системе. В приложении А приведены подпрограммы расчета дополнительной нагрузки и принятия решения, реализующие данный уровень киберфизической системы оценки технического состояния.

6.3 Синтез интеллектуальной системы управления движением механизмов параллельной кинематической структуры при частичном отказе в системе приводов

В случае принятия положительного решения ($D > 0$) происходит расчет необходимого питающего напряжения $U_z^{\text{зад}^*}$ и корректирующей функции U_n для обеспечения заданной скорости подъема звеньев МПКС при изменении нагрузки на его приводы в случае частичного отказа. Исходными данными для расчета U_n являются момент сопротивления сервопривода на холостом ходу, текущая (проектная) нагрузка на привод и коэффициент изменения нагрузки, определенный с помощью нечеткой модели расчета дополнительной нагрузки, описанной в параграфе 5.2. Частичный отказ системы приводов МПКС приводит к увеличению момента сопротивления, для компенсации которого в параграфе 5.4 синтезирована динамическая корректирующая функция U_n (5.24), зависящая от коэффициента изменения нагрузки L_{ch_j} (5.21), рассчитанного с помощью аппарата нечеткой логики. Структура интеллектуальной системы управления МПКС с учетом технического состояния его сервоприводов приведена на рисунке 6.4.

Разработанная система управления МПКС предоставляет возможность на основании предложенных методов диагностирования и прогнозирования технического состояния, сформулированных критериев (5.14), (5.15) с применением моделей перераспределения нагрузки и принятия решения определить необходимое безопасное увеличение напряжения на каждый сервопривод МПКС для компенсации увеличенной нагрузки на привод МПКС.

Для каждого сервопривода МПКС производится измерение токового сигнала и его анализ согласно предложенным методам диагностирования и прогнозирования технического состояния. Далее осуществляется расчет текущей и дополнительной нагрузок и принимается решение о необходимости и целесообразности изменения режима эксплуатации МПКС.

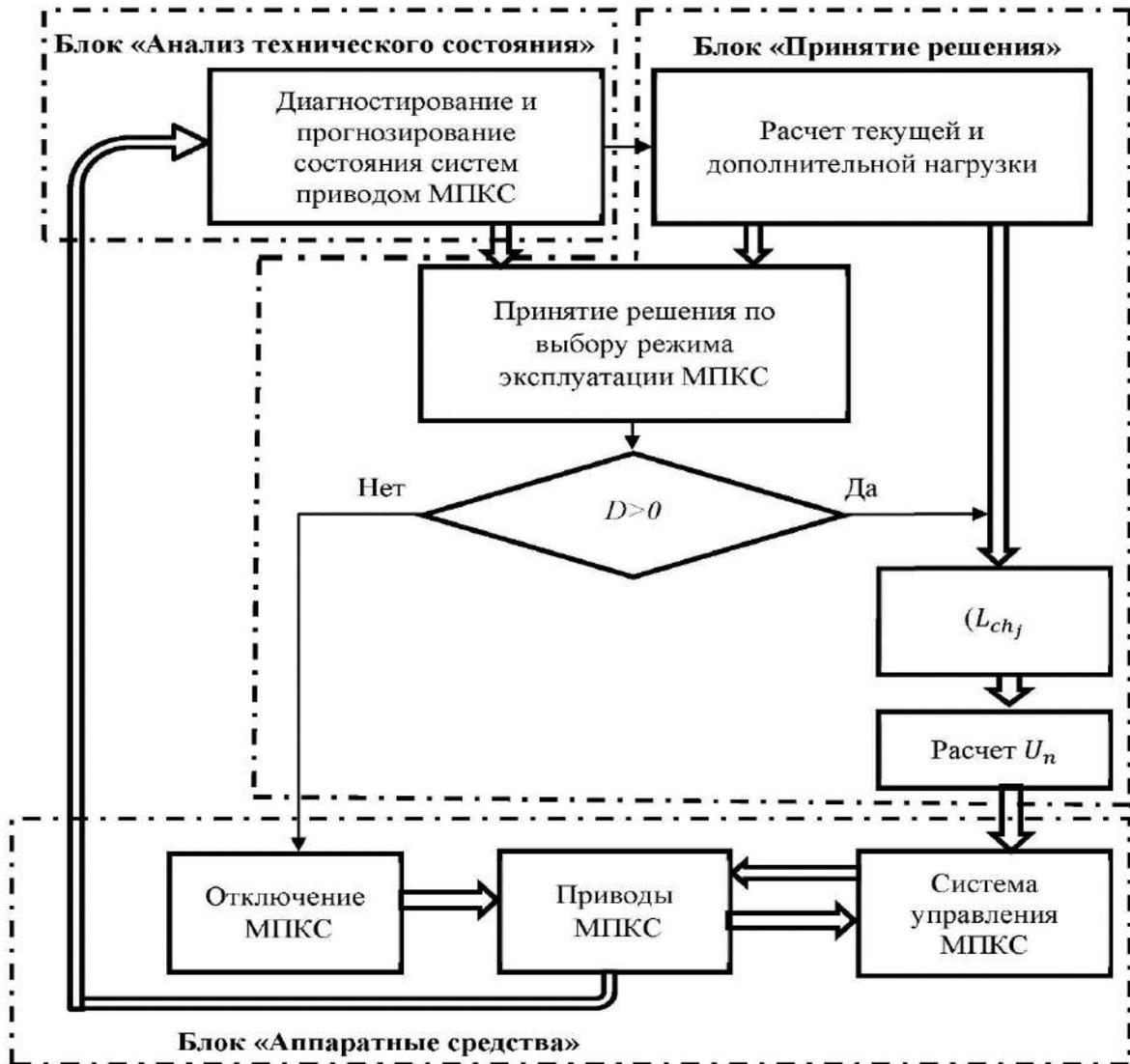


Рисунок 6.4 – Интеллектуальная система управления МПКС с частичным отказом системы приводов

В случае положительного решения, на основании найденных коэффициентов изменения нагрузки, происходит расчет корректирующих функций для каждого сервопривода, которые подаются в локальную систему управления стойками МПКС с коррекцией по внешней нагрузке (см. рисунок 5.40). В случае отрицательного решения происходит отключение МПКС.

Приведенная на рисунке 6.4 система управления объединяет все структурные блоки обработки информации в киберфизической системе оценки технического состояния (см. рисунок 3.9). При этом кибернетическая часть является основной в

данной системе, объединяя блоки «Анализ технического состояния» и «Принятие решения». Блок «Аппаратные средства» является физической частью системы – объектом управления. Для практической реализации полученной системы необходимо разработать ее архитектуру, распределив все функции киберфизической системы по различным уровням.

6.4 Синтез архитектуры киберфизической системы оценки технического состояния исполнительных приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры

В предыдущих главах диссертационной работы сформулированы принципы организации киберфизических систем оценки технического состояния исполнительных приводов МПКС. Составлен перечень требований, предъявляемых к методам оценки технического состояния и синтеза отказоустойчивой системы приводов МПКС. На рисунке 4.9 представлена обобщенная структура киберфизической системы, включающей кибернетическую и физическую части.

Физическая часть представлена объектом диагностирования в виде набора совместно работающих приводов МПКС, которые могут находиться на значительном удалении друг от друга, датчиками и локальными системами управления каждым приводом МПКС. Кибернетическая часть состоит из блоков «Данные» и «Внутреннее программное обеспечение», реализующих основную функцию, для которой проектируется система. Согласно разработанным принципам построения все процедуры по реализации диагностирования, прогнозирования и принятия решения при выборе режима эксплуатации должны выполняться программным способом.

В главе 4 разработаны методы определения текущего и прогнозного состояния каждого привода, полностью удовлетворяющие предъявленным к ним требованиям. На рисунке 6.2 представлена структура системы оценки технического состояния, содержащая блоки «Данные» и «Анализ», присущие киберфизической системе (см. рисунок 3.9). Также разработаны теоретические основы синтеза отказоустойчивых систем приводов, предоставляющие возможность по результатам диагностирования,

прогнозирования и оценки текущей нагрузки на каждый привод рассчитать необходимое изменение нагрузки для выполнения заданного технологического процесса и с помощью модели принятия решения определить целесообразность изменения режима эксплуатации приводов в зависимости от их технического состояния. На рисунке 6.3 приведена блок-схема реализации метода интеллектуального принятия решения, содержащая блоки «Анализ» и «Принятие решения», характерные для киберфизической системы. Объединение всех полученных моделей формализует концептуальную структуру киберфизической системы оценки технического состояния отказоустойчивых систем приводов МПКС (рисунок 6.5).

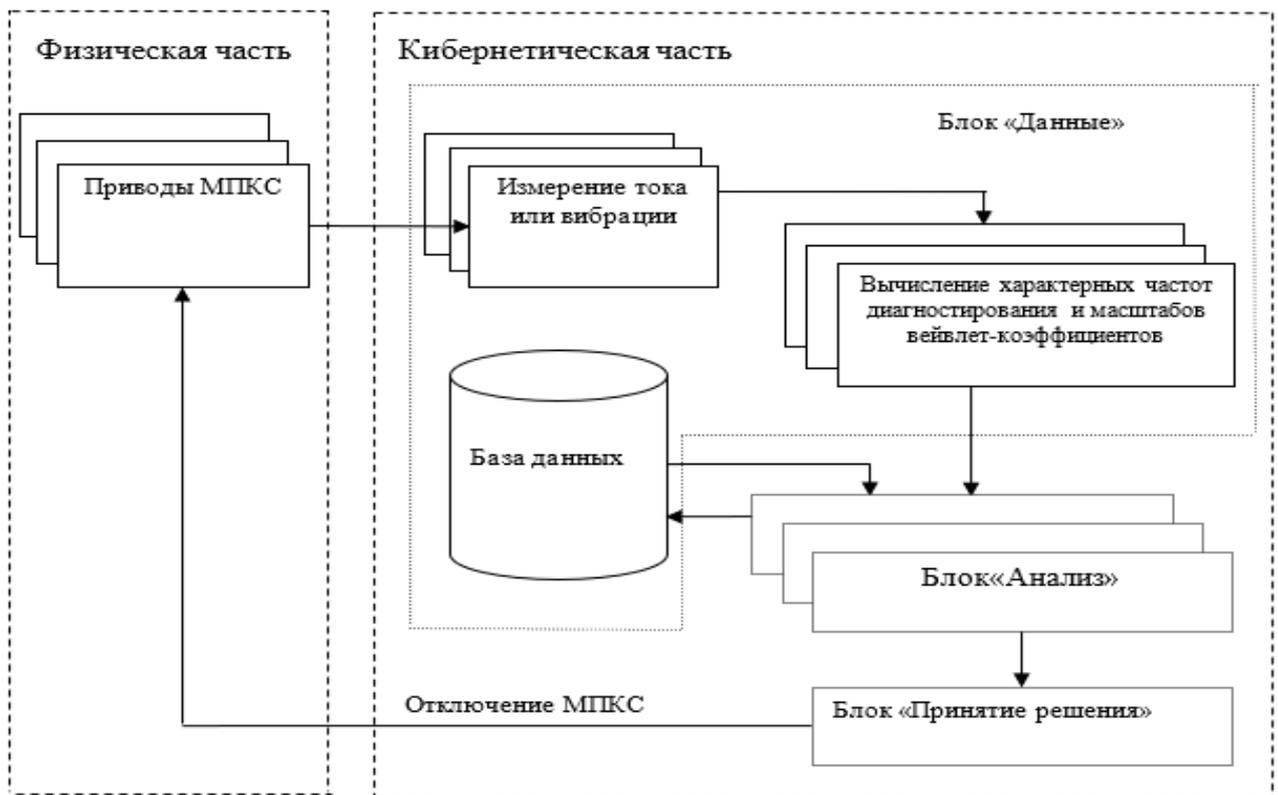


Рисунок 6.5 – Концептуальная структура киберфизической системы оценки технического состояния отказоустойчивых систем приводов МПКС

В данной структуре физическая часть представлена системой приводов МПКС. Блоки «Данные» и «Анализ», входящие в состав кибернетической части, производят сбор, подготовку и обработку диагностической информации, согласно предложенным методам, для каждого привода в отдельности, а блок «Принятие решения» использует

данные о техническом состоянии всех приводов МПКС.

Для практической реализации киберфизической системы необходимо разработать архитектуру, учитывающую технологический процесс, в котором функционирует МПКС, разработанные методы диагностирования, прогнозирования и принятия решения по изменению режима эксплуатации системы приводов.

Киберфизические системы представляют собой интеграцию вычислений с физическими процессами, при которых встроенные компьютеры и сети контролируют физические процессы, как правило, с помощью контуров обратной связи. К встраиваемым системам предъявляются более высокие требования по надежности и предсказуемости по сравнению с универсальными вычислениями [301]. При этом большинство физических систем функционируют в недетерминированной среде и их поведение не всегда предсказуемо, поэтому кибернетическая часть должна адаптироваться к неожиданным изменениям условий эксплуатации и отказам в системе приводов МПКС.

Поведение компонентов системы на любом уровне должно быть максимально предсказуемым и надежным. В случае отказа элементов части системы его должен компенсировать следующий уровень [302]. Задача обеспечения высокого уровня надежности и предсказуемости весьма сложна и реализуется за счет кодирования информации и адаптивных протоколов [303]. Еще одной существенной проблемой реализации киберфизических систем является обеспечение надежности и предсказуемости программного обеспечения. Применение концепции построения мехатронных систем, предусматривающей запись программного обеспечения во встроенный блок без внешней связи, предоставляет возможность обеспечить максимальную надежность и предсказуемость работы системы. Однако концепция организации киберфизических систем предусматривает обмен информацией между их элементами посредством сети *Internet*, что может привести к сбоям, связанным с перебоями в связи, шумами или хакерскими атаками. Для решения данной проблемы целесообразно использовать методы параллельного вычисления и архитектуру киберфизической системы, семантика которой будет соответствовать структуре реализуемой системы.

Для обеспечения наиболее простой и надежной архитектуры киберфизической системы необходимо основную функцию переложить на встроенное программное

обеспечение, реализовав принципы параллелизма и синхронизации, обеспечив минимальное количество переходов между уровнями системы [А299]. Основная вычислительная функция должна располагаться на нижнем уровне, сопряженном с объектом диагностирования. При этом более высокие уровни системы будут производить обмен информацией исключительно о результатах оценки технического состояния приводов и принимать решение о реконфигурации системы и изменении режима работы МПКС. Таким образом, архитектура киберфизической системы оценки технического состояния будет иметь вид, представленный на рисунке 6.6.

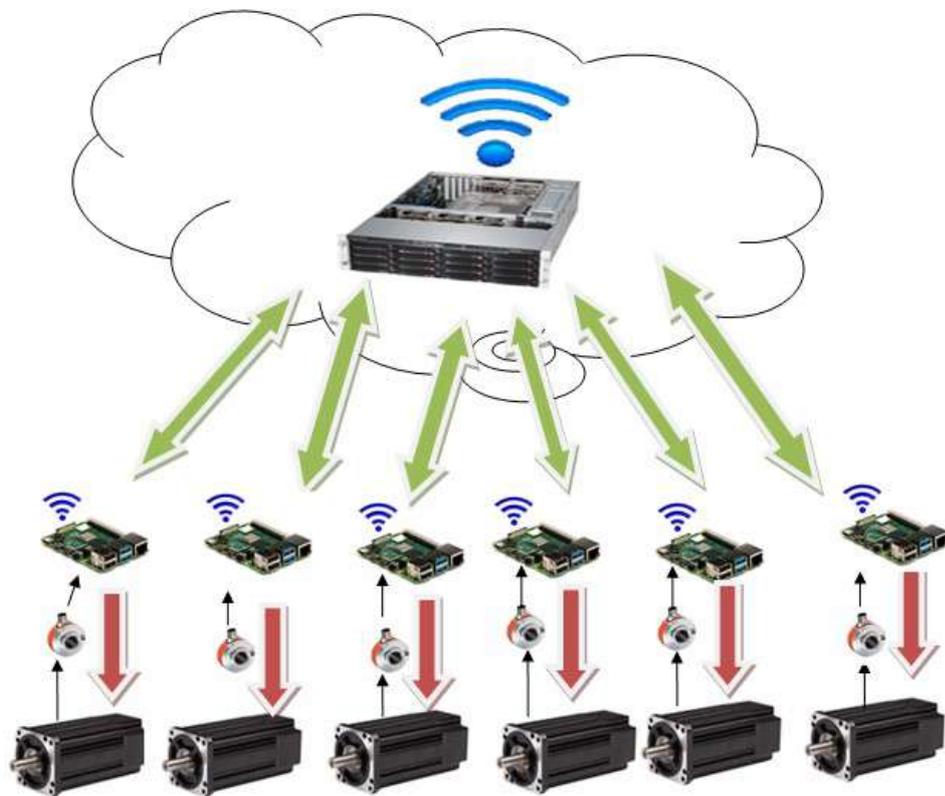


Рисунок 6.6 – Архитектура киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов МПКС

Приведенная архитектура наиболее проста и надежна. Все основные вычисления осуществляются на нижнем уровне (приводе), жестко соединенном с объектом диагностирования. На верхний уровень передается минимальный объем информации, предоставляет возможность избежать задержек и реализовать оптимизацию режима эксплуатации в режиме реального времени. Структура верхнего

уровня (системы приводов) зависит от местоположения приводов МПКС друг относительно друга и может иметь один и несколько серверов, в качестве которых используется облачный сервис или персональный компьютер оператора. Скорость обработки информации будет определяться параметрами используемой аппаратной части. Приведенная структура киберфизической системы может быть масштабируема в зависимости от структуры диагностируемого объекта и реконфигурируема в зависимости от технического состояния отдельных приводов МПКС.

6.5 Синтез алгоритмов функционирования киберфизической системы оценки технического состояния отказоустойчивых машин и механизмов параллельной кинематической структуры

Согласно предложенной архитектуре (см. параграф 6.3) структура киберфизической системы оценки технического состояния отказоустойчивых МПКС включает в себя два уровня обработки информации (см. рисунок 6.6).

Нижний уровень, жестко связанный с единичным приводом и реализующийся в микрокомпьютере, соединенном с датчиками проводной связью, выполняет оценку технического состояния и расчет текущей нагрузки на каждый привод МПКС. В таблице 6.1. приведены этапы реализации нижнего уровня киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов МПКС.

Структура и принцип построения данного уровня зависят исключительно от выбранного типа приводов. Исходными данными для оценки технического состояния являются сигналы тока электроприводов, вибрация корпуса гидронасоса или гидромотора, а также давление в гидравлических линиях. Для оценки текущего состояния электроприводов используется предложенный в диссертационной работе метод, основанный на вейвлет-анализе токового сигнала. Для диагностики гидропривода используется этот же метод, но только для анализа вибрации вращающихся гидравлических машин. Остальные элементы диагностируются известными статопараметрическими методами по параметру давления.

Таблица 6.1 – Этапы реализации нижнего уровня киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов МПКС

Этапы реализации	Тип привода	
	Электрический	Гидравлический
Выбор диагностических параметров	Ток	Вибрация, давление
Оценка текущего технического состояния	Вейвлет-анализ сигналов тока	Вейвлет-анализ вибрации, анализ давления в элементах гидросистемы
Прогнозирование технического состояния	Нейросетевой метод долгосрочного прогнозирования	Нейросетевой метод долгосрочного прогнозирования
Оценка текущего режима нагружения	Нечеткая модель оценки текущего режима нагружения по току	Давление в гидроцилиндре (5.44)

Прогнозирование технического состояния выполняется согласно предложенному методу независимо от типа привода. Текущая нагрузка на электропривод определяется с помощью нечеткой модели оценки нагрузки, в то время как для гидропривода она будет пропорциональна давлению в гидроцилиндрах и рассчитывается по формуле (5.45). Учитывая описанные различия, разработан алгоритм функционирования нижнего уровня (рисунок 6.7) киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов МПКС.

Алгоритм функционирует следующим образом:

1. Снимаются сигналы тока или вибрации и осуществляются их преобразование и анализ, согласно предложенному методу диагностирования. В результате определяется значение коэффициента k аппроксимирующей прямой, при помощи соотношений (4.1) – (4.11). Для гидропривода производится дополнительное измерение давления в каждом гидроцилиндре.
2. Если для одного или нескольких масштабов $k \geq 0$, то на верхний уровень системы передается информация о неисправности привода.
3. Если для всех масштабов $k < 0$, то осуществляется расчет текущей нагрузки на привод согласно модели, представленной в параграфе 5.3. Результаты расчетов передаются на верхний уровень системы.

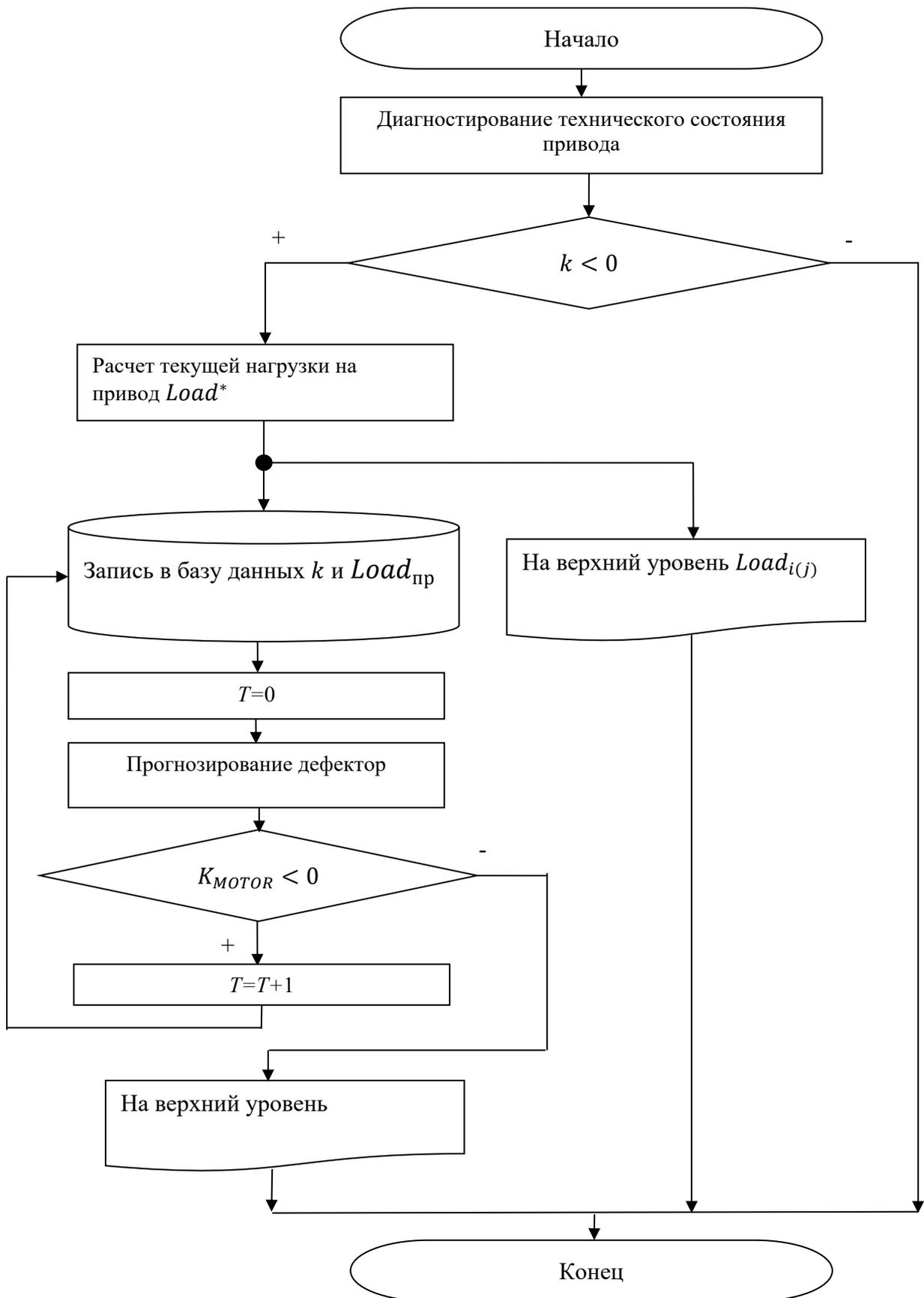


Рисунок 6.7 – Блок-схема алгоритма нижнего уровня обработки информации

4. Значения коэффициента k аппроксимирующей прямой на каждом характерном масштабе записываются в базу данных для последующего формирования обучающей выборки для нейронной сети, реализующей долгосрочное прогнозирование технического состояния приводов МПКС.

5. Выполняется прогнозирование технического состояния согласно (4.12) – (4.20).

6. Если прогнозный коэффициент технического состояния сервопривода $K_{МОТОР} < 0$, то спрогнозированные значения коэффициентов k аппроксимирующей прямой на каждом характерном масштабе добавляются в тестовую выборку и процесс прогнозирования продолжается, пока $K_{МОТОР}$ не станет равным нулю или положительным. В этом случае на верхний уровень передается количество периодов сохранения работоспособности T .

Все вычисления для приводов выполняются параллельно, что предоставляет возможность существенно повысить скорость обработки информации и надежность киберфизической системы. Программные модули нижнего уровня приведены в приложении А.

Информация о текущем состоянии приводов k , T , текущей нагрузке $Load_{пр_i}$, текущем токе $I_{тек}$ или давлении $p_{тек}$, полученная со всех приводов МПКС, поступает в верхний уровень киберфизической системы, структура и принцип построения которого зависит исключительно от кинематической структуры эксплуатируемого механизма (таблица 6.2).

При проектировании отказоустойчивых систем приводов МПКС целесообразно использовать нагрузочное резервирование. При этом основную нагрузку на приводы МПКС с параллельными кинематическими цепями целесообразно выбирать из диапазона 30 – 60 % таким образом, чтобы количеству исполнительных элементов соответствовала меньшая исходная нагрузка на приводы.

В случае МПКС со сходящимися кинематическими цепями первоначальная нагрузка на приводы не должна превышать 50 % от максимальной вне зависимости от числа кинематических цепей в механизме.

Таблица 6.2 – Этапы реализации верхнего уровня киберфизической системы оценки технического состояния систем приводов механизмов

Условия и этапы реализации	с параллельными кинематическими цепями	с последовательными кинематическими цепями
Основная нагрузка на привод, %	30–60	≤ 50
Критерии выбора режима эксплуатации	(5.35)	(5.36)
Определение дополнительной нагрузки на привод	Нечеткая модель расчета дополнительной нагрузки	(5.57)
Принятие решения по выбору режима эксплуатации	Модель оптимизации режима эксплуатации механизмов с параллельными кинематическими цепями (см. параграф 5.5)	Модель оптимизации режима эксплуатации механизмов со сходящимися кинематическими цепями (см. параграф 5.5)

Граничные условия выбора режима эксплуатации для МПКС различной кинематической структуры также отличаются. Механизмы со сходящимися кинематическими цепями имеют большую жесткость, отказ одного из приводов в узле не приведет к изгибу его стоек, поэтому определять критическое количество его исправных приводов n^* нет необходимости. Однако следует контролировать возможность выполнения заданного закона управления выходной платформой МПКС $u(t) = u(t)_{\text{зад}}$, текущий режим нагружения и техническое состояние приводов. Исходя из этого, проверка граничных условий МПКС различной кинематической структуры определяются согласно оптимизационной функции (5.14) или (5.15) соответственно.

Расчет дополнительной нагрузки МПКС с параллельными кинематическими цепями выполняется с помощью разработанной нечеткой модели, в то время как для МПКС со сходящимися цепями достаточно, чтобы привод другой кинематической цепи, приходящей в тот же узел, был исправен, и его нагрузка не превышала 50% от максимально допустимой.

Принятие решения для МПКС различных кинематических структуры выполняется с помощью разных математических моделей, однако результаты их расчета имеют одинаковый физический смысл и интерпретацию. Если $D > 0$, то состояние

приводов предоставляет возможность произвести корректировку режима эксплуатации МПКС, в противном случае комплекс неисправен и необходимо подать сигнал на его отключение. Обобщенный алгоритм работы верхнего уровня киберфизической системы оценки технического состояния систем исполнительных приводов МПКС приведен на рисунке 6.8.

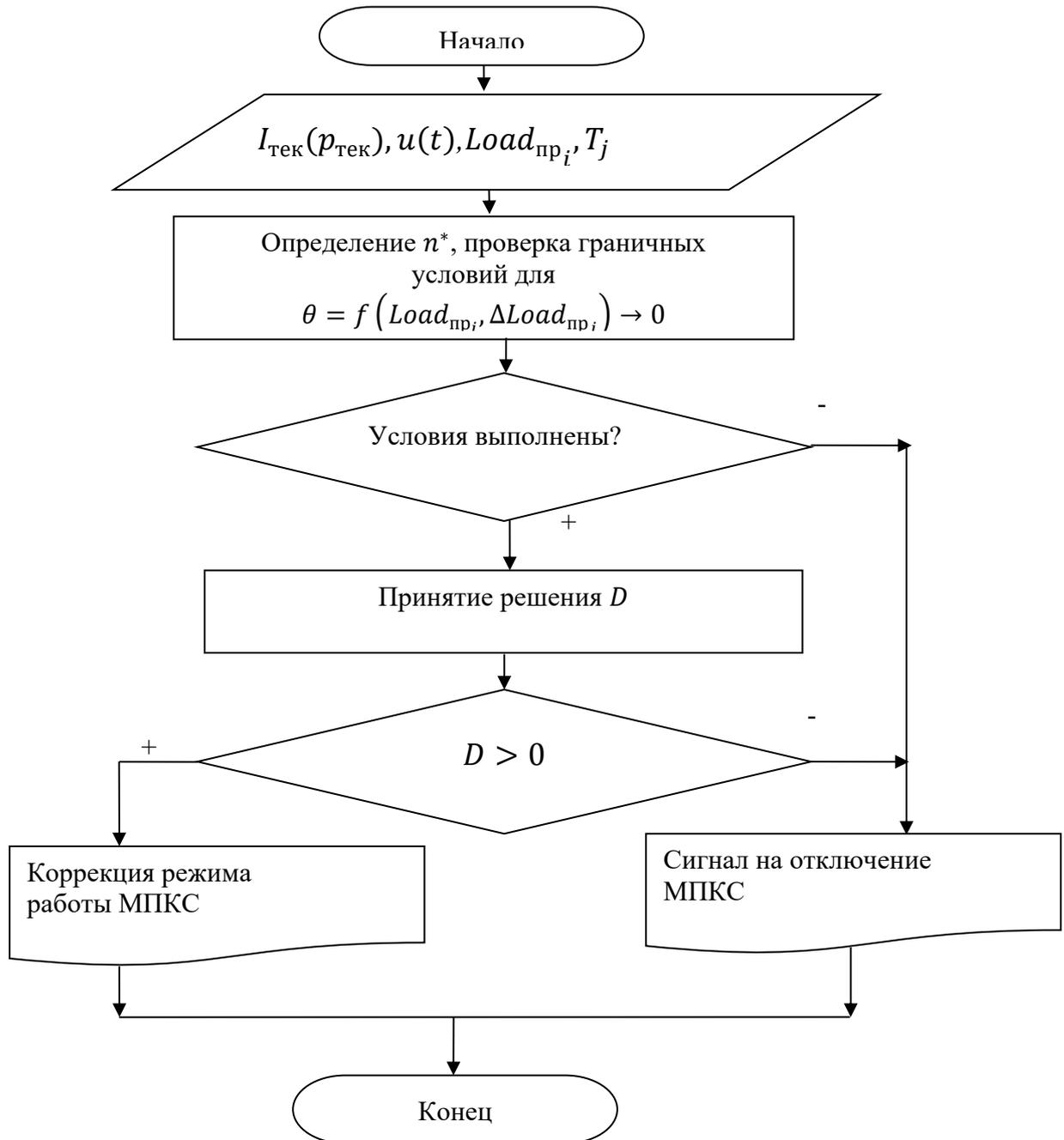


Рисунок 6.8 – Блок-схема алгоритма верхнего уровня обработки информации в киберфизической системе оценки технического состояния приводов МПКС

Все его действия (см. таблицу 6.2) выполняются с помощью ПЭВМ верхнего уровня или облачного сервера, не имеющего непосредственной связи с системой исполнительных приводов. Верхний уровень обработки информации реализует алгоритм принятия решения (см. рисунки 5.37, 5.38) по результатам диагностирования и прогнозирования технического состояния приводов и оптимизации режима эксплуатации отказоустойчивой системы приводов МПКС с учетом ее кинематической структуры. Задачей верхнего уровня обработки информации является выбор режима эксплуатации, который предоставит возможность выполнить заданный технологический процесс без существенной перегрузки исправных приводов МПКС. Временное отключение дефектного привода предоставит возможность осуществить его замену без остановки технологического процесса, обеспечив высокое качество выполнения работ. Программные модули верхнего уровня приведены в приложении А.

6.6 Выводы по главе 6

1. Разработанная структура киберфизической системы оценки технического состояния осуществляет сбор и обработку информации согласно предложенным методам диагностирования и прогнозирования состояния приводов МПКС.
2. Предложенная структура отказоустойчивой системы приводов МПКС предоставляет возможность выбрать допустимый режим эксплуатации на основе результатов диагностирования, прогнозирования и расчета текущей нагрузки, с учетом граничных условий управляемости, надежности и устойчивости механизма.
3. Разработанная структура интеллектуальной системы управления МПКС предоставляет возможность реализовать заданный технологический процесс при частичном отказе в системе приводов
4. Предложена двухуровневая архитектура киберфизической системы оценки технического состояния отказоустойчивых систем приводов МПКС, нижний уровень которой реализует методы оценки технического состояния каждого привода, а верхний – принятие решения по выбору режима дальнейшей эксплуатации МПКС в соответствии с его кинематической структурой.

Глава 7 Экспериментальные исследования моделей и методов оценки технического состояния и синтеза отказоустойчивых приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Целью проведения эксперимента является подтверждение адекватности предложенной методологии оценки технического состояния систем приводов МПКС. Для этого необходимо сравнить результаты анализа токового сигнала исправного и неисправного электроприводов.

При проведении эксперимента необходимо:

- выбрать и изучить технические характеристики объекта диагностирования (паспортные данные сервоприводов МПКС);
- выбрать измерительную аппаратуру и подготовить ее к работе;
- рассчитать характерные частоты диагностирования и масштабы вейвлет-преобразования;
- провести измерения непрерывных параметров для объектов диагностирования;
- по измеренным значениям параметров с помощью предложенного метода оценки технического состояния определить неисправности приводов МПКС;
- оценить результаты диагностирования технического состояния, сделать выводы о целесообразности применения предлагаемого метода;
- с помощью предложенного метода прогнозирования выполнить прогноз развития дефектов в приводе МПКС;
- выполнить исследование надежности системы приводов МПКС при отключении одного из приводов;
- произвести исследование отказоустойчивого МПКС с учетом технического состояния исполнительных приводов.

7.1 Исследование метода оценки технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Экспериментальные исследования выполнены на базе ООО «ДомЮг», г. Ростов-на-Дону. Экспериментальный стенд (рисунок 7.1) состоит из четырех электро-механических домкратов с установленной на них наборной деревянной платформой.

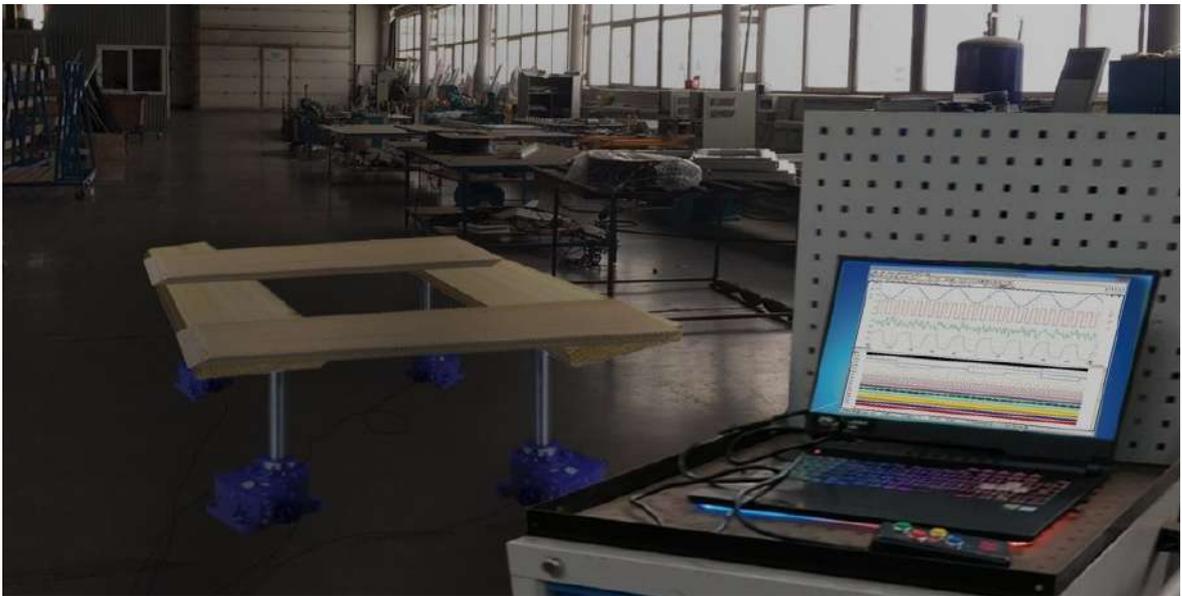


Рисунок 7.1 – Испытательный стенд для производственного эксперимента

Для проведения исследований данный стенд был приведен в движение со скоростью 1 см/мин, произведено измерение токовых сигналов электроприводов. На электро-механических домкратах МПКС установлено четыре одинаковых привода постоянного тока типа KY110AS0415-15B (таблица 7.1).

Сервопривод KY110AS0415-15B имеет полый ротор, усиленные подшипники, систему электронной коммутации. В основе его работы лежит синхронный принцип действия (синхронное изменение ЭДС и скорости). Ротор выполнен из постоянного магнита и закреплен на двух концевых валах. Статор состоит из корпуса, изготовленного из стали или алюминия, и трехфазной обмотки привода, соединен-

ной в «звезду». Поскольку ротор — это активный элемент, то магнит всегда стремится занять своё положение по линии магнитного поля, т. е. вращение ротора обеспечивается переключением линии магнитного поля.

Таблица 7.1 – Технические характеристики сервопривода KY110AS0415-15B

Параметры и характеристики	Численные значения
Номинальное напряжение, В	48
Номинальный ток, А	37,5
Пусковой ток, А	46.4
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Максимальная частота вращения, об/мин	3100
Номинальный момент, Н м	9.5
Максимальный момент, Н м	28
Механическая постоянная времени, мс	2,7
Сопротивление якоря, Ом	0,02
Момент инерции ротора, кг·м ² ·10 ⁻⁶	1070
Электрическая постоянная времени, мс	1,8
Перегрузочная способность по току	3,5
Масса, кг	12

Измерение тока осуществляется с помощью датчика *LF2005-S*, основанного на эффекте Холла. Принцип действия эффекта Холла для измерения тока заключается в том, что под действием измеряемого тока возникает магнитное поле, затем с помощью датчика Холла осуществляется выработка соответствующего напряжения, которое усиливается и подается на выходную обмотку датчика для последующего его анализа. Измерения питающего тока и запись данных в компьютер осуществляются с помощью *USB* осциллографа *Pico Scope 3425*.

Компьютерные осциллографы фирмы *Pico Technology* укомплектованы универсальным программным обеспечением *Pico Scope 6*, которое устанавливается на персональный компьютер с операционной системой *Windows* [302].

Осциллограф имеет четыре измерительных канала. Выходной измеряемой величиной является напряжение, которое может быть переведено в ток с помощью соотношения $10 \text{ A} = 1 \text{ В}$. Основные дефекты сервоприводов постоянного тока и их характерные частоты Фурье – преобразования приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Настройки осциллографа *Pico Scope 6* для измерения токового сигнала сервопривода KY110AS0415-15B

Измеряемый параметр	Диапазон измерения
Настройка канала А	± 14 В
Настройка канала В	± 14 В
Настройка канала С	± 14 В
Настройка канала D	± 14 В
Частота измерений	667 мс
Частота выборки	1,4999 кВ/с

Номинальный ток диагностируемых сервоприводов – 37,5 А, перегрузочная способность по току – 3,5. Следовательно, максимальный ток – 131,25 А. Тогда выходное напряжение на каждом канале – 14В (см. таблицу 7.2). При данной настройке программного обеспечения, компьютера – осциллографа *Pico Scope 6*, за период изменения 10 с. число точек сигнала составит 14999.

Диагностирование сервоприводов осуществляется по параметру тока, который снимается с датчика Холла и подается на вход измерительных каналов осциллографа *Pico Scope 3425*, подключенного к персональному компьютеру посредством *USB*. Для анализа технического состояния сервопривода необходимо вычислить характерные частоты Фурье-анализа согласно таблице 4.2 и произвести их перевод в масштаб вейвлета по формуле (4.2) (см. таблицу 7.3).

Экспериментальные исследования проведены на четырех одинаковых сервоприводах типа KY110AS0415-15B при частоте вращения 5 об/с. Годы выпуска моторов – 2008, 2010, 2015 и 2017. Для каждого привода произведено измерение тока и выполнен анализ на всех характерных масштабах. Пример замера токового сигнала представлен на рисунке 7.2. Произведен расчет коэффициентов вейвлет-преобразования на каждом характерном масштабе. Осуществлен расчет огибающих коэффициентов вейвлет – преобразования и построены аппроксимирующие прямые.

Для всех характерных масштабов получены коэффициенты аппроксимирующих прямых огибающих. Анализ коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие (таблица 7.4) показывает, что все диагностируемые сервоприводы исправны, так как коэффициенты k на всех характерных масштабах отрицательны.

Таблица 7.3 - Характерные масштабы вейвлета для сервопривода KY110AS0415-15B

Неисправности сервопривода	Частота токового сигнала, Гц	Масштаб вейвлет - преобразования
Дефекты коммутации	29	56
	33	49
	37	44
Дефекты ротора	125	13
	150	11
	175	9
	100	16
Пульсация напряжения питания	50	32
	100	16
	150	11
Дефекты статора	12.5	135
	8.33	203
	6.25	271
Неисправности подшипников качения	580	3
	870	2
	10	162.5

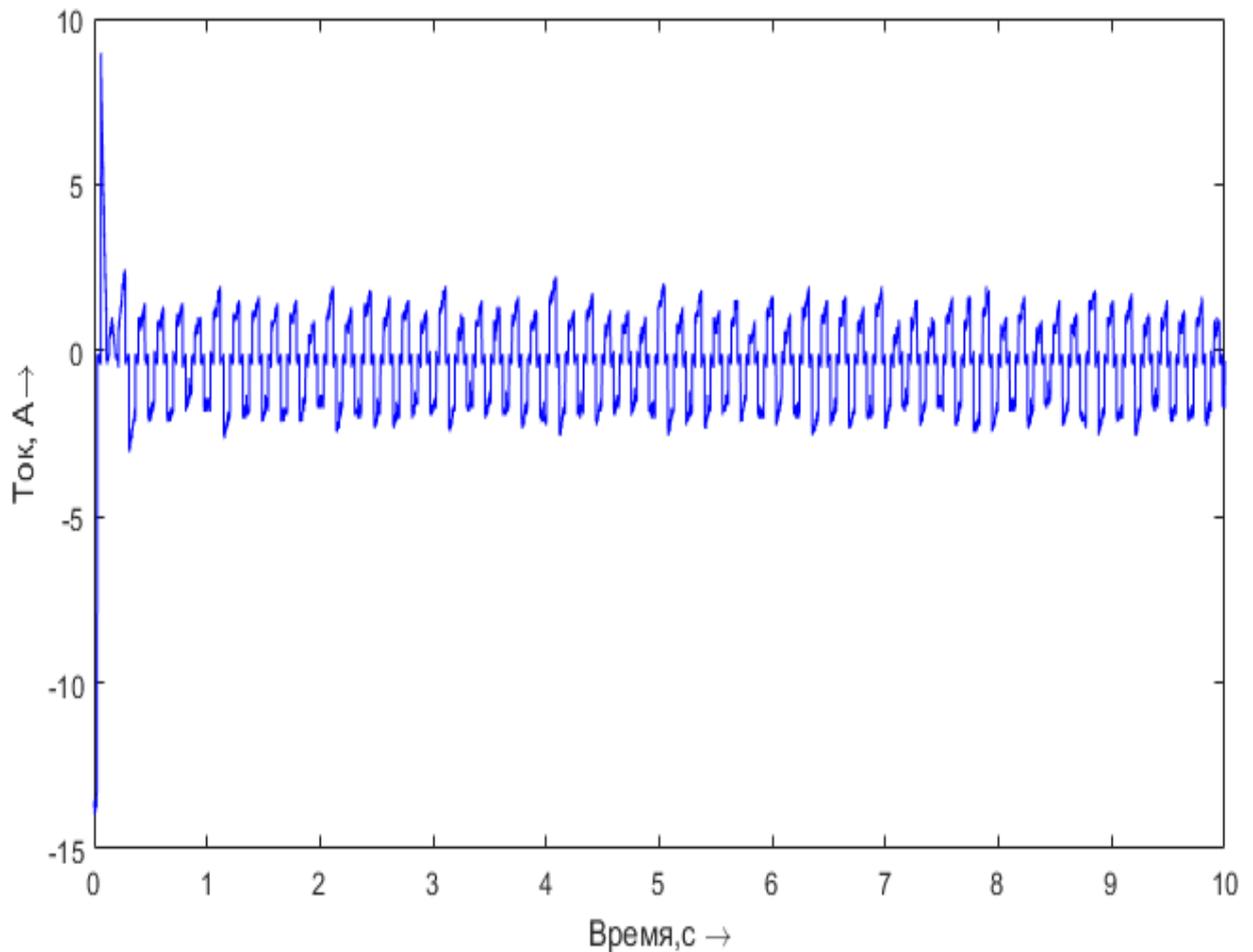


Рисунок 7.2 – Токковый сигнал сервопривода KY110AS0415-15B

Таблица 7.4 – Результаты диагностирования сервоприводов на испытательном стенде

Неисправность привода	Масштаб вейвлета	Привод КУ110AS0415-15В-Д2-2008		Привод КУ110AS0415-15В-Д2-2010		Привод КУ110AS0415-15В-Д2-2015		Привод КУ110AS0415-15В-Д2-2017	
		<i>k</i>	<i>b</i>	<i>k</i>	<i>b</i>	<i>k</i>	<i>b</i>	<i>k</i>	<i>b</i>
Дефекты коммутации	56	-11,13	12,28	-15,13	52,28	-21,13	63,28	-13,13	56,25
	49	-16,07	43,93	-46,05	35,93	-46,46	33,93	-36,57	73,83
	44	-14,45	52,83	-45,45	82,84	-34,45	78,83	-38,45	52,83
Дефекты ротора	13	-18,03	73,43	-18,03	73,43	-18,03	73,43	-18,03	73,43
	11	-91,56	23,28	-51,36	53,28	-86,676	23,28	-91,56	23,28
	9	-26,15	63,49	-26,15	45,49	-86,15	43,85	-17,75	38,9
	16	-19,44	92,12	-39,46	42,54	-36,24	56,12	-45,44	76,16
Пульсация напряжения питания	32	-46,05	23,94	-96,05	23,94	-96,55	56,54	-66,45	73,94
	16	-76,14	29,24	-36,65	79,18	-73,14	65,23	-65,13	65,24
	11	-35,75	48,31	-45,1	8,35	-24,07	17,385	-21,87	48,35
Дефекты статора	135	-9,14	72,28	-19,14	72,28	-7,8	38,28	-49,14	45,28
	203	-36,07	83,93	-56,07	73,45	-45,87	76,93	-43,57	33,93
	271	-19,54	57,3	-39,54	56,3	-23,78	52,37	-59,47	42,45
Неисправности подшипников	3	-24,654	36,96	-34,78	36,96	-24,654	36,96	-25,45	36,96
	2	-24,466	23,35	-25,98	67,28	-24,466	54,88	-34,78	23,28
	162.5	-1.34,35	45,47	-94,35	56,46	-134,35	65,63	-98,45	85,93

Пример графической интерпретации результатов расчета, приведенный на рисунке 7.3, показывает, что колебания значений вейвлет-коэффициентов затухающие, что свидетельствует об отсутствии неисправности на выбранном масштабе.

Для поиска неисправностей с помощью предлагаемого метода оценки текущего технического состояния в обмотку статора привода КУ110AS0415-15В-Д2-2010 введено сопротивление 15 Ом, что имитирует «Неисправность статора».

Для выбранного привода выполнен замер тока и рассчитаны вейвлет-коэффициенты для каждого характерного масштаба, построены их огибающие и найдены коэффициенты аппроксимирующих прямых. В результате анализа полученных характе-

ристик (см. таблицу 7.5) установлено, что аппроксимирующие прямые на всех характерных масштабах, кроме «Дефектов статора» являются нисходящими и имеют $k < 0$, что свидетельствует об отсутствии данных неисправностей.

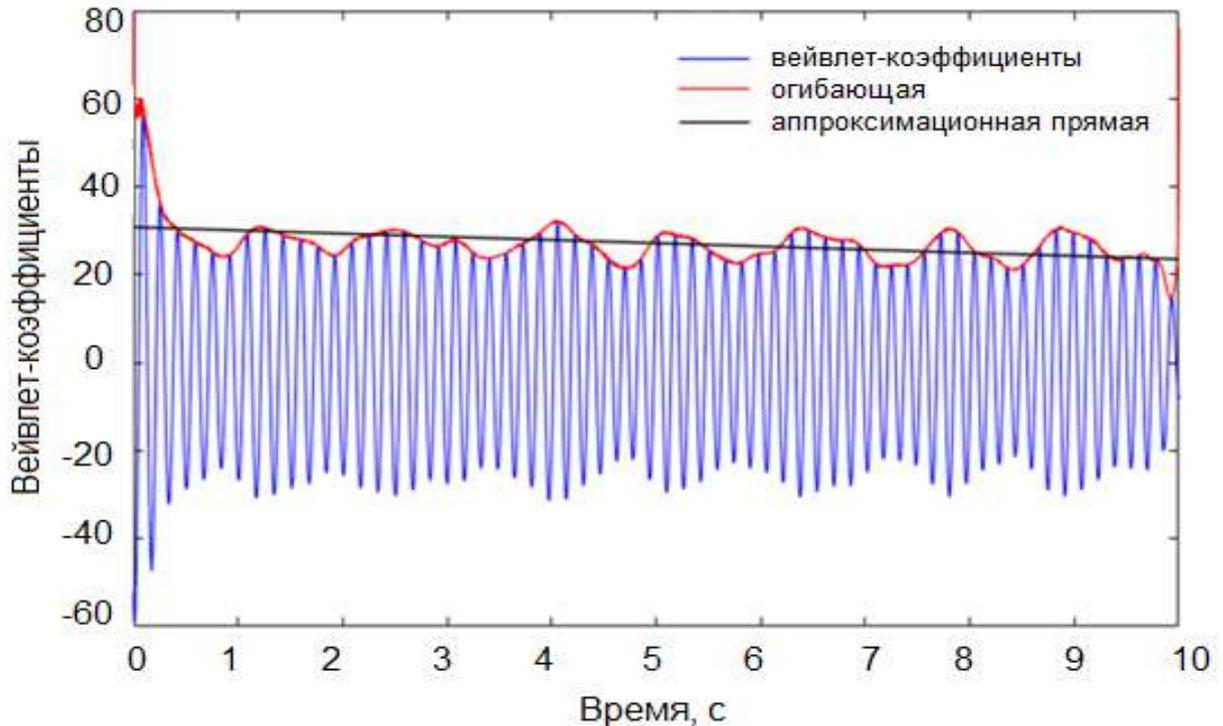


Рисунок 7.3 – Результат построения прямой, аппроксимирующей огибающую значений вейвлет-коэффициентов сервопривода KY110AS0415-15B

Однако для неисправности «Дефекты статора» (масштабы 135, 203, 271) $k > 0$, что свидетельствует о наличии данной неисправности. Графическая интерпретация прямой, аппроксимирующей огибающую неисправного привода на масштабе, характерном для неисправности статора (рисунок 7.4) показывает, что амплитуда вейвлет-коэффициентов увеличивается во времени, а прямая, аппроксимирующая огибающую, восходящая. Полученный анализ показывает работоспособность и эффективность предложенного метода диагностирования для оценки текущего технического состояния и поиска неисправностей.

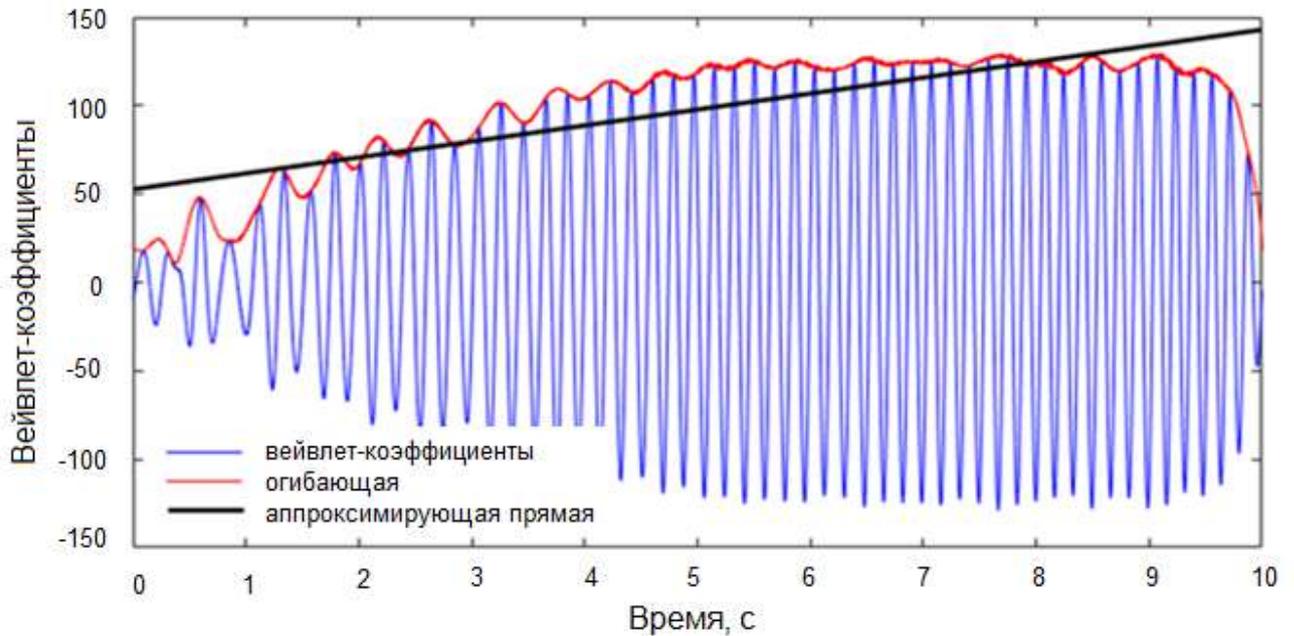


Рисунок 7.4 – Пример прямой, аппроксимирующей огибающую значений вейвлет-коэффициентов сервопривода КУ110АС0415-15В-Д2-2010 на масштабах, характерных для неисправностей статора

Таблица 7.5 – Результат диагностирования сервопривода КУ110АС0415-15В-Д2-2010 с сопротивлением в фазе обмотки статора

Неисправность сервопривода	Масштаб вейвлета	Привод КУ110АС0415 -15В- Д2-2010	
		k	b
Дефекты коммутации	56	-5,13	47,28
	49	-36,05	15,93
	44	-25,45	42,84
Дефекты ротора	13	-8,03	33,43
	11	-31,56	23,28
	9	-16,15	53,49
	16	-13,56	31,54
Пульсация напряжения питания	32	-16,05	13,65
	16	-21,58	34,78
	11	-35,41	28,64
Дефекты статора	135	8,564	32,68
	203	46,07	83,65
	271	29,54	56,5
Неисправности подшипников	3	-24,78	26,41
	2	-15,43	37,28
	162.5	-42,32	65,56

Прогнозирование технического состояния сервопривода KY110AS0415-15B-D2-2000 выполнено по результатам измерения сигнала питающего тока, предоставленного ООО «ДомЮг», г. Ростов-на-Дону. Данный привод 2000 года выпуска был установлен на электромеханическом домкрате.

Измерения осуществлялись ежегодно с января 2008 по январь 2015 года. Полученные данные обработаны с помощью метода диагностирования и найдены коэффициенты прямых, аппроксимирующих огибающие для каждого масштаба. В таблице 7.6 приведены результаты диагностирования сервопривода KY110AS0415-15B-D2-2000 по годам.

Таблица 7.6. – Результаты диагностирования технического состояния сервопривода постоянного тока KY110AS0415-15B-D2-2000 по годам

Неисправность сервопривода	Масштаб вейвлета	Значения коэффициента k аппроксимирующей прямой огибающей вейвлет-коэффициентов по годам							
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Дефекты коммутации	56	-31,13	-28,28	-25,13	-23,28	-21,13	-20,13	-19,17	-18,57
	49	-32,2	-27,25	-24,1	-25,3	-23,56	-20,28	-19,13	-17,25
	44	-31,86	-29,2	-23,45	-24,67	-22,67	-21,33	-18,86	-16,97
Дефекты ротора	13	-18,03	-15,43	-13,03	-12,43	-11,03	-19,43	-20,09	-17,87
	11	-19,43	-18,53	-17,43	-16,75	-15,23	-10,43	-9,83	-9,43
	9	-17,93	-16,24	-15,65	-14,24	-13,35	-14,1	-13,93	-12,36
	16	-20,43	-18,33	-17,63	-16,35	-15,03	-12,23	-11,33	-10,98
Пульсация напряжения питания	32	-46,05	-45,8	-44,05	-43,94	-42,55	-14,23	-13,93	-13,13
	16	-48,65	-47,3	-47,05	-46,13	-45,95	-41,54	-39,45	-38,94
	11	-45,13	-44,4	-43,64	-42,46	-41,65	-44,17	-43,15	-41,94
Дефекты статора	135	-19,14	-18,28	-17,14	-16,28	-15,8	-40,96	-40,35	-39,64
	203	-16,07	-13,54	-13,07	-12,45	-10,87	-14,28	-12,14	-11,28
	271	-19,54	-17,3	-16,54	-16,3	-13,78	-9,93	-8,57	-7,93
Неисправности подшипников	3	-25,4	-20,28	-18,9	-15,17	-13,8	-15,37	-14,47	-13,95
	2	-23,1	-17,1	-17,9	-14,57	-12,18	-9,25	-2,06	-0,1
	162.5	-28,5	-21,4	-19,1	-16,05	-14,24	-10,5	-3,12	-0,14

По полученным данным следует, что в январе 2015 года сервопривод KY110AS0415-15B-D2-2000 находился в пограничном состоянии, а его коэффициенты k для «Неисправности подшипников» близки к 0. Согласно записи в журнале технического обслуживания данный привод вышел из строя 27 февраля 2015 года.

Причина отказа – «Неисправность подшипников», что подтверждает работоспособность и высокую точность предложенного метода диагностирования.

Целью прогнозирования является определение времени и причины выхода из строя сервопривода KY110AS0415-15B-Д2-2000. Исходными данными для прогнозирования технического состояния сервопривода являются сведения за первые 5 лет эксплуатации (см. таблицу 7.6, 2008–2012 гг.). Для каждого масштаба формируется входной вектор P и вектор цели H , которые подставляются в иерархическую нейронную сеть долгосрочного прогнозирования. Из приведенных результатов (таблица 7.7) следует, что отказ сервопривода должен был наступить в период между 2014 и 2015 годами.

Таблица 7.7 – Результаты прогнозирования технического состояния сервопривода постоянного тока KY110AS0415-15B-Д2-2000 по годам

Неисправность сервопривода	Масштаб вейвлета	Результаты прогнозирования по годам				
		2013	2014	2015	2016	2017
Дефекты коммутации	56	-20,34	-19,85	-17,38	-16,75	-15,42
	49	-22,18	-19,26	-17,37	-16,12	-15,75
	44	-19,96	-20,41	-17,37	-16,96	-14,78
Дефекты ротора	13	-9,96	-9,03	-7,13	-7,05	-6,45
	11	-13,16	-13,23	-10,56	-9,47	-8,98
	9	-12,63	-12,13	-11,07	-12,54	-12,08
	16	-14,24	-12,43	-12,02	-10,78	-9,48
Пульсация напряжения питания	32	-40,9	-38,15	-37,14	-36,85	-35,72
	16	-44,6	-42,45	-40,24	-39,27	-37,98
	11	-39,26	-41,15	-40,24	-39,67	-38,46
Дефекты статора	135	-14,78	-13,04	-10,78	-9,42	-9,08
	203	-10,63	-9,05	-6,93	-8,78	-7,68
	271	-14,34	-13,87	-11,25	-10,2	-9,45
Неисправности подшипников	3	-8,27	-2,25	0,08	4,37	6,82
	2	-9,95	-2,96	1,14	2,47	5,79
	162.5	-9,34	-0,18	1,48	3,45	4,78

Для оценки точности прогнозирования необходимо выполнить расчет погрешности прогнозирования. Расчет выполнен на основе данных диагностирования (см. таблицу 7.6) и прогноза (см. таблица 7.7) следующим образом:

$$\Delta k = (k_{\text{прогноз}} - k_{\text{диаг}}) \cdot k_{\text{диаг}}^{-1} \cdot 100\%.$$

По результатам расчета погрешности прогнозирования (см. рисунок 7.5) можно сделать вывод, что с увеличением срока происходит рост средней погрешности прогнозирования.

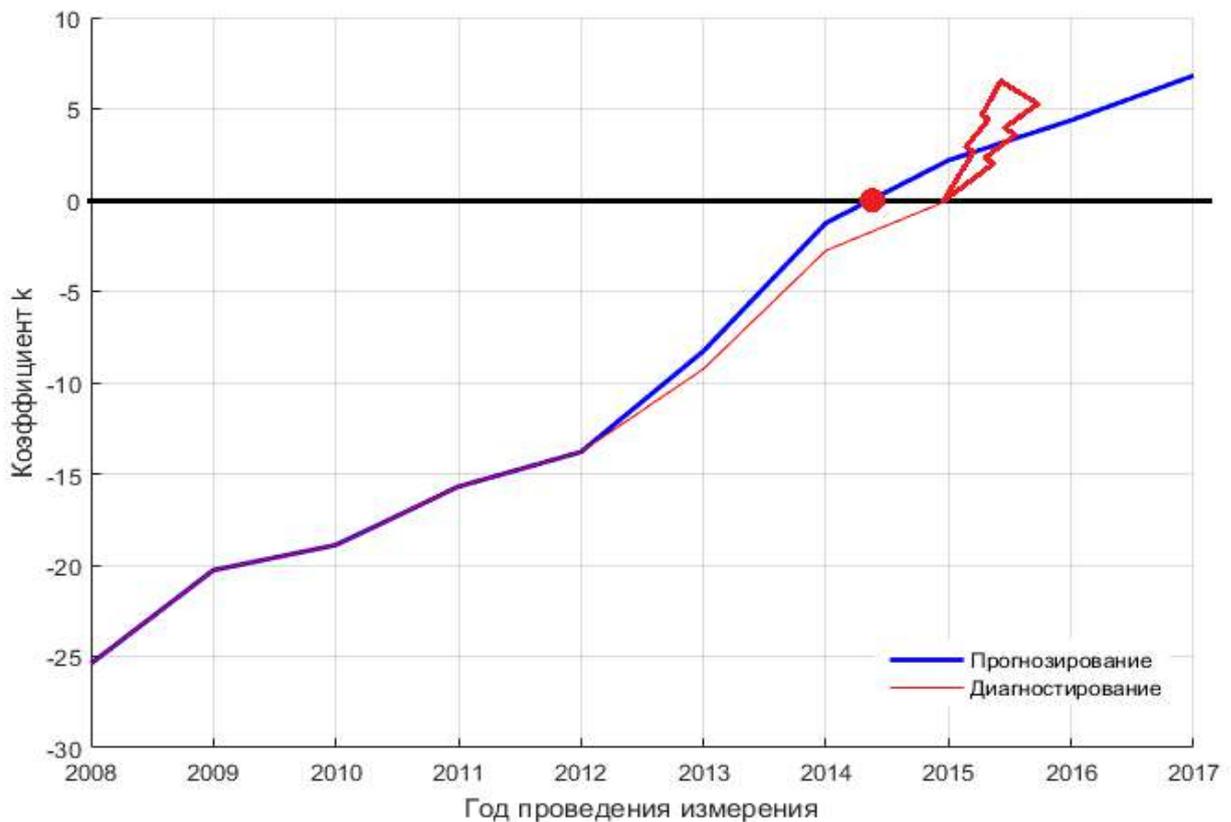


Рисунок 7.5 – Сравнительный анализ результатов диагностирования и прогнозирования технического состояния сервопривода

Краткосрочный прогноз имеет погрешность 1,7 %. С увеличением числа итераций происходит рост погрешности с 2,2 % на втором периоде до 9,3 % на третьем периоде эксплуатации. В целом погрешность долгосрочного прогнозирования не превысила 10 %, что свидетельствует о достаточной точности предложенных модели и метода. Сравнительный анализ результатов диагностирования и прогнозирования, приведенный на рисунке 7.5, показал, что отказ привода по прогнозу произойдет раньше, чем по факту, что предоставляет возможность не допустить внезапного отказа оборудова-

ния. Для повышения точности прогнозирования необходимо увеличить объем обучающей выборки, а также добавить в нее текущие значения диагностических параметров.

7.2 Исследование метода синтеза отказоустойчивых систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Экспериментальные исследования метода синтеза отказоустойчивых систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры, объединяющего модели расчета текущей и дополнительной нагрузок, а также принятия решения при выборе режима эксплуатации МПКС по результатам диагностирования и прогнозирования технического состояния его сервоприводов, выполнены на стенде, представленном на рисунке 7.1, и включающем четыре сервопривода типа KY110AS0415-15B 2008, 2010, 2015 и 2017 годов выпуска.

Экспериментальная установка была приведена в движение с линейной скоростью 1 см/мин, произведен замер токового сигнала с помощью осциллографа *Pico Scope* 3425 (см. таблицу 7.2) и выполнено диагностирование сервоприводов с помощью предложенного метода. Результаты расчета коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие вейвлет-коэффициентов, приведены в таблице 7.4.

Для анализа текущей нагрузки необходимо произвести измерения тока, питающего сервоприводы, и выполнить расчет вейвлет-коэффициентов на характерных масштабах для заведомо исправного ненагруженного сервопривода. В текущем эксперименте такими данными являются результаты замера питающего тока сервоприводов без установленной деревянной платформы.

Полученные данные используются в качестве эталонных k_0, b_0 для их сравнения с текущими (см. таблицу 6.2) значениями измеряемых параметров k, b .

Согласно паспортным данным перегрузочная способность сервопривода по току – $K_T = 3,5$. Следовательно, коэффициенты аппроксимирующей прямой огибающей, соответствующие максимальному (предельному) режиму, будут определяться по формулам

$$k_{max} = 3,5 \cdot k_0; \quad b_{max} = 3,5 \cdot b_0.$$

В исправном состоянии коэффициенты аппроксимирующей прямой должны находиться в следующем диапазоне:

$$k_{max} \leq k \leq k_0; \quad b_{max} \leq b \leq b_0.$$

В случае выхода значений коэффициентов за указанные пределы необходимо срочно прекратить эксплуатацию привода. Относительные коэффициенты, показывающие нагрузку на привод, могут быть найдены следующим образом:

$$\Delta k = (k - k_0) \cdot (k_0(K_T - 1))^{-1} = (k - k_0) \cdot (2,5 \cdot k_0)^{-1} = 0,4(k - k_0) \cdot k_0^{-1};$$

$$\Delta b = (b - b_0) \cdot (b_0(K_T - 1))^{-1} = (b - b_0) \cdot (2,5 \cdot b_0)^{-1} = 0,4(b - b_0) \cdot b_0^{-1}.$$

Для каждого масштаба вейвлета произведен расчет коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие, которые подставлены в модель расчета нагрузки (см. параграф 5.3), приведенные в таблице 7.8.

Таблица 7.8 – Результаты расчета текущей нагрузки на сервопривод

Неисправность сервопривода	Масштаб вейвлета	Текущая нагрузка на сервоприводы			
		Привод КУ1 10AS0415-15В-Д1-2008	Привод КУ110AS0415-15В-Д2-2010	Привод КУ1 10AS0415-15В-Д3-2015	Привод КУ1 10AS0415-15В-Д4-2017
Дефекты коммутации	56	0,29	0,292	0,30	0,301
	49	0,301	0,29	0,292	0,30
	44	0,289	0,291	0,295	0,301
Дефекты ротора	13	0,29	0,292	0,30	0,301
	11	0,301	0,29	0,292	0,30
	9	0,289	0,291	0,295	0,301
	16	0,29	0,292	0,30	0,301
Пульсация напряжения питания	32	0,301	0,29	0,292	0,30
	16	0,289	0,291	0,295	0,301
	11	0,29	0,292	0,330	0,301
Дефекты статора	135	0,301	0,29	0,292	0,30
	203	0,289	0,291	0,295	0,301
	271	0,29	0,292	0,30	0,301
Неисправности подшипников	3	0,301	0,29	0,292	0,30
	2	0,289	0,291	0,295	0,301
	162,5	0,29	0,292	0,30	0,301
Средняя текущая нагрузка на привод		0,2931	0,2911	0,2959	0,3007

В результате расчета получено, что средняя нагрузка на привод примерно одинаковая и составляет 0,2952 (29,52 %) от максимальной.

Для приведенного МПКС были проверены граничные условия оптимизационной функции (5.25). Установлено, что все параметры находятся в допустимых пределах, поэтому необходимо рассчитать текущую и дополнительную нагрузки на приводы МПКС согласно алгоритму принятия решения (см. рисунок 5.31).

Проверка работоспособности моделей расчета изменения нагрузки и принятия решения по оптимизации режима эксплуатации сервоприводами выполнялась при отключенном приводе домкрата КУ110AS0415-15В-Д2-2010.

Цель эксперимента – исследование поведения системы при перераспределении нагрузки на соседние приводы МПКС.

На рисунке 7.6 представлена схема расположения приводов МПКС.

Согласно изложенной выше теории нагрузка с неисправного привода 2 должна быть равномерно перераспределена на два соседних привода 1 и 3, а нагрузка на привод 4 остается неизменной и составляет 0,2952. Нагрузка на приводы 1 и 3 после перераспределения составит:

$$Load_{пр_{1,3}} = Load_{пр} + \Delta Load_{пр_{1,3}} = 0,2952 + 0,5 \cdot 0,2952 = 0,4428 \text{ или } 44,28\%.$$

Исходя из нагрузочной диаграммы (см. рисунок 5.18), данная нагрузка безопасна для привода.

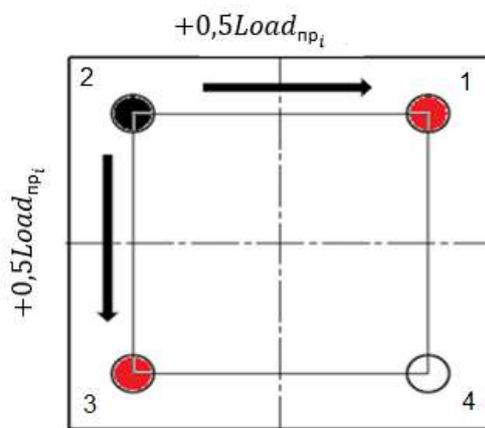


Рисунок 7.6 – Расположение неисправного привода и возможный вариант коррекции МПКС

Согласно алгоритму принятия решения по выбору режима эксплуатации сервоприводов МПКС (см. рисунок 5.31) необходимо определить минимальный прогнозный срок их исправной работы. Для этого нужно оценить текущие значения коэффициентов k прямых, аппроксимирующих огибающие. Из таблицы 7.4 следует, что все они отрицательные и их абсолютное значение значительно больше 0, что свидетельствует о достаточном запасе надежности. Из сравнения данных коэффициентов в таблицах 7.4, 7.6 для сервоприводов одинаковой модели следует, что минимальный прогнозный срок исправной работы приводов более 12 месяцев. Таким образом, зная среднюю нагрузку на приводы подъемных домкратов, максимальное приращение нагрузки на сервоприводы и минимальный прогнозный срок исправной работы группы приводов, можно воспользоваться моделью принятия решения при оптимизации режима эксплуатации МПКС по результатам оценки технического состояния его сервоприводов (см. параграф 5.5).

Результатом моделирования является возможность принятия решения о дальнейшем режиме эксплуатации приводов D , изменяющимся в диапазоне $[-1,1]$. Если $D = -1$, – эксплуатацию группы приводов необходимо прекратить; $D = 0$ – продолжать эксплуатацию в текущем режиме; $D = 1$ – нагрузку на приводы группы можно увеличить на расчетное значение $\Delta Load_{max} = \Delta Load_{пр1,3}$.

Согласно модели принятия решения, если средняя текущая нагрузка на каждый привод составляет 0,2952, необходимое приращение на два привода – 0,1476, а минимальный прогнозный срок исправной работы – 12 месяцев, то текущая нагрузка на первый и третий приводы может быть увеличена на $\Delta Load_{пр1,3} = 0,1476$ без ущерба для исправных приводов, о чем свидетельствует коэффициент принятого решения $D = 0,74$. Следующим этапом эксперимента является исследование влияния перераспределения нагрузки на техническое состояние трех эксплуатируемых сервоприводов. Для этого изучается влияние нагрузки на приводы путем исследования графиков тока (рисунок 7.7), моментов (рисунок 7.8), частоты вращения сервопривода (рисунок 7.9), а также механической (рисунок 7.10), электроме-

ханической (рисунок 7.11) и нагрузочной (рисунок 7.12) характеристик при различных условиях нагружения.

Из анализа графиков, приведенных на рисунках 7.9 – 7.12, следует, что при всех рассчитанных режимах нагружения при пуске привода имеются колебания тока, момента и частоты вращения, однако через 15 с (0,25 минуты) данные колебания стабилизируются и система входит в устойчивый режим работы. Амплитудные значения параметров находятся в допустимых пределах и не могут оказать существенного влияния на техническое состояние диагностируемого сервопривода.

Механические (см. рисунок 7.11) и электромеханические (см. рисунок 7.12) характеристики также показывают, что все три выбранные режима эксплуатации являются допустимыми для исследуемого сервопривода. Нагрузочные характеристики (рисунок 7.13) также показывают, что выбранные режимы эксплуатации не приводят к динамическим перегрузкам сервоприводов, так как момент сервопривода существенно ниже критического, а, следовательно, не приведут к его преждевременному отказу. Это предоставит возможность обеспечить надежное функционирование МПКС в период проведения ремонтных работ.

Для оценки надежности исследуемого стенда с нагрузочным резервированием выполнен расчет ВБР экспериментального стенда (рисунок 7.13).

Рассмотрены три варианта нагружения: система с четырьмя приводами имеет нагрузку 100 % на каждый привод без возможности резервирования; исследуемый стенд со средней нагрузкой 29,52 %, а также при отключении одного из приводов и перераспределении нагрузки на два соседних привода (по 44,28 %). Из приведенных графиков (см. рисунок 7.14) следует, что ВБР системы с пониженной нагрузкой существенно выше, чем при полной нагрузке без возможности резервирования. Перераспределение нагрузки приводит к снижению ВБР, однако она выше по сравнению с исправной нерезервируемой системой.

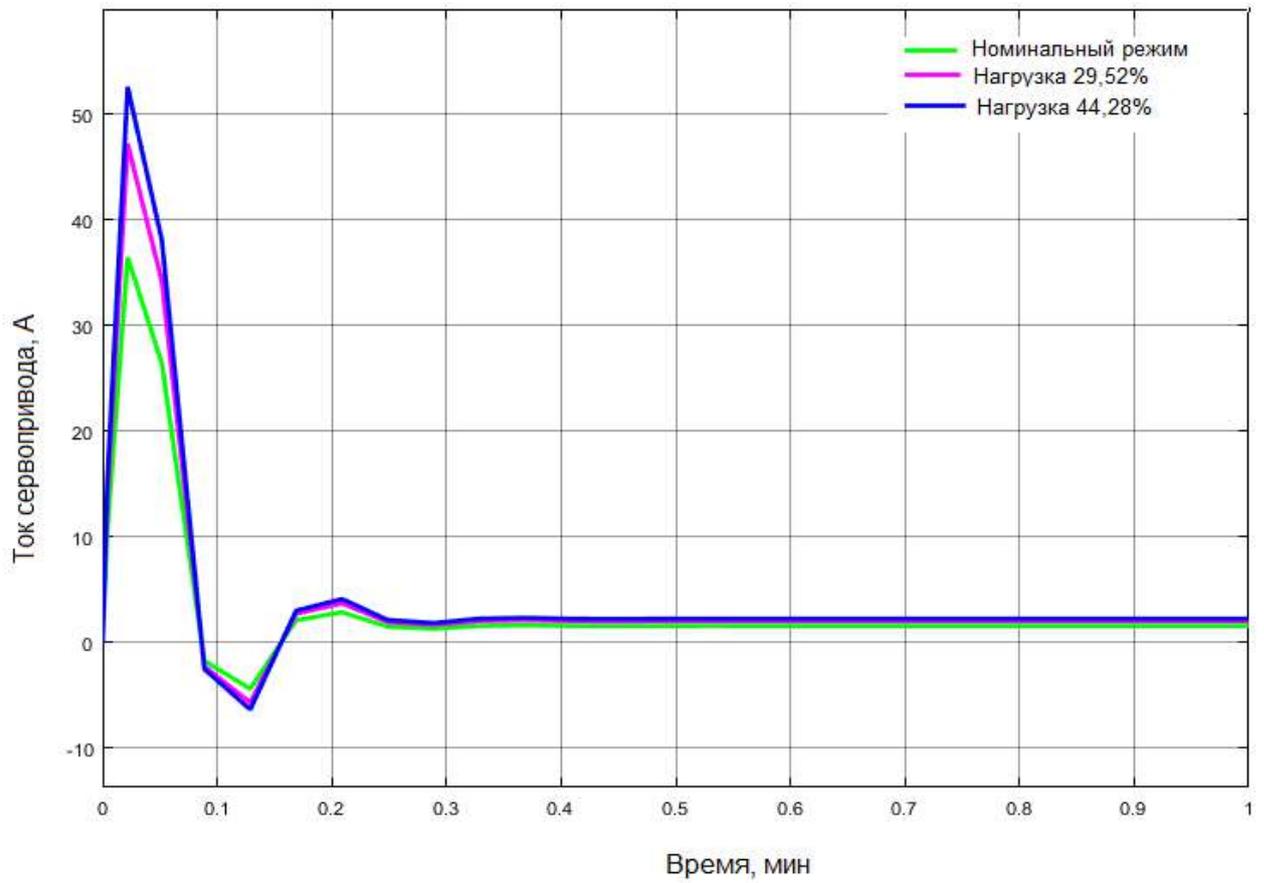


Рисунок 7.7 – График тока сервоприводов при различных условиях нагружения

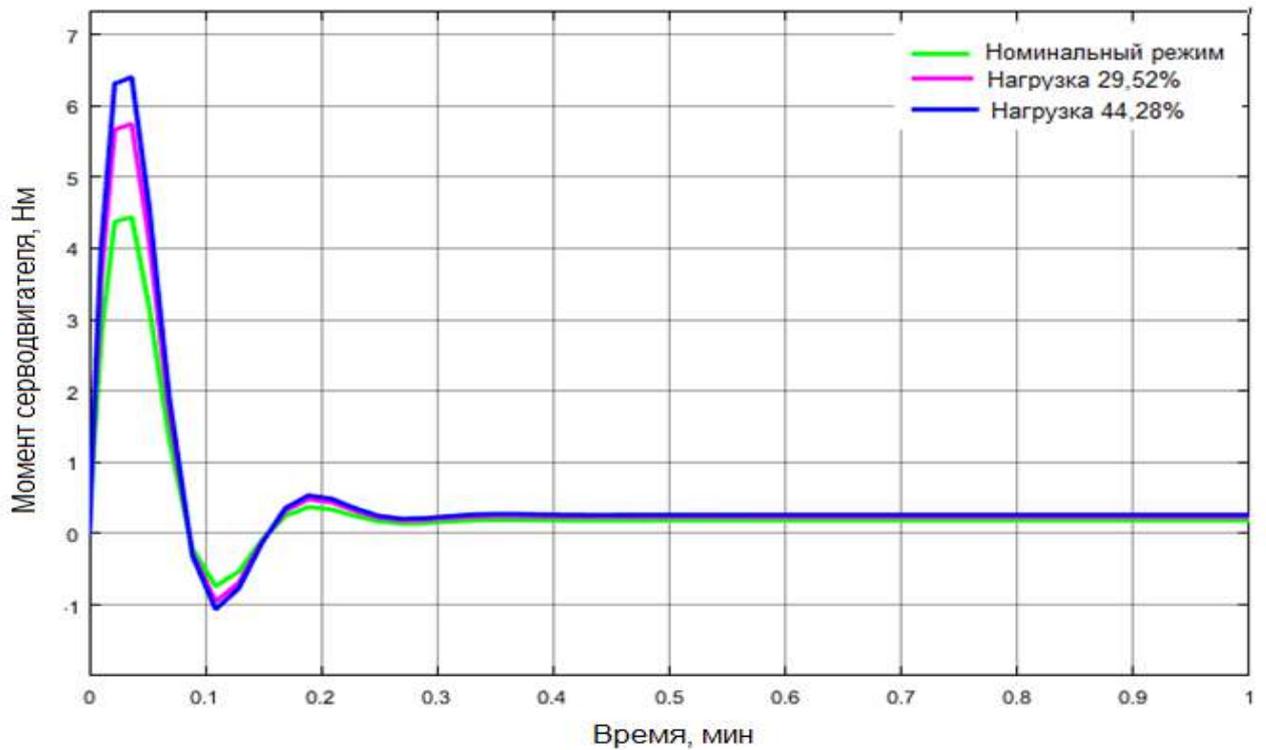


Рисунок 7.8 – График момента сервопривода при различных условиях нагружения

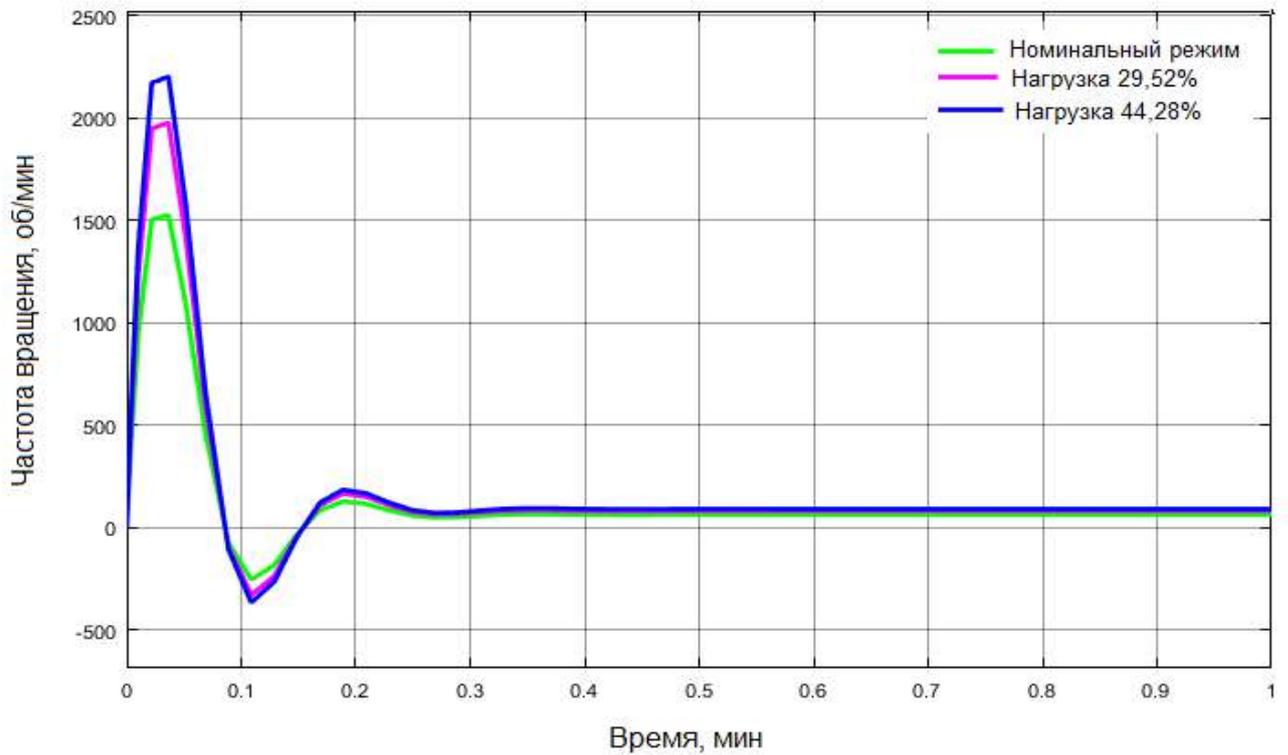


Рисунок 7.9 – График частоты вращения сервопривода при различных условиях нагружения

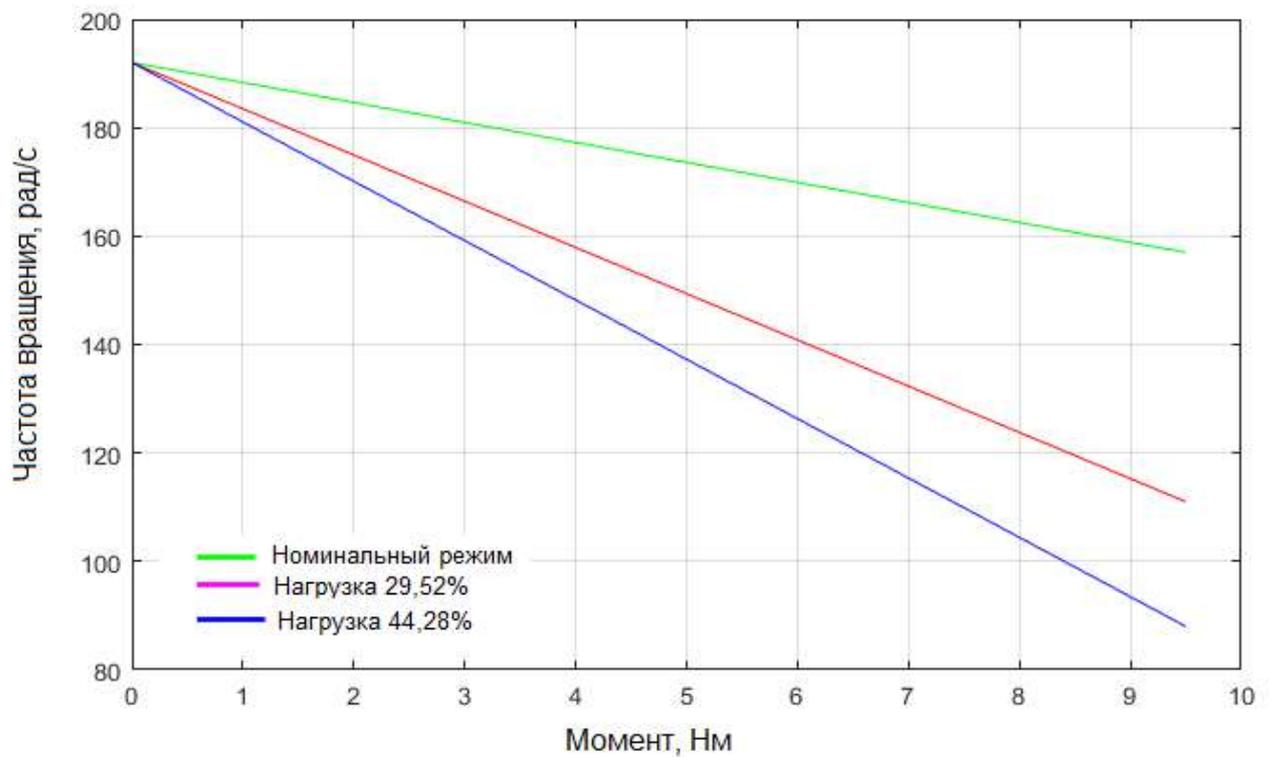


Рисунок 7.10 – Механическая характеристика сервоприводов при различной нагрузке

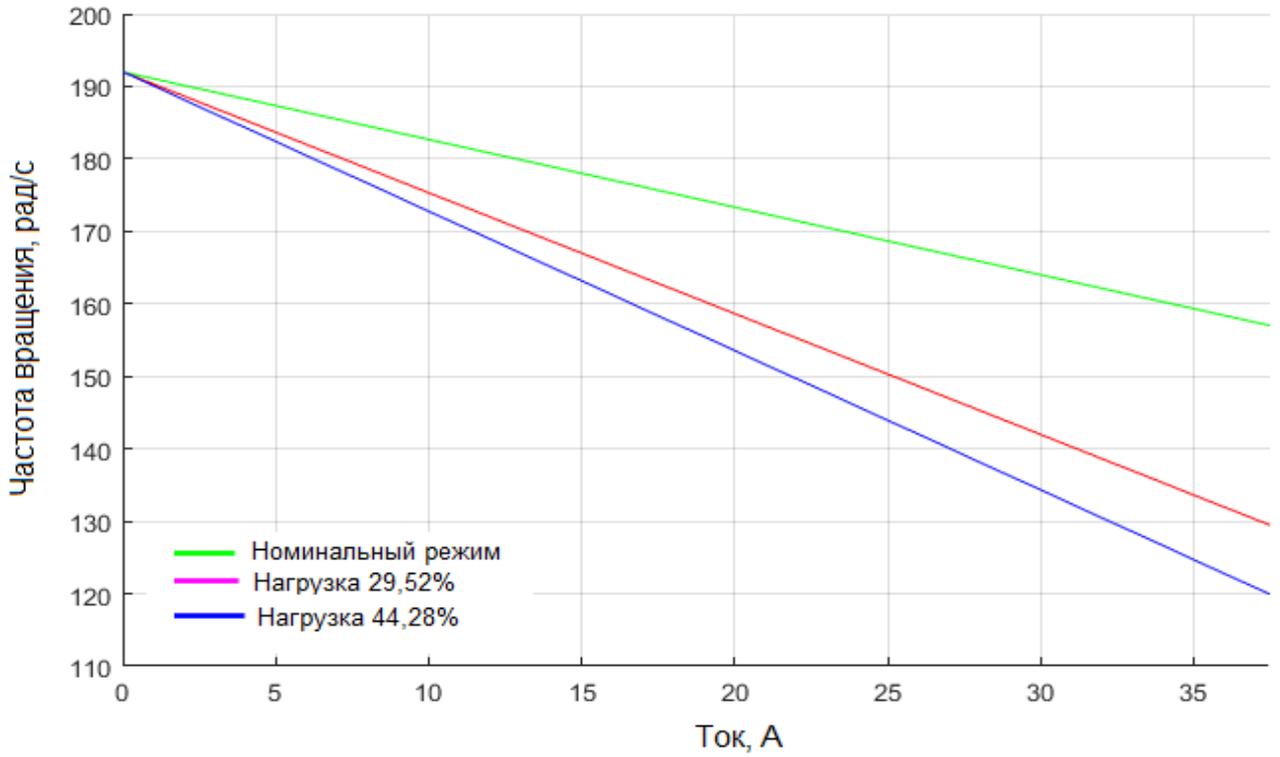


Рисунок 7.11 – Электромеханическая характеристика сервоприводов при различной нагрузке

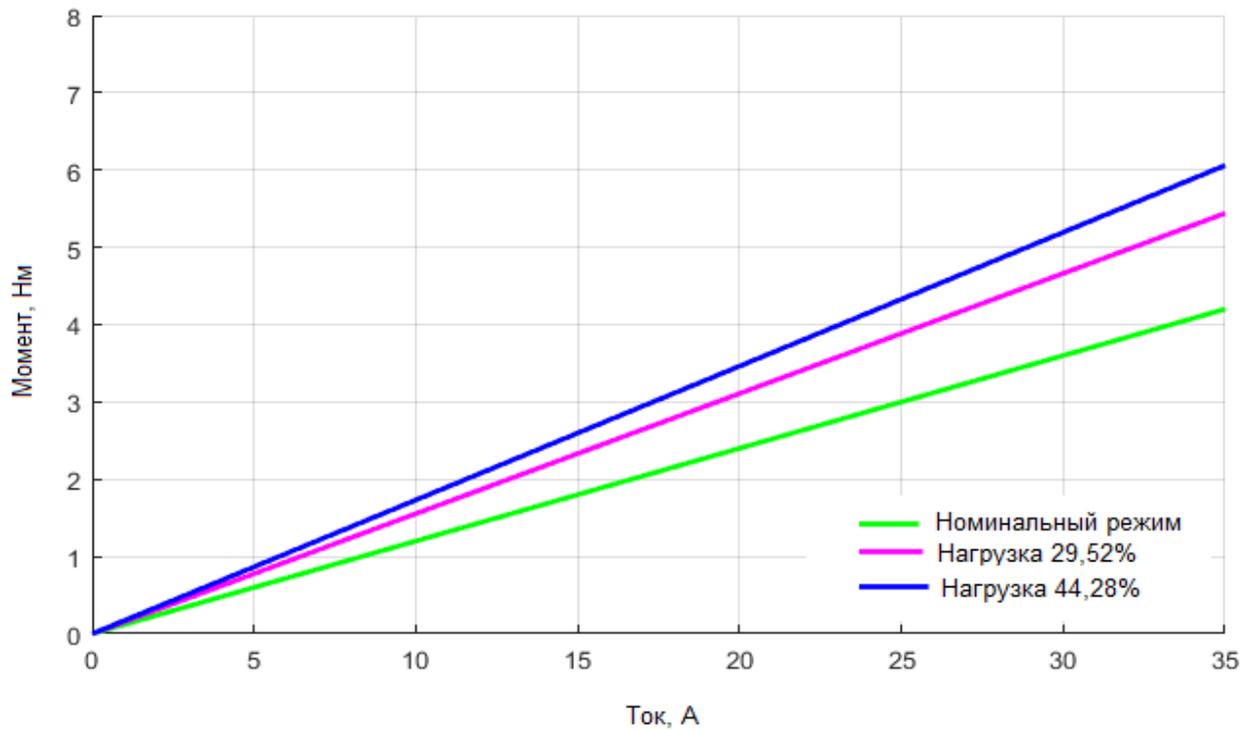


Рисунок 7.12 – Нагрузочная характеристика сервоприводов при различных условиях нагружения

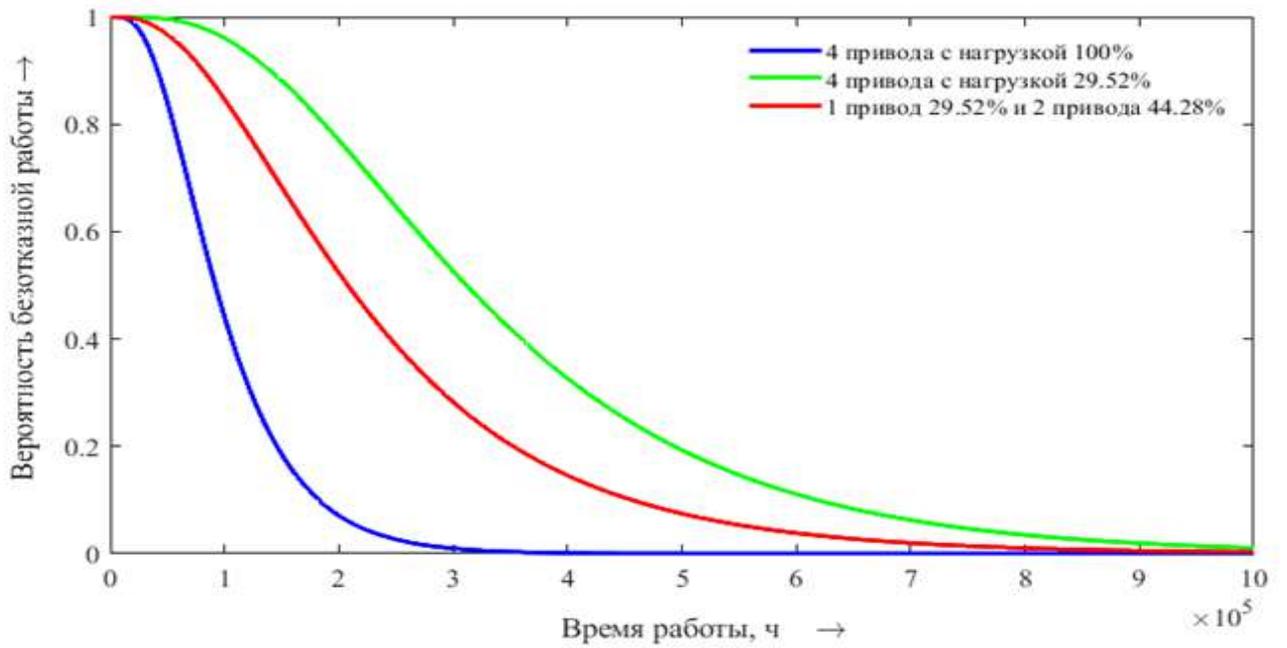


Рисунок 7.13 – Вероятность безотказной работы при различных условиях нагружения исследуемого стенда

Для анализа количественных показателей ВБР трех рассматриваемых вариантов найдена абсолютная разница ВБР МПКС с пониженной и полной нагрузкой (см. рисунок 7.14).

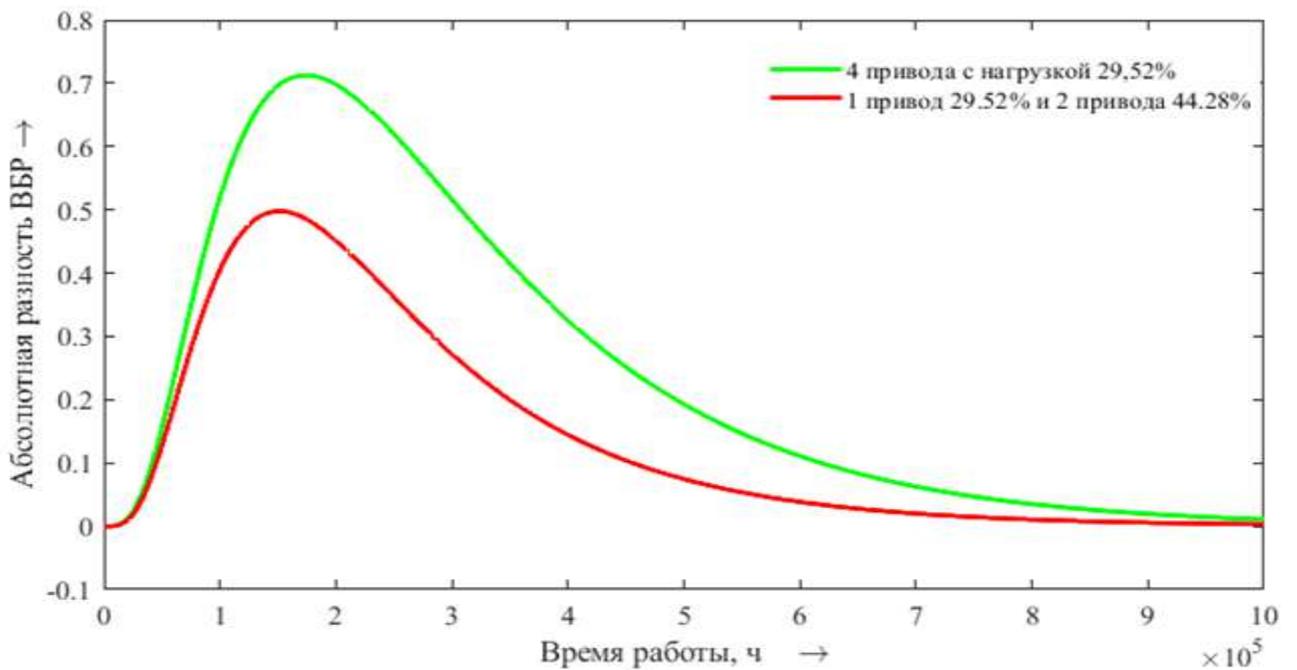


Рисунок 7.14 – Абсолютная разница ВБР МПКС с пониженной и полной нагрузкой

Снижение нагрузки на приводы до 29,52 % от максимума предоставляет возможность повысить ВБР на 71,24 %. В случае отказа одного из приводов и перераспределении нагрузки ВБР снижается на 21,46 %, но тем не менее ВБР неисправного стенда с нагрузочным резервированием выше на 49,78 % по сравнению с полностью нагруженным исправным объектом диагностирования.

Проведенная серия экспериментов показала адекватность разработанной методологии оценки технического состояния приводов МПКС. Подтверждены работоспособность и адекватность моделей оценки текущей и дополнительной нагрузки и принятия решения по выбору режима эксплуатации. Произведенная оценка надежности оптимизированной системы показала целесообразность применения нагрузочного резервирования системы приводов МПКС и возможность существенного повышения надежности системы даже в случае отказа части ее элементов.

7.3 Экспериментальные исследования метода управления механизмами параллельной кинематической структуры при частичном отказе системы исполнительных приводов

В результате экспериментальных исследований модели принятия решения (см. параграф 7.2) получено, что средняя текущая нагрузка на каждый привод МПКС составляет 29,52 %. При отключении одного из приводов данная нагрузка перераспределяется на два соседних привода и составляет 44,28 %. При этом нагрузка на диагональный привод остается неизменной и составляет 29,52 %. Согласно модели принятия решения, данные режимы работы не нанесут ущерба сервоприводам, что подтверждают соответствующие характеристики (см. рисунки 7.7 – 7.12), полученные в результате исследований (см. параграф 7.2).

Пусть звено МПКС на холостом ходу перемещается со скоростью 1 см/мин. Согласно принятым режимам эксплуатации для обеспечения перемещения МПКС при одном неисправном приводе необходимо обеспечить увеличение нагрузки на сервоприводы на 29,52 и 44,28 % соответственно. Для этого необходимо увеличить

напряжение питания на заданный процент. Если номинальное напряжение составляет 48 В, то с учетом перераспределения нагрузки оно составит 62 и 69,3 В соответственно. Графики перемещения стоек, полученные при таком увеличении напряжения, представлены на рисунке 7.15. Полученные зависимости показывают, что все звенья системы двигаются с различной скоростью, которая существенно превышает требуемую. Вычислив скорость перемещения всей платформы, выявлена зависимость, приведенная на рисунке 7.16.

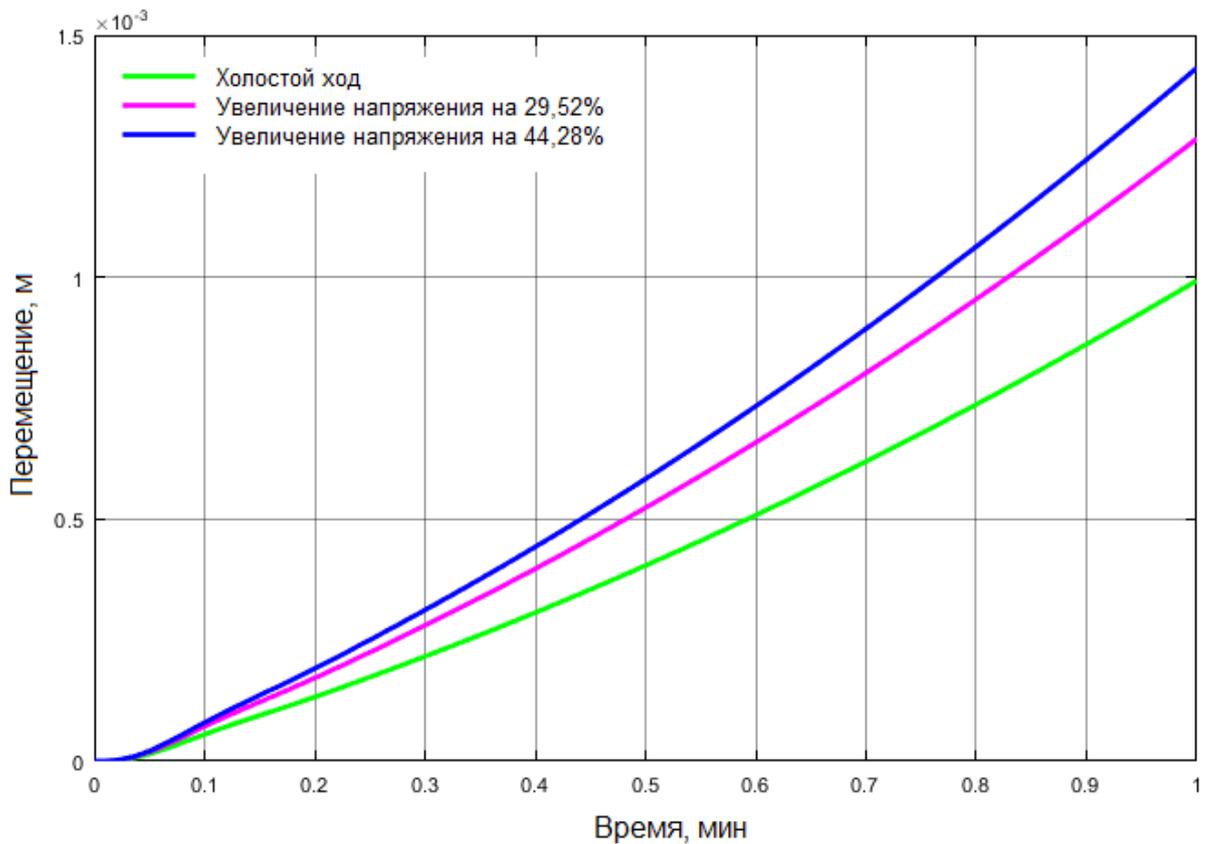


Рисунок 7.15 – Перемещение стоек МПКС без коррекции скорости

Расчеты показывают, что скорость подъема платформы тремя стойками согласно принятому в параграфе 6.2 решению существенно выше необходимой. Следовательно, коррекция положения стоек целесообразна и оправдана.

Возможны два варианта реализации данной задачи:

- выравнивание скорости платформы;
- корректировка перемещения каждой стойки отдельно.

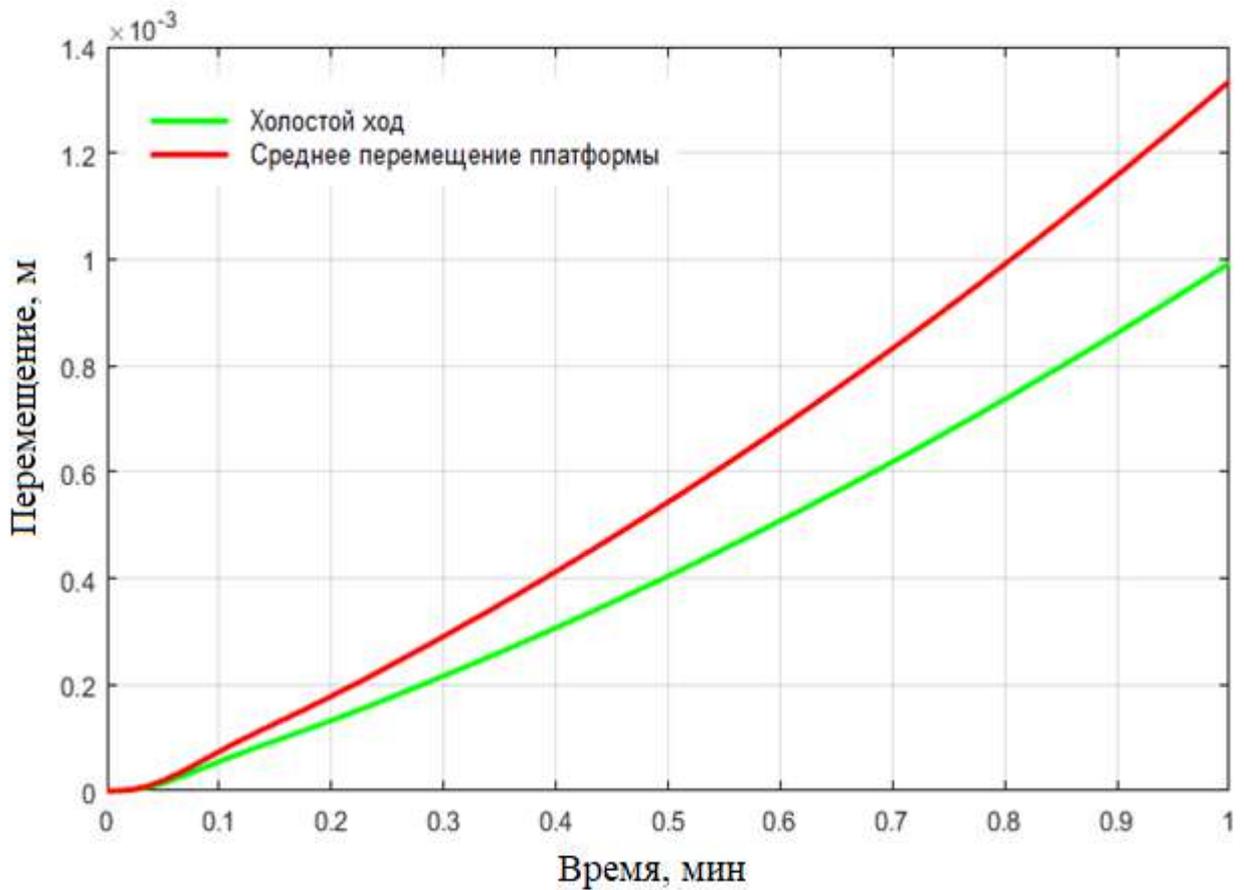


Рисунок 7.16 – Перемещение платформы из трех стоек без коррекции

В первом случае необходимо, зная скорости перемещения каждого звена, рассчитать корректирующий коэффициент согласно (7.1):

$$\Delta h_{\text{пл}} = 1 + \left(\sum_{j=1}^{n^*} l_{\text{пр}j} \right)^{-1} \quad (7.1)$$

Результат проведенной коррекции положения представлен на рисунке 7.17.

Из графика следует, что скорректированное положение платформы не соответствует требуемому. Также в процессе подъема произошел наклон платформы на 3° за минуту, что недопустимо в реальных условиях эксплуатации. Следовательно, первый вариант коррекции является неудовлетворительным.

В параграфе 5.4 разработана система управления МПКС при частичном отказе исполнительных приводов (см. рисунок 5.34), предоставляющая возможность осуществить коррекцию положения звеньев для обеспечения полной синхронизации их работы.

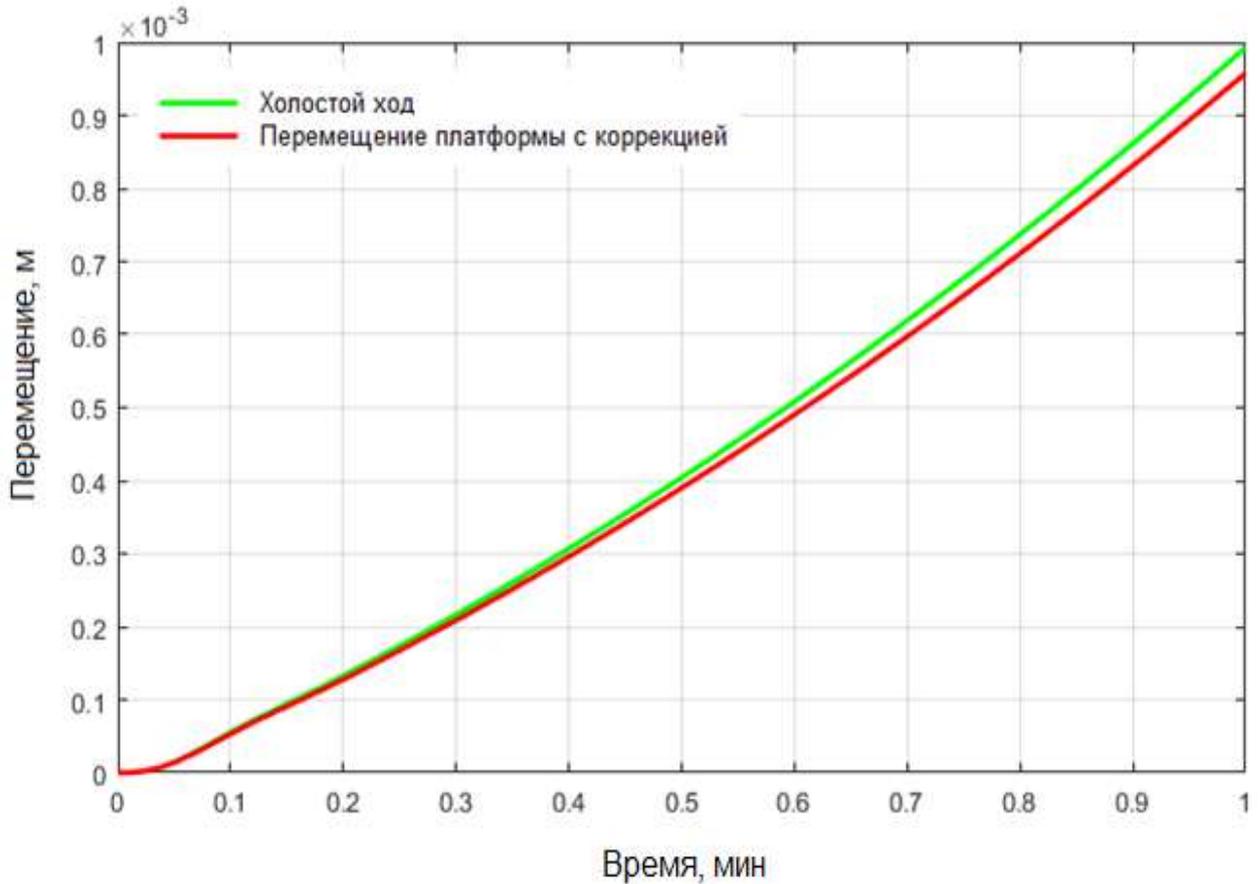


Рисунок 7.17 – Перемещение платформы с коррекцией положения

Согласно предложенному методу управления на вход системы подается напряжение $U_z^{\text{зад}^*}$, увеличенное пропорционально дополнительной нагрузке, а на выходе системы управления (см. рисунок 5.35) – пропорциональный регулятор перемещения платформы $\Delta h_{\text{пр}j}$, вычисляемый согласно (7.1). Согласно данной формуле для корректировки скорости перемещения стойки с нагрузкой 29,52 % выходное перемещение необходимо разделить на 1,2952, при нагрузке 44,28 % – на 1,4428. В результате проведенных расчетов получены графики, приведенные на рисунках 7.19, 7.20. Из графиков следует, что полученное перемещение звеньев при различной нагрузке в точности соответствует требуемому уровню.

Перемещение платформы с коррекцией перемещения каждого звена в отдельности, приведенное на рисунке 7.19, также полностью соответствует заданному.

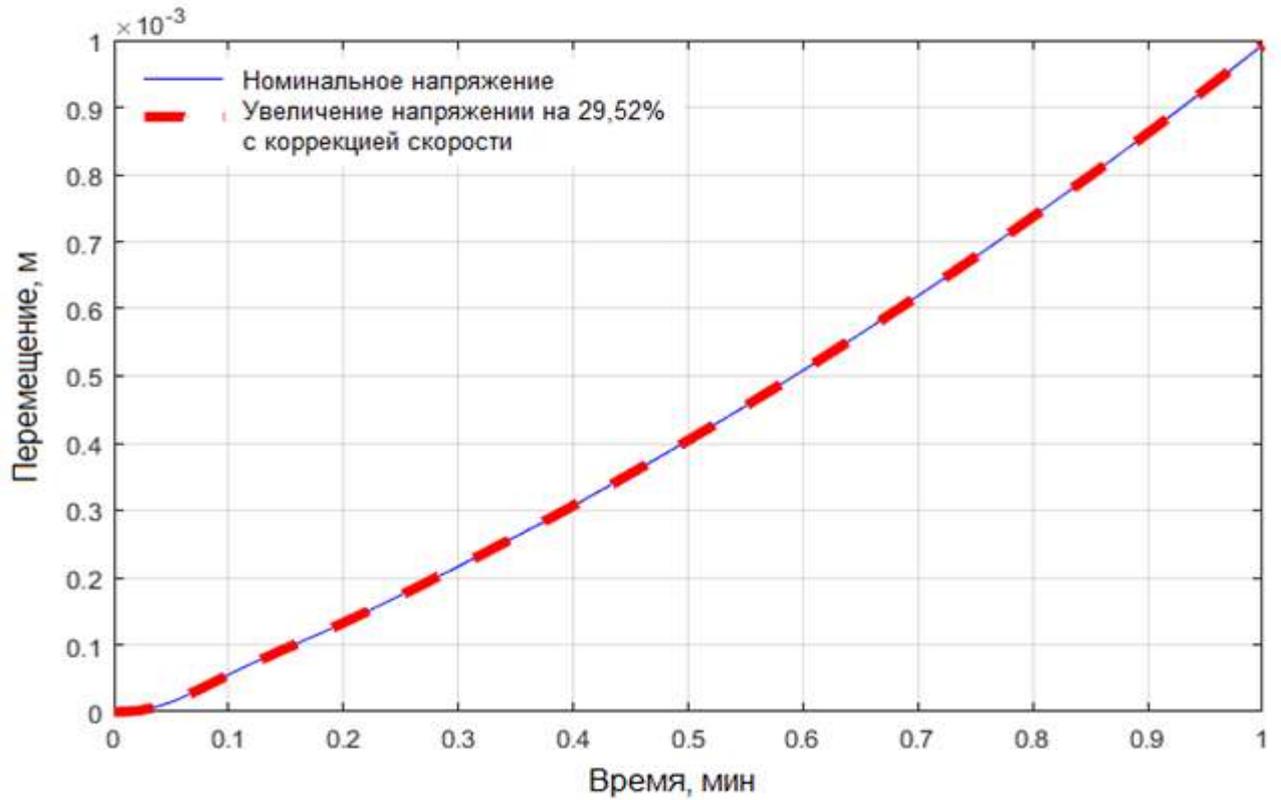


Рисунок 7.18 – Перемещение звеньев МПКС при нагрузке 29,52 % с коррекцией положения

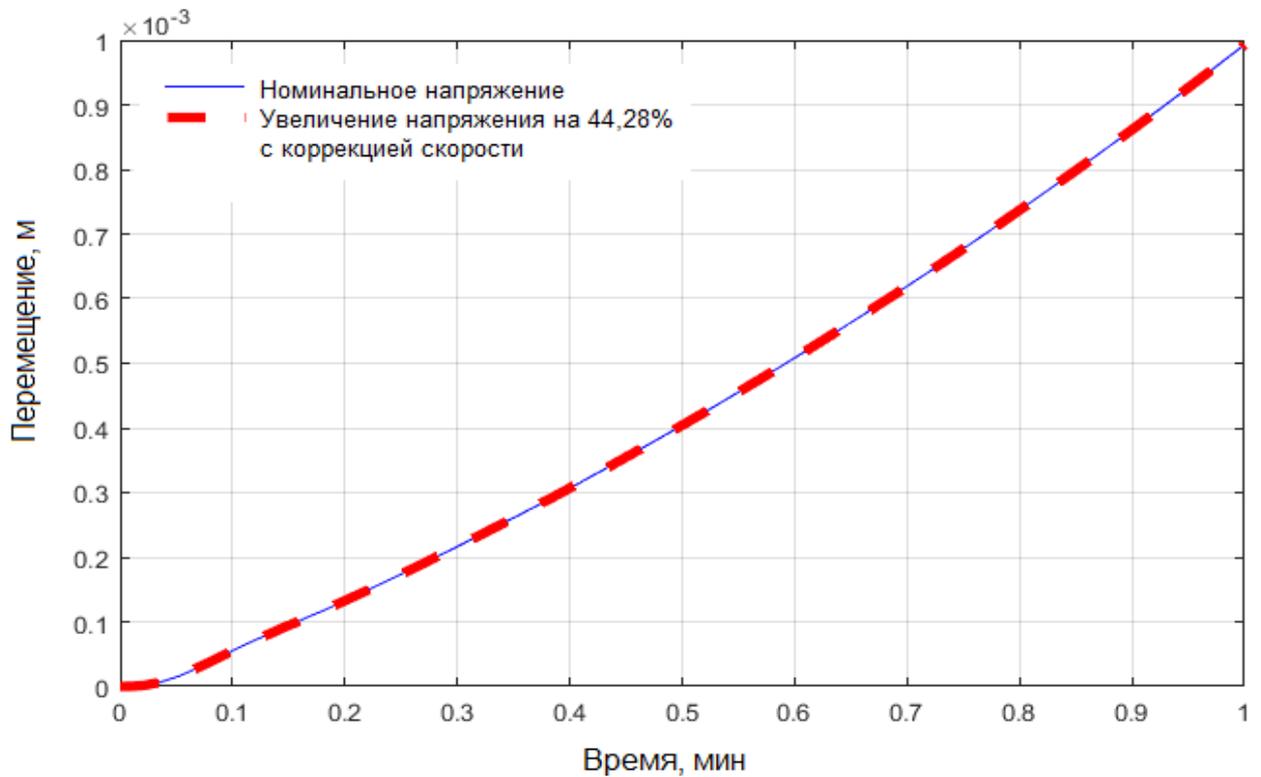


Рисунок 7.19 – Перемещение звеньев при нагрузке 44,28% с коррекцией положения

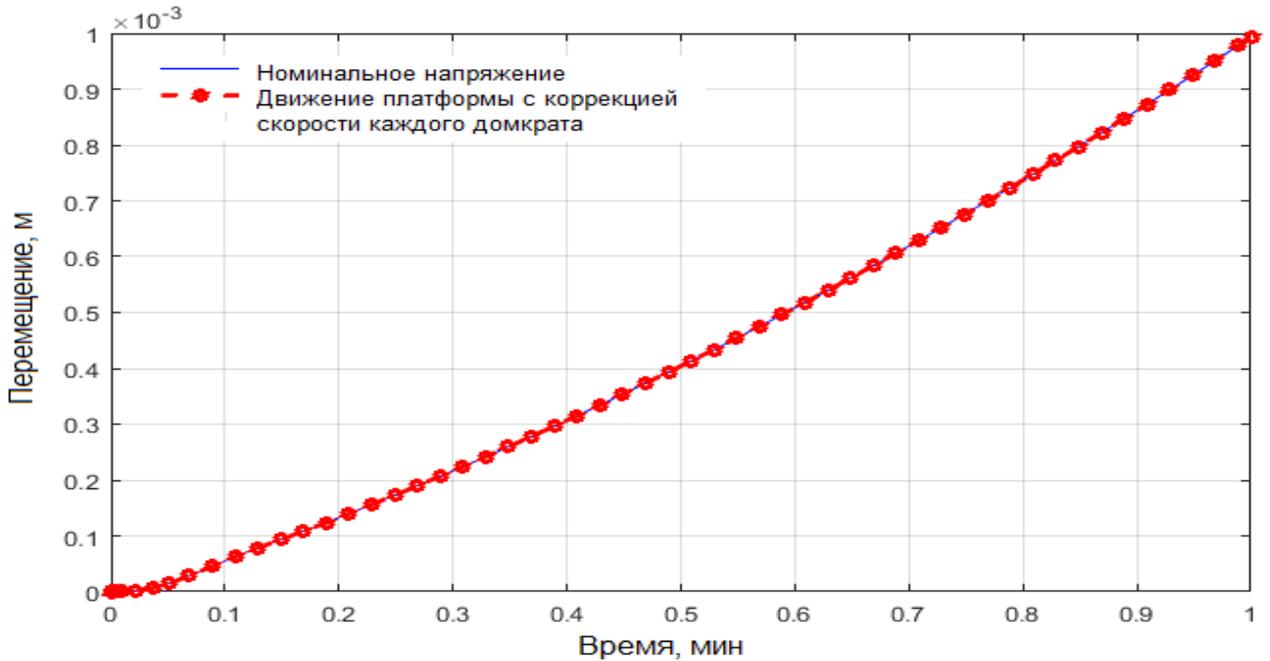


Рисунок 7.20 – Перемещение платформы с коррекцией положения каждого звена

Из проведенного исследования следует, что при увеличении нагрузки на сервопривод необходимо произвести пропорциональное увеличение напряжения питания на заданную величину. Для обеспечения необходимого перемещения платформы необходимо выполнить коррекцию положения каждой стойки МПКС отдельно согласно параграфу 5.4.

Проведенная серия экспериментов подтверждает работоспособность и адекватность разработанных теоретических основ управления МПКС с учетом технического состояния системы приводов.

7.4 Анализ эффективности применения методологии оценки технического состояния отказоустойчивой системы приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Экстремальные условия эксплуатации МПКС приводят к частым отказам и длительным простоям оборудования, обусловленным необходимостью поиска возникших неисправностей и их устранения [A276-A299].

По статистике [56] более 70 % отказов МПКС приходится на системы их электрических или гидравлических приводов. Эксплуатационная надежность приводов МПКС может быть повышена за счет постоянного контроля и оценки технического состояния, а также оптимизации режима эксплуатации оборудования. Данный подход к организации эксплуатации МПКС предоставит возможность обеспечить планирование сроков, состава технического обслуживания и ремонта систем исполнительных приводов. Эксплуатация систем приводов на пониженной нагрузке и совместный анализ их состояния предоставит возможность оптимизировать режим работы оборудования таким образом, чтобы осуществить плановую замену неисправных элементов без остановки технологического процесса и без ущерба для остальных приводов и снижения надежности МПКС за счет применения киберфизического взаимодействия их систем приводов, базирующееся на инновационной методологии оценки технического состояния. Следующим этапом исследований является определение достоверности разработанных методов диагностирования и прогнозирования, а также анализ влияния их применения на надежность эксплуатации МПКС.

Согласно классической теории надежности [56], достоверность технического диагностирования определяется как вероятность принятия правильного решения при определении технического состояния оборудования.

В процессе диагностирования возможны следующие типы ошибочного диагноза:

- ошибка первого рода – вероятность ложного отказа;
- ошибка второго рода – вероятность необнаружения отказа.

Данные вероятности могут быть определены согласно [172, таблица 27] или рассчитаны по формулам:

$$P_{\text{ло}} = 0,5 \cdot (P_{\text{ло}}(v_1) + P_{\text{ло}}(v_2)), \quad P_{\text{но}} = 0,5 \cdot (P_{\text{но}}(v_1) + p_{\text{но}}(v_2)),$$

где $P_{\text{ло}}$ – вероятность ложного отказа; $P_{\text{но}}$ – вероятность не обнаружения отказа; $v_1 = (b - M) \cdot \sigma$, $v_2 = (b - M) \cdot (M - q) \cdot (\sigma(b - M))^{-1}$, $[a, b]$ – диапазон измерения контролируемых параметров; M – математическое ожидание параметра (номинальное значение); σ, σ_{Δ} – среднее квадратическое отклонение параметров и погрешности.

Значения ошибок первого и второго рода, определяемые из [39, таблица 15] по рассчитанным величинам v_1, v_2 и в $\delta = \sigma_{\Delta}/\sigma$.

Достоверность определения исправного состояния приводов МПКС [59]:

$$D_{и} = (P_{од} - P_{од} \cdot P_{ло}) \cdot (P_{од} - P_{од} \cdot q + (1 - P_{од}) \cdot P_{но})^{-1}.$$

Достоверность определения неисправного состояния приводов МПКС:

$$D_{н} = (1 - P_{од} - (1 - P_{од}) \cdot P_{но}) \cdot (1 - P_{од} - (1 - P_{од}) \cdot P_{но} + P_{од} \cdot P_{ло})^{-1}.$$

где $P_{од}$ – вероятность исправного состояния привода.

Вероятность принятия правильного решения:

$$D_{р} = 1 - P_{од} \cdot P_{ло} - (1 - P_{од}) \cdot P_{но},$$

При этом параметры $P_{ло}$ и $P_{но}$ являются показателями достоверности диагностирования и зависят от надежности средств измерения. Вероятности $D_{и}, D_{н}, D_{р}$ характеризуют достоверность используемого метода диагностирования.

В этом случае достоверность результата диагностирования может быть вычислена по формуле:

$$D_{\text{диагн}} = 1 - (P_{ло} + P_{но}).$$

Результаты расчета достоверности диагностирования по выбранным диагностическим параметрам приведены в таблице 7.10.

Таблица 7.10 - Достоверность диагностирования систем приводов МПКС по току и вибрации

Диагностический параметр	Ток	Вибрация
Вероятность ложного отказа, $P_{ло}$	0,0391	0,00391
Вероятность необнаружения отказа, $P_{но}$	0,0081	0,003813
Достоверность определения исправного состояния, $D_{и}$	0,996	0,99
Достоверность определения неисправного состояния, $D_{н}$	0,985	0,986
Вероятность принятия правильного решения, $D_{р}$	0,997	0,996
Достоверность диагностирования, $D_{\text{диагн}}$	0,93	0,966

В результате проведенных расчетов получено, что достоверность диагностирования электропривода по току составляет 93 %, а гидропривода по вибрации – 96,6 %, что свидетельствует о высоком качестве разработанной в диссертационной работе методологии и целесообразности его применения для электрических и гидравлических приводов МПКС.

Помимо достоверности диагностирования, важно установить, каким образом применение киберфизического взаимодействия системы приводов МПКС отразится на их надежности. В общем случае надежность оборудования зависит от ряда взаимосвязанных факторов, приведенных на рисунке 7.21.



Рисунок 7.21 – Факторы, влияющие на эффективность оценки технического состояния системы приводов МПКС

Организация киберфизической системы оценки технического состояния приводом МПКС предоставит возможность сократить количество отказов и время поиска и устранения неисправностей в связи с их своевременным выявлением и оптимизацией режима эксплуатации с возможностью замены дефектных приводов без остановки технологического процесса, что предоставит возможность существенно повысить эксплуатационный ресурс оборудования.

Комплексным показателем надежности приводов МПКС является коэффициент технического использования оборудования [180]:

$$k_{\text{ти}} = T_p \cdot (T_p + T_{\text{п}})^{-1},$$

где T_p , $T_{\text{п}}$ – время исправной работы и простоя оборудования соответственно.

Согласно статистике [303] до 20 % времени работы оборудования тратится на простой из-за неисправностей исполнительных механизмов, т. е. коэффициент технического использования оборудования без оценки технического состояния составит $k_{\text{ти}0} = 0,8$. Поиск отказов составляет 80 % от времени ремонта оборудования. Применение методологии оценки технического состояния систем приводов МПКС предоставит возможность автоматизировать процесс поиска неисправностей, а также производить ремонт оборудования в процессе эксплуатации, то есть исключить время ремонта.

Тогда

$$k_{\text{ти}1} = (0,8 + 0,2 \cdot 0,8) \cdot (0,8 + 0,2 \cdot 0,8 + 0,2 \cdot 0,2)^{-1} = 0,96.$$

Изменение коэффициента технического использования от применения методологии оценки технического состояния приводов МПКС может быть вычислено из соотношения

$$\Delta k_{\text{ти}} = k_{\text{ти}1} - k_{\text{ти}0} = 0,96 - 0,8 = 0,16.$$

В результате проведенного анализа следует, что применение методологии оценки технического состояния предоставит возможность повысить коэффициент технического использования систем приводов МПКС на 16 %, а применение нагрузочного резервирования – повысить ВБР неисправного МПКС, обеспечив его высокую отказоустойчивость.

Из проведенного анализа следует, что предложенный метод диагностирования электроприводов по току имеет достоверность 93 %, а по вибрации – 96,6 % и предоставит возможность повысить коэффициент технического использования оборудования на 16%, что предопределяет возможность рекомендовать предложенную методологию оценки технического состояния систем приводов МПКС для практического применения.

7.5 Рекомендации по проектированию отказоустойчивой системы приводов механизмов параллельной кинематической структуры

При проектировании отказоустойчивой системы приводов МПКС необходимо выбирать исполнительные приводы с запасом по нагрузке. Проведенные в параграфе 5.1. исследования показали, что повышение эксплуатационной надежности систем приводов МПКС возможно с применением нагрузочного резервирования, дающего возможность перераспределения нагрузки с неисправных приводов на соседние исправные. При этом каждый привод системы одновременно является основным и резервным. Использование в составе МПКС приводов с запасом по нагрузке предоставляет возможность существенно повысить надежность системы приводов. МПКС с частичным отказом в системе приводов с перераспределенной нагрузкой имеет большую надежность по сравнению с аналогичной исправной системой без нагрузочного резервирования (параграф 5.1). Основным показателем, определяющим целесообразность применения нагрузочного резервирования, является управляемость объекта $u(t) = u(t)_{\text{зад}}$, то есть возможность реализации технологического процесса при частичном отказе системы приводов. Выбор режима нагружения МПКС зависит от его конструкции и заданного режима эксплуатации. Например, если требуется поднимать платформу МПКС с заданной скоростью, то основным критерием качества работы является обеспечение горизонтальности платформы и движение с заданной скоростью. Если МПКС имеет три параллельных кинематических цепи (трипод), то выполнение резервирования нецелесообразно, так как две стойки не смогут поддержать горизонтальность платформы. Увеличение числа приводов предоставит возможность выровнять платформу, следовательно, возникает необходимость резервирования. Желательно выбрать четное количество параллельных кинематических цепей, что предоставит возможность выполнить резервирование неисправных приводов МПКС. Увеличение количества параллельных кинематических цепей (см. рисунок 2.1) предоставляет возможность существенно повысить управляемость объекта и выполнить резервирование при одновременном отказе нескольких приводов.

Однако в данном случае возникает возможность наложения перераспределенных нагрузок (см. рисунок 5.17, б – г), что может привести к перегрузке исправных приводов и их преждевременному отказу. Следовательно, при большом количестве приводов основная нагрузка должна быть существенно ниже. Рекомендуется выбирать основную нагрузку на приводы из диапазона 30 – 50 %, причем, если количество приводов невелико (4 или 6), то предпочтительно выбрать нагрузку 50 %. Увеличение количества исполнительных механизмов (8, 12 и более) предполагает снижение основной нагрузки до 30 %. Такой режим нагружения систем приводов МПКС предоставит возможность существенно повысить надёжность и выполнить нагрузочное резервирование при отказе нескольких приводов одновременно.

Применение МПКС со сходящимися кинематическими цепями (см. рисунок 2.7) предполагает использование более мощных приводов по сравнению с механизмами с параллельными кинематическими цепями (см. рисунок 2.1). Данная кинематическая структура предоставляет возможность обеспечить более высокую жесткость конструкции и управляемость без введения дополнительных приводов. Отказ одного из приводов системы не приведет к наклону конструкции, искривлению стоек и падению груза в связи с жесткостью конструкции и наличием дублирующего привода, присоединенного к той же точке выходной платформы. Также отказ привода не приведет к потере управляемости МПКС и предоставит возможность продолжить заданный технологический процесс, тем самым выполнить граничное условие управляемости (5.26). Вероятность наложения нагрузок от разных приводов, как в параллельном механизме (см. рисунок 2.1), также исключаются. В случае отказа одного из приводов кинематических цепей, сходящихся в одной точке, всю его нагрузку возьмет второй привод. В случае отказа обоих приводов группы механизм становится неисправным и его эксплуатацию необходимо прекратить. Для возможности практической реализации описанного подхода к резервированию необходимо, чтобы максимальная рабочая нагрузка на каждый привод системы не превышала 50 % от предельно допустимой.

Для проектирования отказоустойчивых МПКС на базе электрических приводов

необходимо выбирать линейные актуаторы с возможностью разблокировки штока после снятия напряжения с привода. Это предоставит возможность осуществить перемещение выходной платформы при наличии неисправностей в системе приводов.

При проектировании МПКС на основе гидравлических приводов необходимо наличие минимум двух гидронасосов, питающих нечетные и четные группы стоек. В этом случае при отказе одного из насосов можно реализовать нагрузочное резервирование с помощью гидроцилиндров, подключенных к другому насосу. Для этого необходимо, чтобы рабочая нагрузка каждого гидроцилиндра не превышала 50 % от максимально допустимой. Рекомендуемая схема гидравлического привода МПКС приведена на рисунке 7.22. В каждую линию отказоустойчивой системы гидравлических приводов МПКС необходимо поставить пропорциональный гидрораспределитель, регулирующий подачу рабочей жидкости, двухсторонний гидравлический замок, который предоставит возможность перемещать гидроцилиндр в зависимости от требуемого закона движения ΔF_i , и электрогидравлический клапан, который предоставит возможность слить рабочую жидкость из неисправного гидроцилиндра для устранения его фиксации и свободного перемещения платформы остальными исправными элементами.

Контроль исправности гидронасоса выполняется по параметрам вибрации с помощью разработанной в диссертационной работе методологии оценки технического состояния. Остальные элементы схемы диагностируются по параметру давления, согласно известному методу [50] (см. гл. 1).

Текущий режим нагружения гидроцилиндров оценивается по давлению в штоковой полости каждого гидроцилиндра (см. гл. 5). Для оценки текущего состояния систем приводов МПКС различной кинематической структуры на базе электро-механических или гидравлических приводов необходимо использовать теоретические основы, приведенные в главе 4. Определение текущей нагрузки на электрические приводы МПКС выполняется с помощью нечеткой модели расчета текущей нагрузки (см. параграф 5.3). Текущая нагрузка на гидроприводы осуществляется согласно (5.44) по параметру давления.

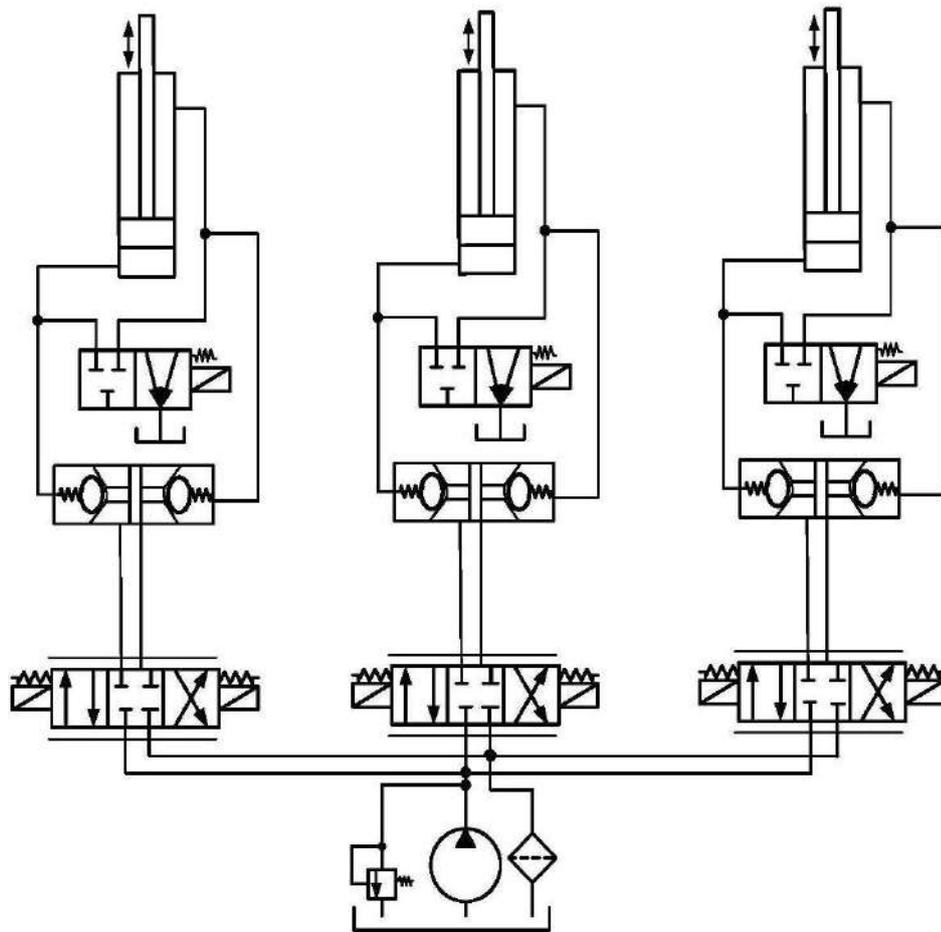


Рисунок 7.22 – Схема гидравлического привода отказоустойчивого МПКС

Выбор способа расчета дополнительной нагрузки зависит от кинематической структуры МПКС. При использовании параллельных кинематических цепей (см. рисунок 2.1) дополнительная нагрузка вычисляется с помощью нечеткой логической модели (5.54), описанной в параграфе 5.3. Для МПКС со сходящимися кинематическими цепями (см. рисунок 2.7) – согласно (5.56).

Принятие решения о выборе режима эксплуатации для конфигурации МПКС, приведенной на рисунке 2.1 выполняется на основе нечеткой логической модели, описанной в параграфе 5.2. Для механизма на базе сходящихся кинематических цепей оценивается состояние приводов для каждого узла. В случае отказа одного из приводов принимается решение о передаче нагрузки на второй. При отказе обоих приводов выполняется отключение МПКС. Соответствующая модель принятия решения для данной кинематической структуры МПКС приведена в параграфе 5.5.

Для реализации киберфизической системы оценки технического состояния приводов МПКС требуется интегрировать необходимые измерительные устройства (датчик тока для электропривода или давления и вибрации в гидроприводе) и микрокомпьютер в исполнительные приводы. Задачей микрокомпьютера является сбор, обработка и хранение диагностической информации о каждом приводе, а также передача данных с помощью *Wi-Fi* на верхний уровень системы приводов, осуществляющий принятие решения о целесообразности перераспределения нагрузки [304]. Измерительная часть системы должна быть выполнена в специальном кожухе, защищающем электронные компоненты от перегрева, а также от попадания в них влаги и пыли. В случае применения электрических приводов каждый электропривод должен быть укомплектован информационно-измерительной системой (см. рисунок 7.23, а). При использовании гидропривода основная информационная часть должна располагаться на каждом насосе (см. рисунок 7.23, б). В гидросистеме устанавливаются датчики, измеряющие давление в каждом гидроцилиндре, информация с которых подается в общий микрокомпьютер, установленный на насосе. Такая конфигурация нижнего уровня системы предоставит возможность обеспечить повышенную надежность и больший объем памяти для хранения данных по каждому приводу.

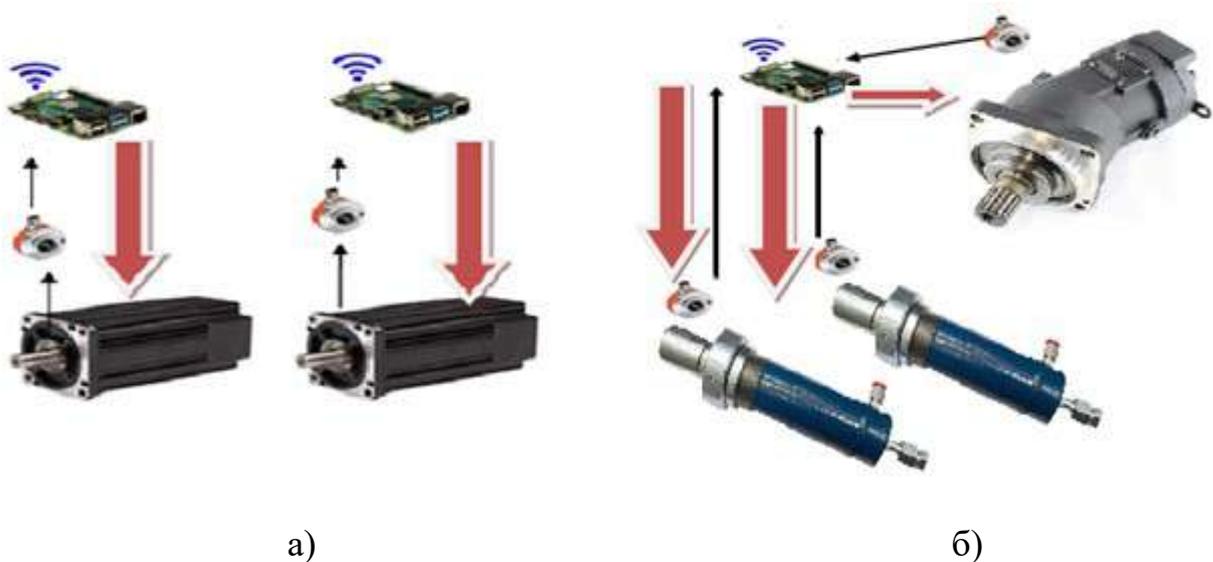


Рисунок 7.23 – Варианты модернизации электрических и гидравлических приводов МПКС: а – электромеханический привод; б – гидравлический привод

В микрокомпьютер, сопряженный с электродвигателем или насосом, устанавливается программный модуль нижнего уровня киберфизической системы (см. рисунок 6.8), реализованный в среде *MATLAB*, поэтому в качестве аппаратной части данного уровня необходимо выбрать промышленный микрокомпьютер, совместимый с данной средой программирования, позволяющий использовать *MATLAB* для оперативной разработки алгоритмов автономной работы системы.

Пакет поддержки *MATLAB* для микрокомпьютера предоставляет два способа программирования приложений микрокомпьютер:

1. Интерактивное общение, предполагающее удаленное общение с микрокомпьютеров с установленным на стационарном компьютере или ноутбуке программным комплексом *MATLAB* или через веб-браузер с *MATLAB Online*. Это предоставляет возможность получать данные от датчиков, подключенных к микрокомпьютеру, а затем анализировать результаты измерений в *MATLAB*.

2. Автономное использование программного пакета с помощью *MATLAB Coder*, позволяющее разрабатывать автономные встроенные приложения. Для реализации этого подхода необходимо использовать интерактивную связь для создания прототипа и разработки алгоритма *MATLAB*, затем автоматически сгенерировать эквивалентный код *C* и записать его для запуска в качестве отдельного приложения.

Для сбора и обработки информации с приводов МПКС целесообразно использовать микрокомпьютер в автономном режиме. Это предоставит возможность производить сбор и обработку диагностической информации без внешнего вмешательства, что обеспечит большую надежность системы и исключит возможность сбоев в результате хакерских атак. В качестве источника диагностической информации в киберфизической системе предполагается использование датчика тока или вибрации и давления, которые устанавливаются на каждом приводе и подключаются к микрокомпьютеру. Запись данных осуществляется в память микрокомпьютера для последующего анализа с помощью разработанных методов (см. гл. 4). Программные модули реализации нижнего уровня киберфизической системы приведены в приложении А.

Реализация верхнего уровня киберфизической системы отказоустойчивых приводов МПКС предполагает сбор информации со всех приводов, ее обработку и

принятие решения об изменении режима эксплуатации отдельных групп приводов. Данные операции целесообразно выполнять в удаленном облачном сервере или на персональном компьютере оператора. Выбор аппаратных средств верхнего уровня определяется расстоянием между приводами и удаленностью от местоположения оператора (см. рисунок 7.24).

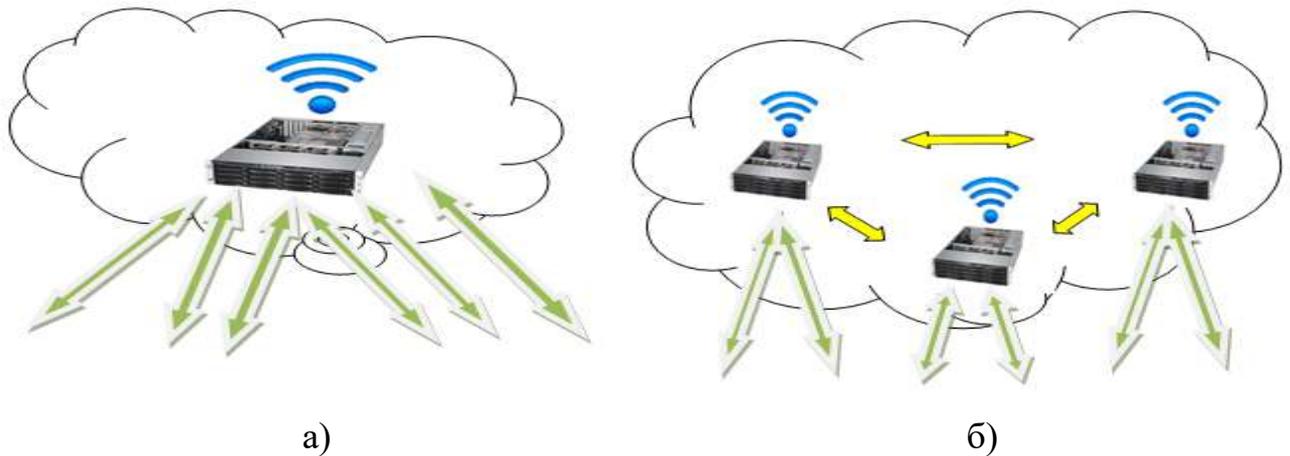


Рисунок 7.24 – Возможные варианты архитектуры верхнего уровня киберфизической системы: а – один сервер; б – несколько серверов

Использование единого сервера на базе персонального компьютера оператора (см. рисунок 7.24, а) является предпочтительным вариантом реализации данного уровня, так как это предоставит возможность защитить киберфизическую систему от хакерских атак, обеспечив ее надежность.

Информация с каждого микрокомпьютера передается на сервер верхнего уровня, где осуществляется принятие решения о режиме дальнейшей эксплуатации исправных приводов группы в составе МПКС. Для этого информация о текущем и прогнозном состоянии сервопривода, а также режиме его текущего нагружения с микрокомпьютера передается на удаленный сервер посредством *Wi-Fi*. Для дополнительной защиты данных, передаваемых на верхний уровень системы, применяется *VPN*-технология – «Виртуальная частная сеть», позволяющая создать надежную и защищенную сеть на основе сети *Internet* с применением протокола *IPSec* [300].

Программный модуль верхнего уровня (см. рисунок 6.8) реализован в среде

MATLAB (Приложение А), поэтому необходимо обеспечить интерактивное общение микрокомпьютера с установленным на стационарный компьютер или ноутбук пакетом *MATLAB* (при использовании компьютера оператора) или через веб-браузер с *MATLAB Online* (в случае применения облачного сервиса) [301].

Результатом работы верхнего уровня является управляющий сигнал на группу сервоприводов для реконфигурации их работы или, в случае невозможности поддержания группой требуемого режима работы, передать сигнал на остановку технологического процесса. Данная информация передается между элементами киберфизической системы посредством *VPN*-технологии с применением протокола *IPSec* [302].

Реализация предложенного подхода предоставит возможность осуществить контроль технического состояния в режиме реального времени и, в случае обнаружения неисправности, произвести отключение неисправного сервопривода и изменить режима работы остальных приводов группы таким образом, чтобы поддержать выполнение технологического процесса, обеспечив необходимое качество выполнения технологических операций.

7.6 Выводы по главе 7

1. Экспериментальные исследования показали работоспособность предложенных теоретических основ оценки технического состояния, точность определения текущего состояния привода, поиска неисправностей и прогнозирования технического состояния.

2. Расчет текущей и дополнительной нагрузок на сервопривод позволил осуществить перераспределение нагрузки в случае отказа части сервоприводов группы, а модель принятия решения при выборе режима эксплуатации – определить целесообразность изменения нагрузки с учетом текущего и прогнозного состояний работоспособных сервоприводов МПКС.

3. Исследование эксплуатационных характеристик сервоприводов пока-

зало, что выбранный режим эксплуатации МПКС не приводит к динамическим перегрузкам сервоприводов и их преждевременному отказу, следовательно, может быть использован на практике.

4. Исследования надежности системы с резервированием по нагрузке показали, что снижение нагрузки на приводы до 29,52 % от максимума предоставляет возможность повысить ВБР на 71,24 %. В случае отказа одного из приводов и перераспределении нагрузки ВБР снижается на 21,46 %, но тем не менее ВБР неисправного МПКС с нагрузочным резервированием выше на 49,78 % по сравнению с полностью нагруженным исправным МПКС.

5. Исследования системы управления звеньями МПКС при частичном отказе системы приводов показали, что введенная корректирующая функция обеспечивает заданную скорость перемещения при изменении внешней нагрузки на сервоприводы.

6. Рассмотренные вопросы эффективности и достоверности показали, что применение методологии оценки технического состояния предоставит возможность повысить коэффициент технического использования оборудования на 16 %. Достоверность диагностирования по току и вибрации – не менее 93 %. Погрешность краткосрочного прогнозирования составляет 1,7 %, долгосрочного прогнозирования – не превышает 10 %. Точность прогнозирования может быть повышена с помощью увеличения объема обучающей выборки за счет добавления текущих значений диагностических параметров.

7. Предложены рекомендации по проектированию отказоустойчивых систем приводов МПКС с учетом текущего и прогнозного технического состояния, учитывающие тип исполнительного привода и кинематическую структуру механизма. Разработанная схема гидравлического привода отказоустойчивого МПКС предоставляет возможность устранить фиксацию неисправного привода и свободно перемещать платформу исправными элементами. Приведенные варианты архитектуры уровней киберфизической системы оценки технического состояния дают возможность реализовать местное и дистанционное управление МПКС.

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 текущего 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 данной задачи 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 предложенных 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, теории конечных элементов, 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 литературы

1. Альван, Х. М. Декомпозиция задачи силового анализа многоподвижного механизма параллельной структуры / Х. М. Альван, А. В. Слоущ. - Текст: непосредственный // Теория механизмов и машин. – 2005. – № 1. – Том. 3. – С. 35–39.
2. Альван, Х. М. Об управлении движением пространственной платформы с несколькими степенями подвижности / Х. М. Альван, А. В. Слоущ. - Текст: непосредственный // Теория механизмов и машин. – 2003. – № 1. – С. 63–69.
3. Афонин, В. Л. Позиционно-силовое управление в механизмах параллельной структуры / В. Л. Афонин, А. Н. Смоленцев. - Текст: непосредственный // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 5. – С. 14 – 22.
4. Бушуев, В. В. Механизмы параллельной структуры в машиностроении / В. В. Бушуев, И. Г. Хольшев. – Текст: непосредственный // СТИН. – 2001. – № 1. – С. 3–8.
5. Бушуев, В. В. Особенности проектирования оборудования с параллельной кинематикой / В. В. Бушуев, П. В. Подзоров. - Текст: непосредственный // СТИН. – 2004. – № 4. – С. 3–10.
6. Бушуев, В. В. Особенности проектирования оборудования с параллельной кинематикой / В. В. Бушуев, П. В. Подзоров. - Текст: непосредственный // СТИН. – 2004. – № 5. – С. 3–7.
7. Вульфсон, И. И. Динамика механизмов с учетом упругости звеньев: учебное пособие / И. И. Вульфсон. – Ленинград: изд-во ЛПИ, 1984. – 80 с. – Текст: непосредственный.
8. Вульфсон, И. И. Динамические расчеты цикловых механизмов / И. И. Вульфсон. – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 328 с. - Текст: непосредственный.
9. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – Москва : Физматгиз, 1963. – 872 с. - Текст: непосредственный.
10. Гаврилов, В. А. Исследование рабочей зоны и жесткости механизмов с параллельной кинематикой / В. А. Гаврилов, Д. А. Спиридонов, А. Г. Кольцов. -

Текст: непосредственный // СТИН. – 2004. – № 2. – С. 24 – 26.

11. Галиуллин, А. С. Методы решения обратных задач динамики / А. С. Галиуллин. – Москва : Наука, 1986. – 224 с. - Текст: непосредственный.

12. Янг, Д. Исследование кинематики манипуляторов платформенного типа / Д. Янг, Т. Ли. -Текст: непосредственный // Конструирование. – 1984. – Т. 106. – № 2. – С. 264 – 272.

13. Глазунов, В. А. Принципы классификации методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой / В. А. Глазунов, А. Ш. Колискор, А. Ф. Крайнев, Б. И. Модель. - Текст: непосредственный // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – № 1. – С. 41 – 49.

14. Глазунов, В. А. Пространственные механизмы параллельной структуры / В. А. Глазунов, А. Ш. Колискор, А. Ф. Крайнев. – Текст: непосредственный. – Москва : Наука, 1991. – 95 с.

15. Глазунов, В. А. Управление механизмами параллельной структуры при переходе через особые положения / В. А. Глазунов, М. Г. Есина, Р. Э. Быков. - Текст: непосредственный // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 2. – С. 78 – 84.

16. Bonev, I. A. A closed-form solution to the direct kinematics of nearly general parallel manipulators with optimally located three linear extra sensors / I. A. Bonev, J. Ryu, S-G. Kim, S-K. Lee. - Текст: непосредственный // Transactions on Robotics and Automation, 2001. – Vol. 17 (2). – P. 148–156.

17. Лебедев, В. И. Синтез механизмов с пассивными связями / В. И. Лебедев, А. М. Турланов. - Текст: непосредственный // Теория механизмов и машин. – 2003. – № 2. – С. 28–31.

18. Корендясев, А. И. Манипуляционные системы роботов / А. И. Корендясев, Б. Л. Саламандра, Л. И. Тывес и др.; под общ. ред. А. И. Корендясева. – Москва: Машиностроение, 1989. – 472 с. - Текст: непосредственный.

19. Александров, В. В. Стабилизация управляемой платформы при наличии ветровых возмущений / В. В. Александров, Б. Я. Локшин [и др.]. - Текст: непосредственный // Фундаментальная и прикладная математика. – 2005. – Т. 11. – № 7. –

C. 97-115.

20. Петрова, Л. Н. Особенности решения обратной задачи для триопода / Л. Н. Петрова. - Текст: непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2009. Вып. 14. – № 33 (166). – С. 61–65.

21. Захаров, Е. Н. Синтез закона движения поворотного основания погрузочного манипулятора-трипода / Е. Н. Захаров, И. А. Несмиянов. - Текст: непосредственный // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 3 (226). – С. 18-21.

22. Воробьева, Н. С. Отслеживание приводами манипулятора параллельно-последовательной структуры программных перемещений рабочего органа / Н. С. Воробьева, И. А. Несмиянов [и др.]. - Текст: непосредственный // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 2. – С. 154–165.

23. Vorob'eva, N. S. Kinematic synthesis of programmed motions of drivers of a manipulator-tripod with a three-degree gripper / N. S. Vorob'eva, I. A. Nesmiyanov [и др.]. - Текст: непосредственный // Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series. Cham. – 2019. – С. 73–82.

24. Zakharov, E. N. Manipulator-tripod on mounted parallelogram mechanism / E. N. Zakharov, I. A. Nesmiyanov [и др.]. - Текст: непосредственный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 489 (1). – С. 012062.

25. Несмиянов, И. А. Обоснование параметров манипулятора погрузочно-транспортного робота / И. А. Несмиянов, М. Е. Николаев [и др.]. - Текст: непосредственный // Известия волгоградского государственного технического университета. – 2020. – № 9 (224). – С. 65–68.

26. Zhoga, V. Algorithm to synthesize control force for tripod manipulator drives / V. Zhoga, I. Nesmiyanov [и др.]. - Текст: непосредственный // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Т. 154. – С. 223–235.

27. Nikolaev, M. E. Definition of service area of agricultural loading robot with manipulator of parallel-serial structure / Nikolaev M.E., Nesmiyanov I.A., [и др.]. - Текст: непосредственный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020.

– 747 (1). – С. 012125.

28. Zhoga, V. Modeling dynamic of tripod manipulator considering mass of actuating links / V. Zhoga, I. Nesmiyanov [и др.]. - Текст: непосредственный // 2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics, NIR 2020. – 2020. – С. 9290240.

29. Несмиянов, И. А. Планирование траекторий захвата погрузочного манипулятора по критериям энергоэффективности и оценка затрат работы приводов / И. А. Несмиянов, М. Е. Николаев. - Текст: непосредственный // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 4 (64). – С. 356-367.

30. Nesmianov, I. A. Justification of parameters of the executive drive of a robotic manipulator of a loading and transport unit / I. A. Nesmianov, M. E. Nikolaev [и др.]. - Текст: непосредственный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 659 (1). – С. 012032.

31. Nikolaev, M. Justification parameters and planning capture trajectories for robotic loading and transport / M. Nikolaev, I. Nesmianov [и др.]. - Текст: непосредственный // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Т. 245. – С. 235-246.

32. Несмиянов, И. А. Фронтальный погрузчик с расширенными функциональными возможностями / И. А. Несмиянов, М. Е. Николаев [и др.]. - Текст: непосредственный // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2022. – № 2 (66). – С. 372-378.

33. Воробьева, Н. С. Многопроцессорная система управления манипулятором параллельно-последовательной структуры / Н. С. Воробьева, В. В. Жога [и др.]. - Текст: непосредственный // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – № 4 (263). – С. 12-19.

34. Рагулин, М. В. Влияние кинематики шкивов на кабельные роботы параллельной структуры / М.В. Радугин, В. Ю. Костенко. - Текст: непосредственный // Молодежная наука как фактор и ресурс опережающего развития. Сборник статей V Международной научно-практической конференции. Петрозаводск. – 2021. – С. 174-183.

35. Зеленский, А. А. Система управления перемещением платформы параллельного манипулятора с восемью гибкими звеньями / А. А. Зеленский, Ю. А. Валюкевич [и др.]. - Текст: непосредственный // Вестник МГТУ "Станкин". – 2021. – № 3 (58). – С. 56–61.

36. Валюкевич, Ю. А. Разработка кинематической модели манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями / Ю. А. Валюкевич, Н. Е. Егорышев [и др.]. - Текст: непосредственный // Наука России: цели и задачи. Сборник научных трудов по материалам XXIV международной научной конференции. – Екатеринбург. – 2020. – С. 20–25.

37. Валюкевич, Ю. А. Исследование кинематики восьмизвенного параллельного манипулятора с гибкими звеньями / Ю. А. Валюкевич, И.И. Наумов [и др.]. - Текст: непосредственный // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 11 - 2. – С. 273-280.

38. Подзоров, П. В. Механизмы параллельной кинематики в станкостроении / П. В. Подзоров. - Текст: непосредственный // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2005. – № 8. – С. 2–24.

39. Глазунов, В. А. Пространственные механизмы параллельной структуры / В. А. Глазунов, А. Ш. Колискор, А. Ф. Крайнев. – Москва : Наука, 1991. – 256 с. - Текст: непосредственный.

40. Смирнов, В. А. Влияние конструктивных особенностей надёжности оборудования, построенного на основе механизмов с параллельными кинематическими цепями / В. А. Смирнов, Е. Ю. Сулацкая. - Текст: непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2009. – Вып.14. – № 33 (166). – С. 72 – 75.

41. Смирнов, В. А. Динамическая модель механизма с параллельной кинематикой / В. А. Смирнов, Л. Н. Петрова. - Текст: непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2009. – Вып.13. – № 11 (144). – С. 50 – 56.

42. Смирнов, В. А. Избыточность координат как фактор возможности оптимального управления оборудованием с параллельными приводами / В. А. Смирнов.

- Текст: непосредственный // Информационные технологии моделирования и управления. Научно-технический журнал. – Воронеж: «Научная книга». – 2010. – № 1 (60). – С. 126 – 131.

43. Horvath, W. Cyber-physical systems: Concepts, technologies and implementation principles in Tools and Methods / W. Horvath [и др.]. - Текст: непосредственный // Competitive Engineering Symposium (TMCE). – 2012. – Р. 19–36.

44. Юферов, Ф. М. Электрические двигатели автоматических устройств / Ф. М. Юферов. – Москва-Ленинград : Госэнергоиздат, 1959. – 226 с.

45. Сервоприводы. - Текст: электронный // База знаний Амперки: сайт. – <http://wiki.amperka.ru> (дата обращения: 13.06.2020).

46. Встовский, А. Л. Электрические машины: учебное пособие / А. Л. Встовский. – Красноярск: Инфра – Москва, 2018. – 464 с. - Текст: непосредственный.

47. Богомолов, В. Н. Устройства с датчиками Холла и датчиками магнитосопротивления / В. Н. Богомолов. – Москва-Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. – 168 с. - Текст: непосредственный.

48. Кацман, М. М. Электрические машины: учеб. для студ. сред. проф. образования / М. М. Кацман. – Москва : Академия, 2013. – 496 с. - Текст: непосредственный.

49. Isermann, R. Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance / R. Isermann. – Berlin: Springer, 2006. – 466 p. - Текст: непосредственный.

50. Isermann, R. Fault-Diagnosis Applications. Model-Based conditions monitoring: Actuators, drives, plants, sensors and fault-tolerant systems / R. Isermann. – Berlin: Springer, 2011. – 466 p. - Текст: непосредственный.

51. Мозгалевский, А. В. Техническая диагностика (непрерывные объекты): учебное пособие для вузов / А. В. Мозгалевский, Д. В. Гаскаров. – Москва : Высшая школа, 1975. – 207 с. - Текст: непосредственный.

52. Давыдов, П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем / П. С. Давыдов. – Москва : Радиосвязь, 1988. – 256 с. - Текст: непосредственный.

53. Фролов, К. В. Испытание, контроль и диагностирование оборудования гибких производственных систем / К. В. Фролов, И. М. Макаров, Е. Г. Нахапетян.

- Текст: непосредственный // Москва : Наука, 1988. – С. 3–12.

54. Пегачков, А. А. Обеспечение долговечности машин по результатам анализа технического состояния: учебное пособие / А. А. Пегачков, В. А. Зорин. – Москва, МАДИ, 2023. – 120 с. - Текст: непосредственный.

55. Зорин, В. А. Прогнозирование остаточного ресурса гидромоторов строительных машин по результатам имитационного моделирования / В. А. Зорин, Ч. М. Нгуен. - Текст: непосредственный // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2023. – № 3. – С. 15–19.

56. Пегачков, А. А. Создание системы прогнозирования и оценки технического состояния, на основе онлайн-мониторинга ряда отслеживаемых параметров дизельных двигателей / А. А. Пегачков, В. А. Зорин. - Текст: непосредственный // Энергоресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях. Материалы международной научно-практической конференции. – Белгород. – 2022. – С. 156–163.

57. Зорин, В. А. Управление надёжностью и рисками строительных машин в эксплуатации / В. А. Зорин, М. Ростамиан. - Текст: непосредственный // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022. Материалы XXVI Международной научно-технической конференции. – Ярославль. – 2022. – С. 278–284.

58. Зорин, В. А. Анализ точности диагностической модели гидроцилиндров транспортно-технологических машин / В. А. Зорин, Ч. М. Нгуен [и др.]. - Текст: непосредственный // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2022. – № 1. – С. 3–7.

59. Zorin, V. A. Prediction of residual life of construction machinery hydraulic cylinders by means of simulation results / V. A. Zorin, N. T. Minh. - Текст: непосредственный // 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 - Conference Proceedings. – 2021. – Moskow: IEEE, 2021: сайт. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9639205> (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

60. Зорин, В. А. Результаты исследования гидромоторов для оценки точности

диагностических моделей / В. А. Зорин, Ч. М. Нгуен [и др.]. - Текст: непосредственный // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях. Материалы международной научно-практической конференции. – Белгород, 2021. – С. 121–128.

61. Зорин, В. А. Система распознавания и мониторинга технического состояния наземных транспортно-технологических машин / В. А. Зорин, Н.И. Баурова [и др.]. - Текст: непосредственный // Технология металлов. – 2021. – № 5. – С. 44–49.

62. Гринчар, Н. Г. О надежности гидропривода буровых машин транспортного строительства / Н. Г. Гринчар, А. С. Шошин. – Текст: непосредственный // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2023. – № 5. – С. 266–273.

63. Гринчар, Н. Г. Расчетно-динамическая модель гидропривода рабочих органов щебнеочистительных машин / Н. Г. Гринчар, Д. С. Федасов [и др.]. - Текст: непосредственный // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 514–520.

64. Гринчар, Н. Г. О влиянии пульсаций давления в гидроприводе на устойчивость и надежность функционирования / Н. Г. Гринчар, А. С. Шошин. - Текст: непосредственный // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях. Материалы международной научно-практической конференции. – Белгород. – 2022. – С 38–44.

65. Гринчар, Н. Г. Повышение надежности гидропривода щебнеочистительных машин / Н. Г. Гринчар, Д. С. Федасов [и др.]. - Текст: непосредственный // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 245–250.

66. Grinchar, N.G. Analysis of change in the state of hydraulic drive of machines in operation according to the diagnostic results / N. G. Grinchar, P. A. Sorokin [и др.]. - Текст: непосредственный // Scientia Iranica. – 2020. – 27 (1 B). – P. 295–301.

67. Гринчар, Н. Г. Повышение надежности подшипников качения / Н. Г. Гринчар, Н. В. Иванова. - Текст: непосредственный // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Сборник до-

кладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – 2019. – С. 213–215.

68. Гринчар, Н. Г. Повышение эксплуатационной надежности машин путем восстановления ресурсного параметра гидроагрегатов / Н. Г. Гринчар, А. А. Набоков. - Текст: непосредственный // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. 2019. – С. 218–220.

69. Гринчар, Н. Г. Основные направления повышения надежности приводов строительных и грузоподъемных машин в эксплуатационных условиях / Н. Г. Гринчар, Т. А. Попова. - Текст: непосредственный // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – 2019. – С. 236-238.

70. Гринчар, Н. Г. Повышение эксплуатационной надежности машин / Н. Г. Гринчар - Текст: непосредственный // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – 2019. – С. 244–246.

71. Гринчар, Н. Г. К вопросу о повышении надежности гидроприводов дорожных и строительных машин / Н. Г. Гринчар, А. О. Геращенко. - Текст: непосредственный // В сборнике: Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – 2019. – С. 195-197.

72. Нахапетян, Е. Г. Квалиметрия и диагностирование роботов / Е. Г. Нахапетян. - Текст: непосредственный // Экспериментальное исследование и диагностирование роботов. – Москва : Наука, 1981. – 176 с. – С.5 – 17.

73. Белянин, П. Н. Автоматический контроль и диагностика в гибких производственных системах / П. Н. Белянин. - Текст: непосредственный // Испытания, контроль и диагностирование гибких производственных систем. – Москва : Наука, 1988. – 78 с. – С. 13 -24.

74. Смирнов, Г. И. Диагностирование металлорежущего оборудования по кинематическим и динамическим параметрам / Г. И. Смирнов, В. Д. Фельдман. - Текст: непосредственный // Испытания, контроль и диагностирование гибких производственных систем. – Москва : Наука, 1988. – 124 с. – С. 55 – 59.

75. Котельников, В. С. Концепция оценки остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок / В. С. Котельников, А. Ю. Еремин [и др.]. - Текст: непосредственный // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – № 10. – С. 28 – 31.

76. Aksenov, Y. Online PD Diagnostic on Medium Voltage Motors and Cable Lines: Useful Tool for the Maintenance Manager / Y. Aksenov, I. Arces [и др.]. - Текст: непосредственный // Indianapolis, Indiana, USA. – 2004. – P. 35 – 47.

77. Aksenov, Y. P. Practical Results of On-Line Diagnostic Methods Synergy for Motors and Their Efficacy / Y. P. Aksenov, A. P. Proshletsov [и др.]. - Текст: электронный // IEEE Practical Results of On-Line Diagnostic Methods Synergy for Motors and Their Efficacy. – 2011. - №12344707: сайт. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6063676> (дата обращения: 09.08.2022). – Режим доступа: Электронная библиотека IEEEExplore.

78. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – Москва : Машиностроение, 1978. – 240 с. - Текст: непосредственный.

79. Фролов, К. В. Испытание, контроль и диагностирование оборудования гибких производственных систем / К. В. Фролов, И. М. Макаров [и др.]. - Текст: непосредственный // Испытания, контроль и диагностирование гибких производственных систем. – Москва : Наука, 1988. – С. 3–12.

80. Жулай, В. А. Определение параметров источников шума и вибрации

технологических машин / В. А. Жулай, Ю. Ф. Устинов [и др.] - Текст: непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 5. – С. 14-18.

81. Жулай, В. А. Вибрационное диагностирование карданных передач землеройно-транспортных машин / В. А. Жулай, Ю. Н. Спасибухов [и др.]. - Текст: непосредственный // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2022. – № 1. – С. 68-73.

82. Жулай, В. А. Анализ методик диагностики зубчатых передач / В. А. Жулай, В. Л. Тюнин [и др.]. - Текст: непосредственный // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2022. – № 2. – С. 88-90.

83. Старов, В. Н. Основы работоспособности технических систем / В. Н. Старов, В. А. Жулай [и др.]. - Текст: непосредственный // учебное пособие: Москва, 2021. – 271 с.

84. Жулай, В. А. Вибрационное диагностирование карданных передач строительных и дорожных машин / В. А. Жулай, В. Л. Тюнин [и др.]. - Текст: непосредственный // Информационные технологии и инновации на транспорте. Материалы 4-ой Международной научно-практической конференции. Под редакцией А. Н. Новикова. – 2019. – С. 367-371.

85. Патент № 2103668 Российская Федерация МПК G01M 15/02, G01M 15/00. Способ диагностики и прогнозирования технического состояния машин по вибрации корпуса: № 96100118: заявл. 01.03.1996: опубл. 24.01.1998 / В. Н. Костюков, С. Н. Бойченко, А. В. Костюков: заявитель: Костюков Владимир Николаевич. – 26 с.: ил. - Текст: непосредственный.

86. Патент № 228742 Российская Федерация МПК G01M 15/02, G01M 15/00. Способ диагностики и прогнозирования технического состояния двигателей: №2005118135: заявл. 10.06.2005: опубл. 10.06.2005 / А. А. Зобенко, В. А. Хабузов, В. Ф. Худяков: заявители: Зобенко Андрей Александрович, Хабузов Василий Арсеньевич, Худяков Владимир Федорович. – 5 с.: ил. - Текст: непосредственный.

87. Трюбер, С. С. Новый метод диагностики асинхронных двигателей / С. С. Трюбер. – Текст: непосредственный // Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 20: сб. тр. XX Междунар. науч. конф. – Т. 4. – Ярославль: ЯГТУ,

2007. – С. 117–118.

88. Патент № 2125716 Российская Федерация МПК G01H17/00 Устройство для виброакустической диагностики машин: №9702860/28: заявл. 26.02.1997: опубл. 27.01.1999 / М. Б. Диперштейн, А. Б. Качоровский: заявитель: Волгоградский государственный технический университет. – 10 с.: ил. - Текст: непосредственный.

89. Патент № 99120470 Российская Федерация МПК G01M 7/02 G01H 17/00. Способ диагностики технического состояния механизмов по вибрационным параметрам: № 99120470: заявл. 28.09.1999: опубл. 10.06.2000 / В. Г. Семичастнов, Н. И. Россеев, В. Л. Христензен, А. М. Марков, А. А. Александров, В. И. Чеботарев: заявитель: ООО "Самаратрансгаз" АО "ГАЗПРОМ". – 8 с.: ил. - Текст: непосредственный.

90. Патент № 2626388 Российская Федерация МПК G01M 13/00 Способ диагностики механизмов, агрегатов и машин на основе оценки микровариаций вращения вала: № 2016124620: заявл. 21.06.2016: опубл. 26.07.2017 / А. С. Колоколов, И. А. Любинский, В. В. Голованов, А. А. Земсков, С. С. Панов: заявитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук. – 6 с.: ил. - Текст: непосредственный.

91. Патент № 2202105 Российская Федерация МПК G01 H11/00. Устройство для виброакустической диагностики машин: № 97101013/28: заявл. 22.01.1997: заявл. 21.06.1998 опубл. 20.01.1999 / А. Б. Качоровский, В. Ю. Переяслов: заявитель: Волгоградский государственный технический университет. – 7 с.: ил. - Текст: непосредственный.

92. Патент № 2284021 Российская Федерация МПК G01M7/02, G01M13/00. Многофакторный способ диагностирования роторных, механических, подшипниковых и редукторных узлов: № 2004132288/28: заявл. 04.11.2004: опубл. 20.09.2006 / В. Ю. Тэттэр, В. И. Щедрин, В. С. Барайщук, Н. Г. Макаренко: заявитель: Тэттэр Владимир Юрьевич. – 8 с.: ил. - Текст: непосредственный.

93. Патент № 2351048 Российская Федерация МПК H02H 7/08 G01R 31/34. Способ функциональной диагностики асинхронных электродвигателей: № 2008100656: заявл. 09.01.2008, опубл. 27.03.2009 / В. А. Пономарев, И. Ф. Суворов,

А. В. Портнягин: заявитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Читинский государственный университет (ЧитГУ). – 8 с.: ил. - Текст: непосредственный.

94. Патент № 2300116 Российская Федерация МПК G01R31/34. Способ диагностики электродвигателей переменного тока и связанных с ними механических устройств: № 2005110648: заявл. 13.04.2005: опубл. 27.05.2007 / В. С. Петухов, В. А. Соколов, О. А. Григорьев, С. Н. Великий, А. А. Михель: заявитель: Общество с ограниченной ответственностью "Центр электромагнитной безопасности". – 8 с.: ил. - Текст: непосредственный.

95. 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. – 2 с.: ил. - Текст: непосредственный.

96. 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.

97. Патент № 2289802 Российская Федерация МПК G01M 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.

98. Ляткер, И. И. Система непрерывного контроля и диагностики синхронных машин / И. И. Ляткер, А. Г. Мордкович [и др]. - Текст: непосредственный // Электротехника – 1996. – №3. – С. 44–47.

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

100. Петухов, В.А Диагностика состояния электропривода. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. А Петухов, В. С. Соколов. - Текст: непосредственный // Новости электротехники. – 2005. – № 1. – С. 25–28.

101. Смирнов, В. И. Функциональная диагностика электрических машин на основе их полей рассеяния / В. И. Смирнов, В. В. Жарков [и др.]. - Текст: непосредственный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 8. – С. 49 – 52.

102. Cruz, S. M. Rotor cage fault diagnosis in three-phases induction motors, by the synchronous reference frame current Park's Vector Approach / S. M. Cruz, J. M. Cardoso. - Текст: непосредственный // International conference on electrical machines (ICEM-2000). – Espoo, Finland. – 2000. – P. 776 – 780.

103. Качин, С. И. Интеллектуальная бесконтактная диагностическая система для оценки механического состояния узлов токопровода электрических машин/ С. И. Качин [и др.]. - Текст: непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы надежности диагностики машин и механизмов: Тезисы докладов седьмой сессии международной научной школы. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 56–76.

104. Гольдберг, О. Д. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / О. Д. Гольдберг, И. М. Абдуллаев [и др.]. - Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 160 с. – Текст: непосредственный.

105. Гашимов, М. А. Диагностирование неисправностей электроэнергетических машин при межфазных замыканиях в обмотке статора / М. А. Гашимов, А. М. Гусейнов. - Текст: непосредственный // Электричество. – 1987. – № 4. – С. 47 –49.

106. Cruz, S. M. Rotor cage fault diagnosis in three-phases induction motors, by the synchronous reference frame current Park's Vector Approach / S. M. Cruz, J. M. Cardoso. - Текст: непосредственный // International conference on electrical machines (ICEM-2000). – Helsinki: Espoo -2000. – P. 776 – 780.

107. Kliman, G. B. Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors / G. B. Kliman. - Текст: непосредственный // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1988.– № 4. – P. 873 – 879.

108. Kral, C. Vienna monitoring method – detection of faulty rotor bars by means of a portable measurement system / C. Kral, F. Pirker. – Текст: непосредственный // International conference on electrical machines (ICEM-2000). – Helsinki: Espoo. – 2000. – P. 873 – 877.
109. Круглова, Т. Н. Метод анализа электроразрядной активности электрооборудования / Т. Н. Круглова, М. Э. Шошиашвили. - Текст: непосредственный // Результаты исследований – 2016. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2016. – С. 75–77.
110. Круглова, Т. Н. Нейросетевой анализ формы разрядных явлений турбогенератора / Т. Н. Круглова, Н. Н. Работалов [и др.]. – Текст: непосредственный // Интеллектуальные энергосистемы. – Томск, 2017. – Т. 2. – С. 46–48.
111. Jung, J. H. Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA / J. H. Jung, J. J. Lee [и др.]. - Текст: непосредственный // IEEE Trans. on Ind. Electron. 2006. – Vol. 53. – № 6. – P. 1842 – 1852.
112. Kumar, C. Experimental investigation on misalignment fault detection in induction motors using current and vibration signature analysis / C. Kumar, G. Krishnan [и др.]. - Текст: непосредственный // Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management (ABLAZE). – 2015. – P. 61–66.
113. Kral, C. Influence of rotor cage design on rotor fault detection by means of the Vienna Monitoring Method / C. Kral, F. Pirker [и др.]. - Текст: непосредственный // International conference on electrical machines (ICEM-2002). – Brugge (Belgium), 2002. – P. 234–256.
114. Смирнов, В. И. Автоматизированный комплекс для диагностики функционального состояния электрических машин / В. И. Смирнов, В. В. Жарков [и др.]. - Текст: непосредственный // Приборы и системы. Управление, контроль и диагностика. – 2000. – № 7. – С.81–83.
115. Zhang, J. Investigation of torque security problems in electrified vehicles / J. Zhang, A. Amodio [и др.]. - Текст: непосредственный // Dynamic systems and control conference. – 2015. – P. 1–8.

116. Zhang, J. Structural analysis for FDI of PMSM drive system in electric vehicles / J. Zhang, G. Rizzoni. - Текст: непосредственный // IEEE transportation electrification conference and expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). – 2015. – P. 1–7.
117. Zhang, J. Fault diagnosis for electric drive systems of electrified vehicles based on structural analysis / J. Zhang, H. Yao, G. Rizzoni. - Текст: непосредственный // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2016. – P. 99–110.
118. Thomson, W. T. Current signature analysis to detect induction motor faults / W. T. Thomson, M. Fenger. - Текст: непосредственный // IEEE Industry Applications Magazine. – 2001. – № 7. – P. 26–34.
119. Subbasis, N. A. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors: A Review / N. A. Subbasis, H. Toliyat, L. Xiaodong. - Текст: непосредственный // Vancouver, Canada. – 2005. – № 20 (4). – P. 719–729.
120. Moiseeva, R. Problems of Improving the Reliability of Electric Machines/ R. Moiseeva, R. Samigullina [и др.]. - Текст: непосредственный // Bulletin of Kazan Technological University. – 2017. – № 3 (17). – P. 117–119.
121. Delmotte, C. Comparison of two modeling method for induction machine study: application to diagnosis / C. Delmotte, H. Henaо [и др.]. - Текст: непосредственный // International conference on electrical machines (ICEM-2002): Conference Record / Old St. Jan Conference Center. - Brugge (Belgium). – 2002. – P. 45–56.
122. Kral, C. Vienna monitoring method – detection of faulty rotor bars by means of a portable measurement system / C. Kral, F. Pirker. - Текст: непосредственный // International conference on electrical machines (ICEM-2000). - Espoo, Finland: Helsinki University of technology. – 2000. – P. 873–877.
123. Thorsen, O. V. Failure identification and analysis for high-voltage induction motor in the petrochemical industry / O. V. Thorsen, M. Dalva. - Текст: непосредственный // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1999. - Vol. 35 (4). – P. 810–818.
124. Kral, C. Influence of rotor cage design on rotor fault detection by means of the Vienna Monitoring Method / C. Kral, F. Pirker [и др.]. - Текст: непосредственный // International conference on electrical machines (ICEM-2002): Conference Record / Old St.

Jan Conference Center. – Brugge (Belgium). – 2002. – P. 475–487.

125. Здор, И. Е. Анализ методов диагностики асинхронных короткозамкнутых двигателей / И. Е. Здор, В. А. Мосьпан [и др.]. - Текст: непосредственный // Проблемы создания новых машин и технологий: Науч. тр. Кременчугского гос. политехн. ун-та. – 1998. – Вып. 2. – С. 65–76.

126. Ляткер, И. И. Система непрерывного контроля и диагностики асинхронных электродвигателей / И. И. Ляткер, А. Г. Мордкович [и др.]. - Текст: непосредственный // Электротехника. – 1997. – № 5. – С. 64–77.

127. Никиян, Н. Г. Способ и установка для диагностики короткозамкнутых клеток электрических машин / Н. Г. Никиян, М. П. Саликов. - Текст: непосредственный // Электрические станции. – 1999. – № 3. – С. 60–62.

128. 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.

129. 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.

130. Круглова, Т. Н. Архитектура киберфизической системы диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронного комплекса скользящей опалубки / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Результаты исследований - 2020 : материалы V Национальной конф. профессорско-преподавательского состава и научных работников. - Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2020. – С. 18–21.

131. Мозгалевский, А. В. Техническая диагностика (непрерывные объекты). Учебное пособие для вузов / А. В. Мозгалевский, Д. В. Гаскаров. – Москва : Высшая школа, 1975. – 207 с. - Текст: непосредственный.

132. Давыдов, П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем / П. С. Давыдов. – Москва : Радиосвязь, 1988. – 256 с. - Текст: непосредственный.

133. Фролов, К. В. Испытание, контроль и диагностирование оборудования гибких производственных систем / К. В. Фролов, И. М. Макаров [и др.]. - Текст: непосредственный // Испытания, контроль и диагностирование гибких производственных систем. – Москва : Наука. 1988. – 274 с. – С. 3–12.

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

135. 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.

136. Круглова, Т. Н. Диагностирование и прогнозирование состояния мехатронных объектов (с применением методов искусственного интеллекта): монография / Т. Н. Круглова. – Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2012. – 132 с. - Текст: непосредственный.

137. Круглова, Т. Н. Диагностирование и прогнозирование технического состояния технологического оборудования в условиях нечеткой информации / Н. А. Глебов, Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – № 10. – С. 47–53.

138. Жирабок, А. Н. Диагностирование датчиков подводных роботов / А. Н. Жирабок, А. М. Пасарец. - Текст: непосредственный // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 9. – С. 15–21.

139. Мироновский, Л. А. Диагностирование линейных систем методом комплементарного сигнала / Л. А. Мироновский. - Текст: непосредственный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 5. – С. 52–57.

140. Надежность и эффективность в технике: Т. 9. Техническая диагностика / под общ. ред. В. В. Клюева, П. П. Пархоменко. – Москва : Машиностроение, 1987. – 352 с. - Текст: непосредственный.

141. Гейер, В. Г. Гидравлика и гидропривод: учебное пособие для вузов. – 3-е изд., пераб. и доп. / В. Г. Гейер, В. С. Дулин [и др.]. – Москва : Недра, 1991. – 331 с. - Текст: непосредственный.
142. Дрекслер, П. Проектирование и сооружение гидроустановок: Учебный курс по гидравлике. В 4-х т. Т.3 / П. Дрекслер, Х. Фаатц, Ф. Файхт. – Гамбург: Маннесманн Рексрот, 1988. – 376 с. - Текст: непосредственный.
143. Иоффе, А. М. Гидравлическое оборудование металлургических цехов / А. М. Иоффе, О. Н. Кукушкин [и др.]. – Москва: Металлургия, 1989. – 248 с. – Текст: непосредственный.
144. Грищенко, В. И. Критерии оценки эффективности комбинированных систем приводов / В. И. Грищенко В. С. Сидоренко. - Текст: непосредственный // Актуальные проблемы науки и техники. 2023. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону. – 2023. – С. 1199.
145. Ивлиев, Е. А. Математическая модель электрогидравлического актуатора / Е. А. Ивлиев, В. И. Грищенко [и др.]. - Текст: непосредственный // Актуальные проблемы науки и техники - 2023. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону. – 2023. – С. 1202–1203.
146. Медведев, Д. Д. Адаптивные гидро- и пневмоприводы технологического оборудования / Д. Д. Медведев, Е. А. Ивлиев [и др.]. - Текст: непосредственный // Актуальные проблемы науки и техники - 2022. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону. – 2022. – С. 1005–1006.
147. Лавринович, В. В. Мехатронный модуль нагружения и диагностики гидросистемы / В. В. Лавринович, В. И. Грищенко. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы науки и техники - 2021. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Ростов-на-Дону – 2021. – С. 1152–1153.
148. Prikhodko, S. P. High-speed pneumomechanical drive of the executive movements of machine mechanisms / S. P Prikhodko V. S. Sidorenko [и др.]. - Текст: непосредственный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - "Dynamics of Technical Systems, DTS 2020" – 2021. – P. 012015.

149. Rakulenko, S.V. Dependent twin-engine hydraulic drive of the drilling rig with a mechano-hydraulic variable pump control circuit / S. V Rakulenko, V. I. Grishchenko [и др.]. - Текст: непосредственный // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018. – Lecture notes in mechanical engineering. – 2019. – С. 331–339.

150. Бабенков, Ю. И. Методы повышения эффективности гидравлических приводов, работающих в тяжёлых условиях эксплуатации / Ю. И. Бабенков, А. И. Озерский [и др.]. - Текст: непосредственный // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2021. - № 12. - С. 37–42.

151. Tseligorov, N. A. Improving the efficiency of dynamic modes of electro-hydraulic drive operation / N. A. Tseligorov, A.V Tchubukin [и др.]. - Текст: непосредственный // Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. – 2020. – С. 9111947.

152. Сидоренко, В. С. Исследование гидравлического контура управления адаптивного гидропривода подачи инструмента мобильной буровой машины / В. С. Сидоренко, В. И. Грищенко [и др.]. - Текст: непосредственный // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 13–23.

153. Башта, Т. М. Техническая диагностика гидравлических приводов. – Москва : Машиностроение, 1989. – 423 с. - Текст: непосредственный.

154. Кравченко, В. М. Техническое диагностирование механического оборудования / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров [и др.]. – Донецк: Юго – Восток, 2007. – 447 с. - Текст: непосредственный.

155. Седуш, В. Я. Надежность, ремонт и монтаж металлургических машин: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Киев : НМК ВО, 1992. – 368 с. - Текст: непосредственный.

156. Богдан, Н. В. Техническая диагностика гидросистем / Н. В. Богдан, М. И. Жилевич [и др.]. – Минск: Белавтотракторостроение, 2000. – 120 с. - Текст: непосредственный.

157. Алексеева, Т. В. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т. В. Алексеева, В. Д. Бабанская [и др.]. – Москва : Машиностроение. 1989. – 264 с. -

Текст: непосредственный.

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

159. Закиров, Р. Г. Прогнозирование технического состояния бортового радиоэлектронного оборудования / Р. Г. Закиров. - Текст: непосредственный // Москва : Труды МАИ. - № 85 - С. 1 - 17.

160. Пауков, Д. Прогнозирование с помощью искусственных нейронных сетей: сайт. - URL: <http://paukoff.fromru.com/neuro/wneuro/index.html> (дата обращения 15.10.2017). - Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

161. 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.

162. Baheti, R. Cyber-physical Systems / R. Baheti, H. Gill. - Текст: непосредственный // IEEE Control Systems Society. - 2011. - P. 161–166.

163. Monostori, L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and challenges / L. Monostori - Текст: непосредственный // 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems. - Procedia CIRP. - 2014. - № 17. - P. 9 - 13.

164. Babiceanu, R. F. Big Data and Virtualization for Manufacturing Cyber-Physical Systems: A Survey of The Current Status and Future Outlook / R. F. Babiceanu, R. Seker. - Текст: непосредственный // Computers in Industry. - 2016. - № 81. - P. 128 - 37.

165. Oks, S. J. An Application Map for Industrial Cyber-Physical Systems: Industrial Internet of Things / S. J. Oks. - Текст: непосредственный // Springer International Publishing. - 2017. - P. 21 - 46.

166. Lee, E. A. Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate/ E .A. Lee - Текст: непосредственный // NSF Workshop On Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadma. - Austin. - 2006. - P. 1–9.

167. Lee, J. A. Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems / J. Lee, B. Bagheri, H-A Kao. - Текст: непосредственный // Manufacturing Letters. – 2015. – № 3. – P. 18–23.
168. Hirsch-Kreinsen, H. Digitization of Industrial Work: Development Paths and Prospects / H. Hirsch-Kreinsen. – Текст: непосредственный // Journal for Labour Market Research. – 2016. – № 49 (1). – P. 1–14.
169. Lee, E. A. Cyber Physical Systems: Design Challenges / E. A. Lee. - Текст: непосредственный // IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing. – 2008. – P. 363–369.
170. Herterich, M. M. The Impact of Cyber- physical Systems on Industrial Services in Manufacturing / M. M. Herterich, F. Uebernicket, W. Brenner. - Текст: непосредственный // Procedia CIRP. – 2015 – P. 3–8.
171. Monostori, L. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges / L. Monostori. - Текст: непосредственный // Procedia CIRP. – 2014. – № 17. – P. 9–13.
172. Choi, M. Cyber- Physical Systems As The Technical Foundation For Problem Solutions In Manufacturing, Logistics And Supply Chain Management / M. Choi, S. Sarma [и др.]. - Текст: непосредственный // Proceedings of the 5th International Conference on the Internet of Things (IOT). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – 2015. – P. 12–19.
173. Lee, E. A. Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate/ E.A. Lee. -Текст: непосредственный // NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadma. – Austin. - 2006. – P. 1–9.
174. Broy, M. Cyber-Physical Systems: Imminent Challenges / M. Broy, M.V. Cengarle, E. Geisberger. – Текст: непосредственный // 17th Monterey Workshop: Large-Scale Complex IT Systems. Development, Operation and Management. – 2012. – P. 1–28.
175. Shrouf, F. Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm / F. Shrouf, J. Ordieres, G. Miragliotta. - Текст: непосредственный // IEEE International Conference on

Industrial Engineering and Engineering Management. IEEE. – 2014. – P. 697–701.

176. Negri, E. A. Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems / E. Negri, L. Fumagalli, M. Macchi. - Текст: непосредственный // Procedia Manufacturing. – 2017. – № 11. – P. 39–48.

177. Geisberger, E. Living in a Networked World: Integrated Research Agenda, Cyber-Physical Systems / E. Geisberger, M. Bray – Текст: непосредственный // München: ACA. – 2015. – P. 15–29.

178. Oks, S. J. Engineering Industrial Cyber- Physical Systems: An Application Map Based Method / S. J. Oks, A. Fritzsche, K. M. Mösllein. - Текст: непосредственный // Procedia CIRP. – 2018. – № 72. – P. 456–61.

179. Caputo, A. The Internet of Things in Manufacturing Innovation Processes: Development and Application of a Conceptual Framework / A. Caputo, G. Marzi, M. M. Pellegrini. - Текст: непосредственный // Business Process Management Journal. – 2016. – № 22 (2). – P. 383–402.

180. Brettel, M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective / M. Brettel, N. Friederichsen [и др.]. - Текст: непосредственный // International Journal of Science, Engineering and Technology. – 2014. – № 8 (1). – P. 37–44.

181. Kim, K. D. Cyber-physical systems: A perspective at the centennial / K. D. Kim, P. R. Kumar. - Текст: непосредственный // IEEE 100. – 2012. – Special Centennial Issue. – P. 1287–1308.

182. 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.

183. 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. – С. 37–42.

184. Круглова, Т. Н. Киберфизическая система диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронного комплекса скользящей опалубки / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Сборник материалов по результатам исследовательских стажировок в рамках программ "Михаил Ломоносов" и "Иммануил Кант". - Москва : Издательство «ФЛИНТА», 2020. – № 16 (2020). – С. 86–90.

185. Круглова, Т. Н. Постановка задачи оптимизации работы строительного мобильного робота с учетом его технического состояния / Т. Н. Круглова, В. А. Мохов, А. С. Власов. - Текст: непосредственный // Интеграция науки и практики как механизм развития отечественных наукоемких технологий производства : сб. науч. ст. по материалам VIII Всерос. науч.-практ. конф – Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2020. – С. 126–133.

186. Kim, S. CPS (Cyber Physical System) based Manufacturing System Optimization / S. Kim, S. Hyun, H. Park. - Текст: непосредственный // Sungbum (2017): Procedia Computer Science. – № 122. – P. 518–524.

187. 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.

188. 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.

189. Kruglova, T. Cyber-Physical System of Intelligent Diagnosis of Generator Winding Insulation / T. Kruglova, I. Yaroshenko [и др.]. - Текст: электронный // Proceedings - 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. – 2018: сайт. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8728883> (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

190. Круглова, Т. Н. Киберфизическая система диагностирования и прогнозирования технического состояния электрооборудования / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Результаты исследований - 2017. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2017. – С. 90–92.

191. Круглова, Т. Н. Метод нейросетевого прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-22. – Псков: ППИ, 2009. – Т. 6. – С. 33 – 35.

192. 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.

193. 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.

194. 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.

195. Körner, T. W. Fourier Analysis / Körner T. W. - Текст: непосредственный.

– Cambridge University Press. – 1988. – 342 p.

196. Kruglova, T. N. Wavelet analysis for fault diagnosis of electrical machines using current signals / T. N. Kruglova. – Текст: электронный // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) - Chelyabinsk: IEEE, 2016: сайт. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7911652> (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

197. Daubechies, I. The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis / I. Daubechies. - Текст: непосредственный // IEEE Trans. Inform. Theory. – 1992. – P. 961–1004.

198. Круглова, Т. Н. Диагностирование и прогнозирование технического состояния технологического оборудования в условиях нечеткой информации / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов. - Текст: непосредственный // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – № 10. – С. 47-54.

199. Круглова, Т. Н. Робототехнические и мехатронные комплексы для строительства подземных сооружений и трубопроводов большого диаметра / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов, М. Э. Шошиашвили и др. - Текст: непосредственный // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – № 10. – С. 57–61.

200. Круглова, Т. Н. Нейросетевой метод прогнозирования технического состояния горного робототехнического комплекса / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов. - Текст: непосредственный // Изв. вузов. Сев-Кавк. регион. Техн. науки. – 2007. – Спец. вып. Проблемы мехатроники – 2006. – С. 21–25.

201. Круглова, Т. Н. Мехатронная система контроля и оценки технического состояния горного робототехнического комплекса / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Изв. вузов. Сев-Кавк. регион. Техн. науки. – 2007. – Спец. вып. Проблемы мехатроники – 2006. – С. 25 – 28.

202. Круглова, Т. Н. Контроль и диагностирование аппаратуры управления угледобывающим комбайном / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов. - Текст: непосредственный // Новые технологии управления движением технических объектов: сб. статей по материалам 6-й Междунар. науч.-техн. конф. – Новочеркасск. – 2003. – Вып. 4. – С. 12-13.

203. Круглова, Т. Н. Методы и средства диагностирования горного робототехнического комплекса / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Новые технологии управления движением технических объектов: сб. статей по материалам 7-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск. – 2004. – Вып. 5. – С. 23–26.

204. Круглова, Т. Н. Нечеткая модель для оценки технического состояния механической части горного робототехнического комплекса / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Студенческая научная весна – 2005: сб. науч. тр. аспирантов и студентов ЮРГТУ (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ). – 2005. – С. 193–195.

205. Круглова, Т. Н. Модель технического диагностирования горного робототехнического комплекса / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Робототехника, мехатроника и интеллектуальные системы: материалы первой всерос. науч. конф. студентов и аспирантов. – Таганрог. – 2005. – С. 35-38.

206. Круглова, Т. Н. Алгоритм определения вероятности отказов горного робототехнического комплекса с применением аппарата нечеткой логики /Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Новые технологии управления движением технических объектов: сб. статей по материалам 8-й Междунар. науч. – практ. конф. – Новочеркасск – 2006. – Вып. 6. - С. 3-6.

207. Круглова, Т. Н. Модель и алгоритм оценки работоспособности горного робототехнического комплекса / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 19: сб. тр. XIX Междунар. науч. конф. – Воронеж. – 2006. – Т. 5. – С. 67–69.

208. Круглова, Т. Н. Прогнозирование технического состояния горного робототехнического комплекса с помощью искусственных нейронных сетей / Т. Н. Круглова, Н. Н. Круглов. - Текст: непосредственный // Научно-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых, шахтного и подземного строительства: сб. науч. трудов. – Новочеркасск. – 2006. – С. 83 – 88.

209. Круглова, Т. Н. Применение нейронных сетей в прогнозировании технического состояния горного робототехнического комплекса / Т. Н. Круглова, Н.

А. Глебов. - Текст: непосредственный // Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы-2006: материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф. – Таганрог – 2006. – Т. 2. – С. 283 – 287.

210. Круглова, Т. Н. Мехатронная система диагностирования и прогнозирования технического состояния горного робототехнического комплекса / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов. - Текст: непосредственный // Первая Российская мультikonференция по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление: материалы 3-й науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург. – 2006. – С. 272–273.

211. Круглова, Т. Н. Алгоритм поиска неисправностей горного робототехнического комплекса / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Сборник статей и сообщений по материалам 55-й науч. – техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных работников, аспирантов и студентов университета. – Новочеркасск : ЛИК. – 2006. – С. 18–20.

212. Круглова, Т. Н. Система технического диагностирования робототехнического комплекса / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов. - Текст: непосредственный // Перспективные системы и задачи управления: материалы 2-й Всерос. науч.-практ. конф. – Таганрог. – 2007. – С. 127–129.

213. Круглова, Т. Н. Моделирование информационно-измерительной системы технического диагностирования робота / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Математические методы в технике и технологиях ММТТ– 20: сб. тр. XX Междунар. науч. конф. – Ярославль. – 2007. – Т. 4. – С. 121 – 122.

214. Круглова, Т. Н. Информационное обеспечение технического диагностирования мехатронных модулей движения / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов. - Текст: непосредственный // Мехатроника, автоматизация, управление – 2007: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Таганрог. – : 2007. – С. 54–58.

215. Круглова, Т. Н. Микропроцессорная подсистема сбора и обработки диагностической информации / Т. Н. Круглова, Н. Н. Круглов. - Текст: непосредственный // Актуальные проблемы высшего профессионального образования. – Новочеркасск : ЛИК. – 2007. – С. 110–114.

216. Круглова, Т. Н. Автоматизированные проходческие и роботизированные трубоукладочные комплексы / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов, М. Э. Шошиашвили, и др. - Текст: непосредственный // Научно-педагогические школы ЮРГТУ (НПИ): История. Достижения. Вклад в отечественную науку: сб. науч. ст. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск. – 2007. – Т. 2. – С. 135 – 143.

217. Круглова, Т. Н. Метод нейро-нечеткого диагностирования мехатронного модуля движения / Т. Н. Круглова, Н. Н. Круглов. - Текст: непосредственный // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-21: сб. тр. XXI Междунар. науч. конф. – Саратов. – 2008. – Т. 2. – С. 224–226.

218. Круглова, Т. Н. Нейро-нечеткий метод повышения эффективности функционирования мехатронных модулей движения горного оборудования / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Мехатроника-2008: материалы IV Междунар. научно-практ. коллоквиума. – Новочеркасск. – 2008. – С. 21–24.

219. 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.

220. 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.

221. Круглова, Т. Н. Метод лазерной диагностики динамической формы ротора гидрогенератора / Т. Н. Круглова, И. В. Ярошенко [и др.]. - Текст: электронный // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 1: сайт. – URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_39_Kruglova.pdf_30d454bee1.pdf (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

222. Круглова, Т. Н. Метод нейросетевого прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный //

Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-22 : сб. тр. XXII Международ. науч. конф. – Псков. – 2009. – Т. 6, секц. 6, 7. – С. 33–35.

223. Круглова, Т. Н. Интеллектуальная система диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных модулей движения / Т. Н. Круглова, Н. Н. Круглов. - Текст: непосредственный // Перспективы развития Восточного Донбасса : сб. науч. тр. по материалам 58-й регион. науч.-практ. конф. – Новочеркасск : ЛИК. – 2009. – Ч. 2. – С. 212–217.

224. Круглова, Т. Н. Интеллектуальный блок диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных объектов / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Мехатроника и робототехника. Современное состояние и тенденции развития : сб. тез. и статей Всерос. конф. с элементами науч. школы для молодежи. – Новочеркасск : ЛИК, 2010. – С. 45–48.

225. Круглова, Т. Н. Нечеткий экспертный метод диагностирования технического состояния очистного комбайна / Т.Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. Гірнично-електромеханічна / ДВНЗ Донецк. нац. техн. ун-т. – Донецьк. – 2010. – Вип. 18 (172). – С. 179–185.

226. Круглова, Т. Н. Интеллектуальный метод спектртокового диагностирования электропривода на основе бесщеточного двигателя постоянного тока // Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Микроэлектронные информационно - управляющие системы и комплексы : сб. тез. и статей Всерос. науч. шк. – Новочеркасск : ЛИК. – 2011. – С. 161–164.

227. Круглова, Т. Н. Нейро-нечеткий метод диагностики сервопривода на основе спектрального анализа потребляемого тока / Т. Н. Круглова. -Текст: непосредственный // Сборник материалов научного семинара стипендиантов программ "Михаил Ломоносов II и "Иммануил Кант II". – Москва. – 2011. – С. 97–100.

228. Круглова, Т. Н. Нейросетевое прогнозирование технического состояния электропривода мехатронных систем по спектру потребляемого тока / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Итоги и перспективы развития Российско-

Германского сотрудничества в области мехатроники : сб. тез. и статей Всерос. науч. школы для молодежи. – Новочеркасск : ЛИК, 2011. – С. 98–101.

229. Круглова, Т. Н. Методы и средства диагностирования и прогнозирования технического состояния модулей движения мехатронных систем / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Итоги и перспективы развития Российско-Германского сотрудничества в области мехатроники : материалы лекций Всерос. науч. школы для молодежи. – Новочеркасск : ЛИК, 2011. – С. 9–23.

230. Круглова, Т. Н. Диагностирование BLDC- привода на основе спектрального анализа потребляемого тока / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Кибернетика электрических систем : сб. тез. и статей всерос. молодеж. науч. шк. – Новочеркасск : Лик, 2012. – С. 42–45.

231. Круглова, Т. Н. Интеллектуальное диагностирование мехатронного модуля движения на основе спектрального анализа потребляемого тока / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления : сб. материалов XI Всерос. науч. конф. молодых ученых, студентов и аспирантов, посвящ. 60-летию ТТИ ЮФУ (ТРТИ-ТРТУ). – Таганрог : Изд-во ЮФУ, 2012. – Т. 1. – С. 149–150.

232. Круглова, Т. Н. Метод интеллектуального контроля технического состояния электромеханических мехатронных модулей движения / Т. Н. Круглова, Г. А. Мурадян. - Текст: непосредственный // Технологія-2013 : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. – Северодонецьк. – 2013. – С. 90–93.

233. Круглова, Т. Н. Нейро-нечеткая система диагностирования технического состояния мехатронного модуля движения / Т. Н. Круглова, Г. А. Мурадян. - Текст: непосредственный // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-26 : сб. тр. XXVI Междунар. науч. конф. – Н. Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т, 2013. – Т. 8. Секц. 6, 7, 8, 9. – С. 92.

234. Круглова, Т. Н. Прогнозирование технического состояния модулей движения мехатронных систем / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // МКПУ-2013: материалы 6-й Всерос. мультikonф. по проблемам управления. – Ростов-на-

Дону: изд-во Южного федерального университета, 2013. – Т. 2. – С. 188–191.

235. Круглова, Т. Н. Интеллектуальное диагностирование и прогнозирование технического состояния сложных мехатронных объектов / Т. Н. Круглова, Г. А. Мурадян. - Текст: непосредственный // Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013): сб. тр. III Междунар. науч. конф. – Саратов : Издательский дом "Райт-Экспо", 2013. – Т. 1. – С. 140–142.

236. Круглова, Т. Н. Устройство тестового диагностирования обмоток электродвигателей роботов / Т. Н. Круглова, А. А. Терлецкий. - Текст: непосредственный // Робототехника и искусственный интеллект : материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Красноярск: Центр информации, ЦНИ "Монография", 2013. – С. 8–10.

237. Круглова, Т. Н. Применение экспертных данных для диагностирования мехатронных объектов / Т. Н. Круглова, Г. А. Мурадян, В. С. Коваленко. - Текст: непосредственный // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей. САД-2013 : Междунар. сб. науч. тр. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – Вып. 11. – С. 175–185.

238. Круглова, Т. Н. Интеллектуальное диагностирование технического состояния высокомоментного электропривода / Т. Н. Круглова, В. С. Коваленко. - Текст: непосредственный // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-27 : сб. тр. XXVII Междунар. науч. конф. : в 12 т. – Тамбов : Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. – Т. 6. – С. 108–111.

239. Круглова, Т. Н. Модель интеллектуального управления техническим состоянием высоковольтного электрооборудования по результатам диагностирования / Т. Н. Круглова, В. С. Коваленко, Д. А. Литвин. - Текст: непосредственный // Интеллектуальные энергосистемы : материалы II междунар. молодеж. форума. – Томск, 2014. – Т. 2. – С. 153-156.

240. Круглова, Т. Н. Интеллектуальный метод диагностирования технического состояния высоковольтного электрооборудования / Т. Н. Круглова, В. С. Коваленко, Д. А. Литвин. - Текст: непосредственный // Электроэнергетика глазами молодежи : науч. тр. V Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. –

Томск : ТГУ, 2014. – Т. 2. – С. 7–11.

241. Круглова, Т. Н. Интеллектуальный метод поиска неисправностей механических устройств на основе спектрального анализа потребляемого тока / Т.Н. Круглова, В. С. Ковалено. - Текст: непосредственный // Научно-техническая конференция и выставка инновационных проектов, выполненных вузами и научными организациями ЮФО в рамках участия в реализации федеральных целевых программ и внепрограммных мероприятий, заказчиком которых является Минобрнауки России : сб. материалов конф. – Новочеркасск: Лик, 2014. – С. 183–185

242. Круглова, Т. Н. Управление режимами работы электрооборудования по результатам прогнозирования технического состояния / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Научно-техническая конференция и выставка инновационных проектов, выполненных вузами и научными организациями ЮФО в рамках участия в реализации федеральных целевых программ и внепрограммных мероприятий, заказчиком которых является Минобрнауки России : сб. материалов конф. – Новочеркасск: Лик, 2014. – С. 39–41.

243. Круглова, Т. Н. Интеллектуальное многопараметрическое диагностирование высоковольтного электрооборудования / Т. Н. Круглова, В. С. Коваленко, Д. А. Литвин. - Текст: непосредственный // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2015. – № 3. – С. 21–27.

244. Круглова, Т. Н. Нейро-нечеткая модель диагностирования технического состояния турбогенератора / Т. Н. Круглова, В. С. Коваленко. - Текст: непосредственный // Интеллектуальные энергосистемы: материалы III междунар. молодеж. форума. – Томск, 2015. – Т. 3. – С. 27–30.

245. Круглова, Т. Н. Информационная система диагностирования и прогнозирования технического состояния электрооборудования / Т. Н. Круглова, Д. А. Литвин. - Текст: непосредственный // Сборник научных трудов Sworld. – 2015. – Т. 4, № 3 (40). – С. 55–60.

246. Круглова, Т. Н. Fault Diagnosis Method of BLDS Actuator using Stator Current

Signals / Т. Н. Круглова, Д. А. Литвин. - Текст: непосредственный // SWorld Journal : International periodic scientific journal. - 2015. – Vol. J21510 (9). – P. 64–69.

247. Kruglova, T. N. Simulation Mathematical Model of Mechatronic Sliding Formwork for Monolithic Tower with Variable Cross Section / T. N. Kruglova, A. G. Bulgakov, D. Saufeddine. - Текст: непосредственный // Advanced Construction and Building Technology for Society : Proceedings of the CIB*IAARC W119 CIC 2016 Workshop. – Germany: Technische Universiti Munchen (TUM), 2016. – P. 8–13.

248. Круглова, Т. Н. Робототехнические и мехатронные системы : учебное пособие на английском языке для студентов, обучающихся по направлению 15.04.06 Мехатроника и робототехника / А. Г. Булгаков, Т. Н. Круглова, М. Э. Шошиашвили. – Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2019. – 194 с. - Текст: непосредственный.

249. Круглова, Т. Н. Интеллектуальное управление технологическим процессом по результатам диагностирования высоковольтного электрооборудования / Т. Н. Круглова, В. С. Коваленко, Д. А. Литвин. - Текст: непосредственный // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-28 : сб. тр. XXVIII Междунар. науч. конф. – Рязань : Рязанск. гос. радиотехн. ун-т, 2015. – Т. 10. – С. 239–242.

250. Круглова, Т. Н. Поиск неисправностей электропривода при различных условиях нагружения / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Результаты исследований - 2015: материалы I Национальной конф. профессорско-преподавательского состава и науч. работников ЮРГПУ (НПИ). – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2015. – С. 66–68.

251. Круглова, Т. Н. Обоснование диагностического подхода к повышению эксплуатационной надежности приводов автоматизированных систем / М. Э. Шошиашвили, Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Результаты исследований - 2015 : материалы I Национальной конф. профессорско-преподавательского состава и науч. работников ЮРГПУ (НПИ). – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2015. – С. 68–70.

252. Круглова, Т. Н. Мехатронные стационарные системы неразрушающего контроля / Т. Н. Круглова, А. В. Недовесов, П. А. Скубовская. - Текст: непосредственный // Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности

отечественной науки : сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. – Уфа : Аэтерна, 2023. – С. 16–18.

253. Круглова, Т. Н. Интеллектуальное диагностирование технического состояния трансформаторов по параметру вибрации / Т. Н. Круглова, И. В. Ярошенко, М. А. Мельников. - Текст: непосредственный // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины : сб. науч. ст. по материалам XII Междунар. науч.-техн. конф. "Вибрация-2016". – Курск. – 2016. – Ч. 1. – С. 38–46.

254. Круглова, Т. Н. Интеллектуальная модель диагностирования турбогенераторов по параметрам электроразрядной активности / Т. Н. Круглова, И. В. Ярошенко, Н. Н. Работалов. - Текст: непосредственный // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины : сб. науч. ст. по материалам XII Междунар. науч.-техн. конф. "Вибрация-2016". – Курск, 2016. – Ч. 1. – С. 280–288.

255. Круглова, Т. Н. Применение аппарата нечеткой логики для вибрационной диагностики электрооборудования / Т. Н. Круглова, Н. Н. Работалов, М. А. Мельников. - Текст: непосредственный // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 4, № 3. – С. 3–7.

256. Круглова, Т. Н. Управление электрооборудованием по результатам диагностирования и прогнозирования его технического состояния / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Проблемы и перспективы развития науки в России и мире : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: АЭТЭРНА, 2016. – Ч. 5. – С. 134–136.

257. Круглова, Т. Н. Подсистема сбора диагностической информации о состоянии приводов беспилотных летательных аппаратов / Т. Н. Круглова, В. С. Коваленко. - Текст: непосредственный // Инновации, технологии, наука : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : Аэтерна, 2017. – Ч. 3. – С. 62–65.

258. Круглова, Т. Н. Мехатронные системы для неразрушающей диагностики / Т. Н. Круглова, А. В. Недовесов, П. А. Скубовская. - Текст: непосредственный // Проблемы и тенденции научных преобразований в условиях трансформации общества : сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Омск. – 2023. – С. 19-21.

259. Круглова, Т. Н. Определение технического состояния электропривода

с учетом условий его нагружения / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Сборник материалов научного семинара стипендиантов программ "Михаил Ломоносов" и "Иммануил Кант". - Москва : Флинта, 2017. - № 13. – С. 108–115.

260. Круглова, Т. Н. Киберфизическая система диагностирования и прогнозирования технического состояния электрооборудования / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Результаты исследований - 2017 : материалы III Национальной конф. профессорско-преподавательского состава и науч. работников ЮРГПУ (НПИ). – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2017. – С. 90–92.

261. Круглова, Т. Н. Нейросетевой анализ формы разрядных явлений турбогенератора / Т. Н. Круглова, Н. Н. Работалов, М. А. Мельников. - Текст: непосредственный // Интеллектуальные энергосистемы : материалы V Междунар. молодеж. форума. –Томск. – 2017. – Т. 2. – С. 46–48.

262. Круглова, Т. Н. Метод диагностирования изоляции обмоток турбогенераторов / Т. Н. Круглова, И. В. Ярошенко, Н. Н. Работалов. - Текст: непосредственный // Кибернетика энергетических систем : сб. материалов XL сессии семинара по тематике «Электроснабжение». – Новочеркасск : Лик, 2018. – С. 136–141.

263. Круглова, Т. Н.. Мехатронные системы в специализированной технике : учебное пособие на английском языке для студентов, обучающихся по направлению 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» / Т. Н. Круглова, И. С. Шошиашвили [и др.]. - Текст: непосредственный // Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М. И. Платова. – Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2019. – 191 с.

264. Круглова, Т. Н.. Нейронная сеть классификации диагностических сигналов электрооборудования / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Результаты исследований - 2016 : материалы II Национальной конф. профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ(НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2016. – С. 73–75.

265. Круглова, Т. Н. Метод анализа электроразрядной активности электрооборудования / М. Э. Шошиашвили, Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Ре-

зультаты исследований - 2016 : материалы II Национальной конф. профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ). – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2016. – С. 75-77.

266. Круглова, Т. Н. Сравнительный анализ методов управления техническим состоянием мехатронных модулей движения по результатам диагностирования / Т. Н. Круглова - Текст: непосредственный // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. - 2009. – Спец. вып.: Мехатроника. Современное состояние и тенденции развития : Всерос. науч. школа для молодежи. – Новочеркасск. – С. 47–53.

267. 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.

268. 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.

269. Kruglova, T. N. Intelligent Diagnosis of the Electrical Equipment Technical Condition / T. N. Kruglova. - Текст: непосредственный // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 219–224.

270. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов: учебное пособие / А. Б. Сергиенко. - Текст: непосредственный // Санкт-Петербург : БХВ – Петербург, 2011. – 768 с.

271. 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.

272. Круглова, Т. Н.. Исследование технического состояния электропривода при различных условиях нагружения / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный

// Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 3. – С. 92 – 113.

273. 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: [URL:https://doi.org/10.1051/mateconf/201825103060](https://doi.org/10.1051/mateconf/201825103060) (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

274. Peter, W. Machine fault diagnosis through an effective exact wavelet analysis / W. Peter [и др.]. - Текст: непосредственный // Journal of Sound and Vibration. – 2004. – № 277. – P. 1005 – 1024.

275. Liu, B. On the selection of informative wavelets for machinery diagnosis / B. Liu, S. F. Ling. - Текст: непосредственный // Mechanical Systems and Signal Processing. – 1999. – № 13 (1). – P. 145–162.

276. 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.

277. Kruglova, T. Intelligent Sensorless Fault Diagnosis of Mechatronics Module Wavelet Transformation Based / T. Kruglova, D. Shaykhutdinov [и др.]. - Текст: непосредственный // Asian Journal of Information Technology. – 2016. – Vol. 15, Is. 22. – P. 4694 – 4697.

278. 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.

279. 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.

280. 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://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/3/032019/pdf> (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

281. 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, ICEPDS 2018 – Conference Proceedings: сайт. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8571885.ru> (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

282. Kruglova, T. Fault Diagnosis Method of BLDC Actuator using Stator Current Signals / T. Kruglova, D. Litvin. - Текст: непосредственный // SWorld Journal: International periodic scientific journal. – 2015. – Vol. J21510 (9). – P. 64– 69.

283. 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.

284. 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.

285. 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/pdf> (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

286. 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.

287. Круглова, Т. Н. Исследование технического состояния электропривода при различных условиях нагружения / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова – 2019. – № 3. – С. 92 – 113.

288. 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.

289. Kruglova, T. Formulation of the Optimization Problem of the Cyber-Physical Diagnosis System Configuration Level for Construction Mobile Robots / A. Bulgakov, T. Kruglova, T. Вокс. - 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.

290. 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.

291. 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.

292. 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.

293. Круглова, Т. Н. Интеллектуальное принятие решения в киберфизической системе диагностирования электродвигателей технологического оборудования / Т. Н. Круглова. - Текст: непосредственный // *Вестник УГАТУ*. – 2019. – Т. 23, № 1 (83). – С. 97 – 103.

294. 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/pdf> (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

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

296. Круглова, Т. Н. Интеллектуальное принятие решения в киберфизической системе диагностирования электродвигателей технологического оборудования / Т. Н. Круглова. – Текст: непосредственный // *Вестник УГАТУ*. – 2019. – Т. 23, № 1 (83). – С. 97–103.

297. 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.

298. 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.

299. Круглова, Т. Н. Оценка эффективности применения методов и средств диагностирования прогнозирования технического состояния оборудования / Т. Н.

Круглова, Л. Д. Круглова. - Текст: непосредственный // Перспективы развития Восточного Донбасса : сб. науч. тр. по материалам 58-й регион. науч.-практ. конф. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2009. – Ч. 2. – С. 217–222.

300. Davidov, V. Компьютерные технологии управления в технических системах / Davidov, V.: сайт. – URL: <http://portalnp.ru/author/bobdavidov> (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей. - Текст: электронный.

301. Стандарты Wi-Fi: список самых распространенных протоколов. – Текст: электронный: сайт. – URL: <https://wifigid.ru/poleznoe-i-interesnoe/standarty-wi-fi> – (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

302. PicoScore 6. Программное обеспечение компьютера-осциллографа: Руководство пользователя. - Текст: электронный: сайт. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/108/DOC001108544.pdf> (дата обращения 12.07.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

303. Петухов, Р. М. Оценка эффективности промышленного производства: Методы и показатели / Р. М. Петухов. – Москва : Экономика. – 1990. – 356 с. - Текст: непосредственный.

304. Arbab, F. A channel-based coordination model for component composition / F. Arbab. - Текст: непосредственный // Mathematical Structures in Computer Science. – 2004. – 14 (3). – P. 329–366.

Приложение А. Программные модули киберфизической системы оценки технического состояния отказоустойчивой системы приводов механизмов параллельной кинематической структуры

Согласно разработанному алгоритму киберфизическая система оценки технического состояния отказоустойчивой системы приводов МПКС состоит из двух уровней:

- нижнего, реализующего диагностирование и прогнозирование технического состояния приводов;
- верхнего, осуществляющего расчет дополнительной нагрузки на приводы МПКС и принятие решения по выбору режима эксплуатации.

Для практической реализации нижнего уровня киберфизического взаимодействия системы разработана программа, позволяющая по измеренным значениям тока или вибрации приводов МПКС определить текущее и прогнозное техническое состояние, а также уровень нагружения каждого привода.

Верхний уровень киберфизического взаимодействия реализует модель принятия решения по выбору режима эксплуатации МПКС.

Система оценки технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры

В пакете прикладных программ MATLAB разработаны четыре подпрограммы:

- расчет вейвлет-коэффициентов на характерном масштабе;
- расчет огибающей и аппроксимирующей прямой вейвлет-коэффициентов на характерном масштабе;
- определение текущей нагрузки на привод;
- прогнозирование технического состояния электрического или гидравлического привода.

Объединение данных подпрограмм согласно алгоритму, приведенному на

рисунке 6.7, предоставляет возможность реализовать нижний уровень киберфизической системы оценки технического состояния приводов МПКС.

Подпрограмма расчета значений вейвлет-коэффициентов

```
clear all
close all
clc
MI=load('3-1.dat') % Загрузка результатов измерений
time=MI(:,1) % выбор столбца 1 – времени измерения
current=MI(:,3); % выбор столбца 3 – ток фазы а сервопривода
scale=376 % выбор характерного масштаба сервопривода
c=cwt(current,scale,'morl') % непрерывное вейвлет-преобразование токового
сигнала
plot(time,c) % построение графика вейвлет-коэффициентов во времени
grid on
xlim([0 max(time)])
xlabel('Время,c \rightarrow')
ylabel('Вейвлет коэффициенты \rightarrow')
```

Данная подпрограмма предоставляет возможность рассчитать значения вейвлет-коэффициентов на характерном масштабе. Результатом расчета является вектор-столбец c вейвлет-коэффициентов, количество которых зависит от числа анализируемых масштабов, например:

```
scale1=50
scale2=75
scale3=90
c1=cwt(current, scale1, 'morl')
c2=cwt(current, scale2, 'morl')
c3=cwt(current, scale3, 'morl')
```

График зависимости вейвлет-коэффициентов во времени (рисунок А.1) предоставляет возможность визуализировать результаты расчета.

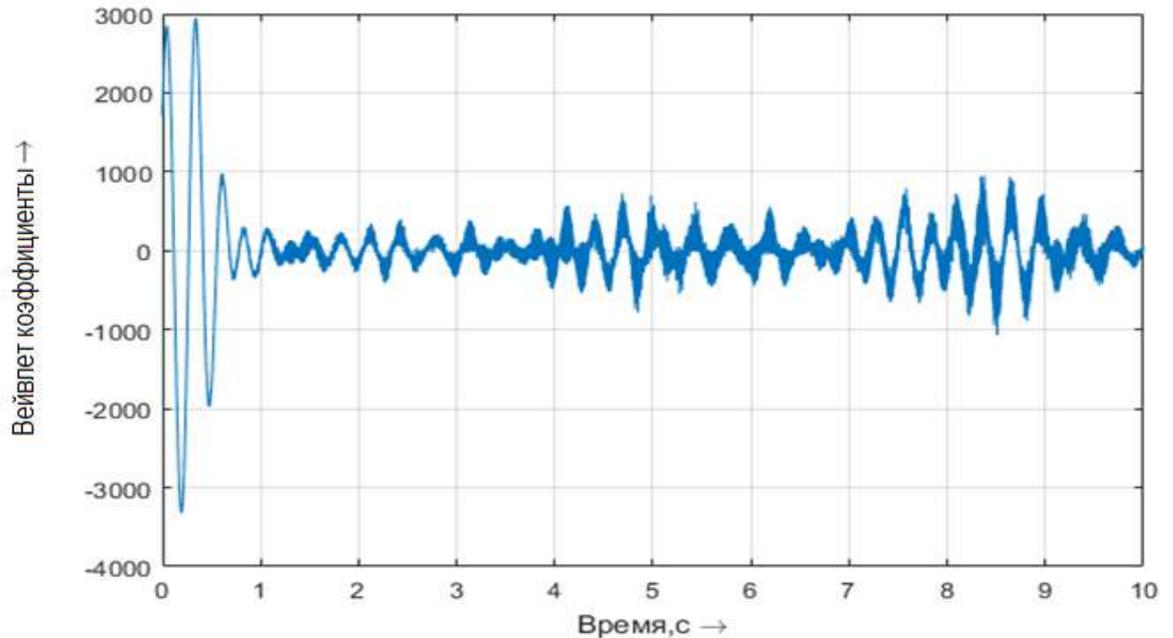


Рисунок А.1 – Вейвлет-коэффициенты тока или вибрации привода на характерном масштабе

Расчет огибающей и ее аппроксимирующей прямой

```

x = abs(hilbert(c)) %расчет огибающей вейвлет-коэффициентов
g=transpose(x) %транспонирование вектор - строки в вектор - столбец
plot(time,g) %построение графика модуля огибающей
grid on
xlim([0 max(time)])
xlabel('Время,с \rightarrow')
ylabel('Огибающая \rightarrow')
hold on

```

Программа предоставляет возможность определить абсолютные значения огибающей вектор-столбца c , вычисляемой с помощью преобразований Гильберта и построения графика огибающей во времени (синий график на рисунке А.2). Аппроксимация полученных коэффициентов огибающей (g) выполняется с использованием метода наименьших квадратов с использованием полинома первой степени.

```

s1 = polyfit(time,g,1) %расчет коэффициентов прямой, аппроксимирующей
огибающую
k=s1(:,1) %определение коэффициента k прямой, аппроксимирующей оги-
бающую
b=s1(:,2) %определение коэффициента b прямой, аппроксимирующей оги-
бающую
x=k*time+b % уравнение прямой во времени
plot(time,x) % построение графика аппроксимирующей прямой

```

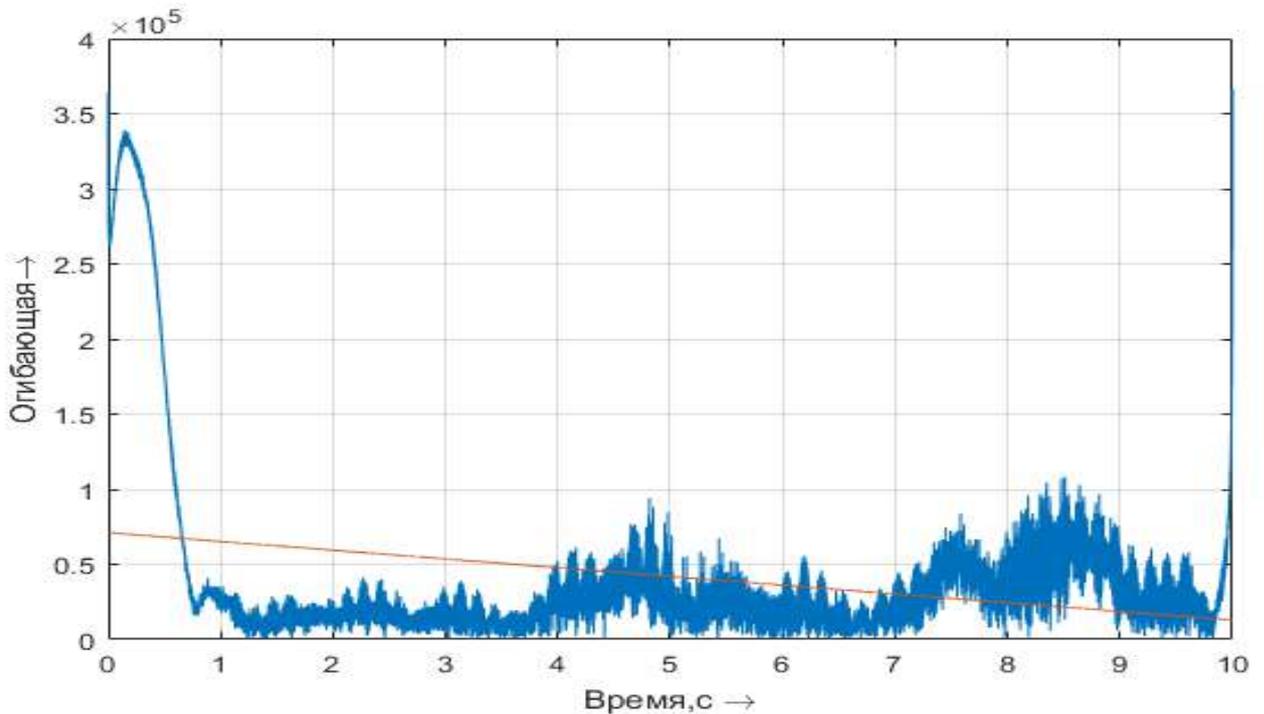


Рисунок А.2 – Огибающая вейвлет-коэффициентов и ее аппроксимирующая прямая

Расчет огибающей по результатам преобразования Гильберта записывается следующим кодом: $abs(polyfit(time,g,1))$. Результатом расчета является вектор-столбец $s1$ коэффициентов уравнения прямой k и b . Построение графика функции аппроксимирующей прямой, показанного на рисунке А.2 красным цветом, запишется следующим образом: $plot(time,x)$.

Коэффициенты k и b рассчитываются для всех масштабов вейвлет-коэффициентов и позволяют определить техническое состояние привода, согласно теории, описанной в диссертационной работе.

Определение текущей нагрузки на сервопривод

Расчет относительных коэффициентов Δk и Δb осуществляется согласно (5.31), (5.32) на основе перегрузочной способности сервопривода по току.

Для моделирования системы нечеткого логического вывода *Sugeno* (рисунок А.3) использовано приложение *Fuzzy Logic Toolbox* пакета прикладных программ *MATLAB*. Задаются функции принадлежности входов и выхода системы согласно рисунку 5.4. При $l_1 = 0$ сервопривод функционирует в номинальном режиме без нагрузки. Если $l_2 = 100\%$, то привод имеет максимальную нагрузку и необходимо менять режим его работы. Согласно модели определения текущей нагрузки, формируется система предикатных правил, описывающих взаимодействие входных и выходных параметров. Полученная модель сохраняется в виде файла *load.fis*.

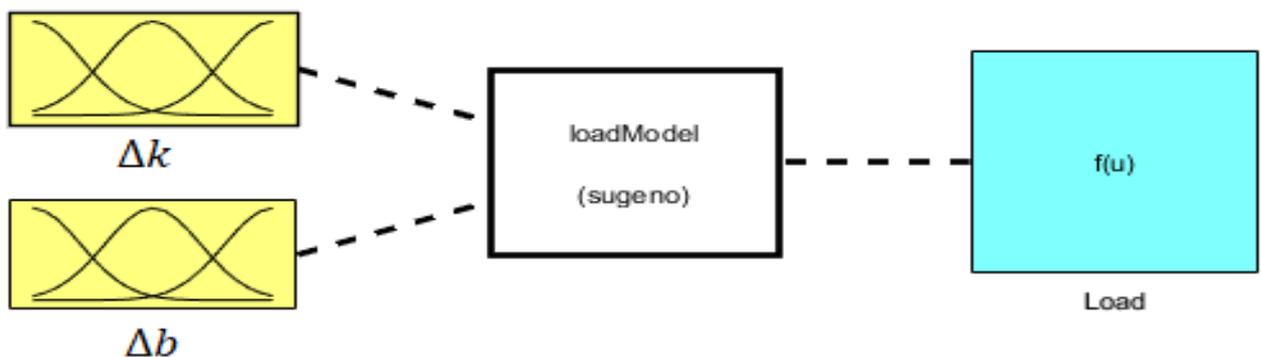


Рисунок А.3 – Структура модели расчета текущей нагрузки на привод

Для задания входных значений модели создается М – файл – функция:

```
function [L]=load(k, b).
```

где L , k , b – имена выходного и входных параметров соответственно.

Для чтения сохраненного *FIS* – файла используется команда

```
a=readfis('load')           % чтение файла 'load'
```

Исходными данными для расчета нагрузки являются значения коэффициентов аппроксимирующей прямой

$$d1 = [k \ b].$$

Обращение к нечеткой подмодели из М-файла осуществляется с помощью функции *evalfis* (/вектор параметров, имя/), в результате выполнения которой выводится выходное значение модели L , характеризующее текущую нагрузку на привод:

$$L = \text{evalfis}(d1, a).$$

Данный программный код предоставляет возможность использовать нечеткую модель из М – файла, подставляя рассчитанные значения коэффициентов аппроксимирующей прямой. Выходом модели является значение от 0 до 100, показывающее текущую нагрузку на привод.

Подпрограмма прогнозирования технического состояния сервопривода

Исходными данными для прогнозирования являются значения коэффициента k на каждом из характерных масштабов, распределенных по равным временным интервалам. Из данного тренда согласно (4.9) и (4.10) формируются векторы входных P и целевых H значений, которые записываются следующим образом.

% исходные данные для прогнозирования

$P = [k1 \ k2 \ k3 \ k4 \ k5 \ k6 \ k7; k2 \ k3 \ k4 \ k5 \ k6 \ k7 \ k8; k3 \ k4 \ k5 \ k6 \ k7 \ k8 \ k9]$

$H = [k4 \ k5 \ k6 \ k7 \ k8 \ k9]$

В М-файле пакета MATLAB моделируется трехслойная сеть прямой передачи сигнала, состоящая из трех входных, десяти скрытых и одного выходного нейронов (см. гл. 4).

В программном коде данная сеть записывается следующим образом.

% Моделирование нейронной сети

$net = \text{newff}([0 \ 1; 0 \ 1; 0 \ 1], [10, 1], \{\text{'logsig'}, \text{'purelin'}\})$

Запуск данного программного кода генерирует пользовательскую нейронную сеть (рисунки А.4 и А.5).

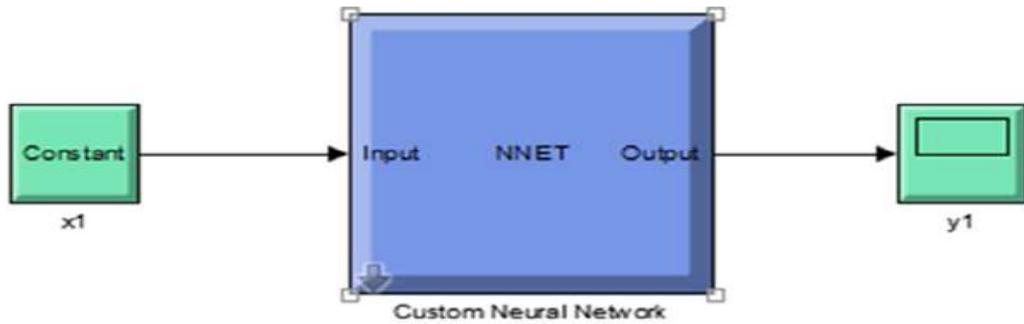


Рисунок А.4 – Схема задания пользовательской нейронной сети в MATLAB Simulink

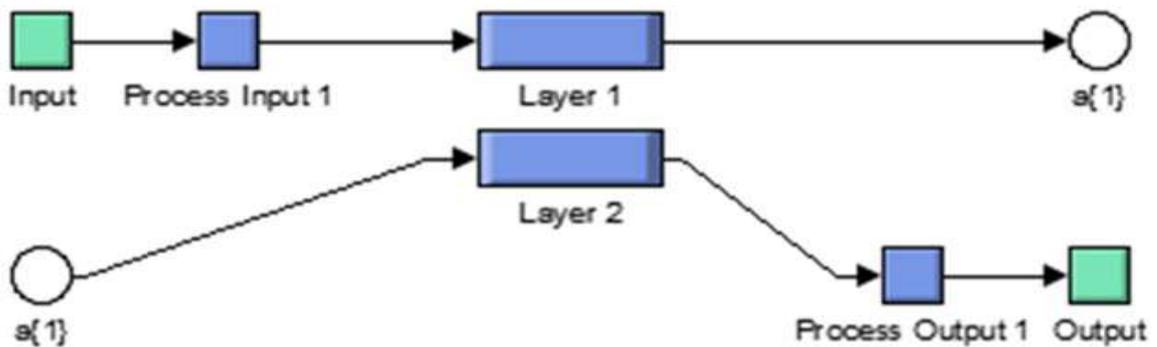


Рисунок А.5 – Структура нейронной сети прогнозирования коэффициента k аппроксимирующей прямой огибающей на характерном масштабе

Данная сеть состоит из двух слоев: логического (рисунок А.6) и линейного (рисунок А.7).

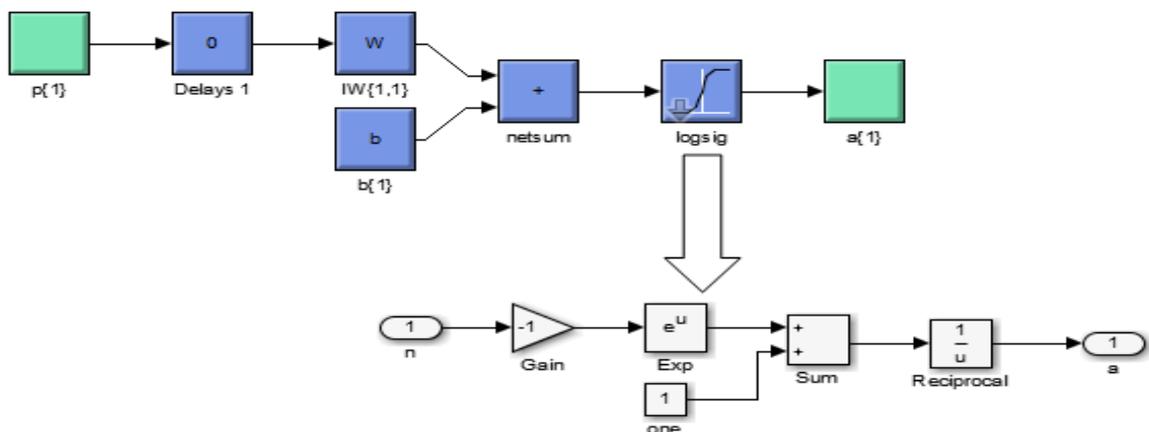


Рисунок А.6 – Структура скрытого слоя с логической функцией активации

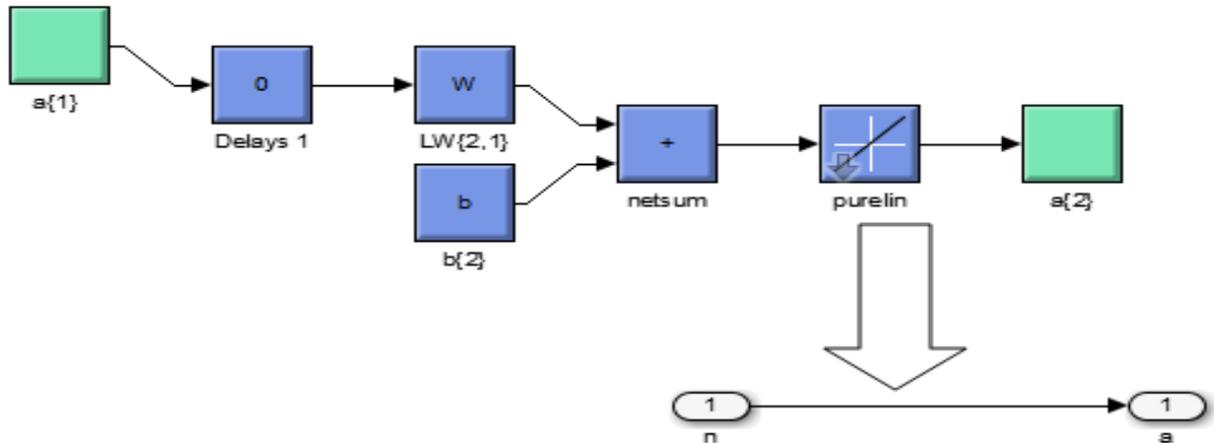


Рисунок А.7 – Структура линейного слоя нейронной сети прогнозирования

Созданная нейронная сеть инициализируется, обучается и моделируется:

```
gensim(net) % генерация нейронной сети
net=init(net) % инициализация нейронной сети
net.trainParam.epochs=1000 % симуляция нейронной сети
net=train (net,P,H) % обучение нейронной сети
Y=sim (net,P) % симуляция нейронной сети
```

На вход сети подается вектор-столбец с тремя последними значениями обучающей выборки:

```
C=[k8;k9;k10] % исходные данные для прогнозирования
K=sim(net,C) % симуляция сети для прогнозирования
```

Визуализация результата прогнозирования (рисунок А.1.8) задается следующим образом:

```
% Построение результирующего графика функции по результатам прогно-
зирования
plot (P,H,P,Y,'+') % Построение графика исходных данных и результата
обучения
hold on
plot(C,K,'o') % Построение результатов прогнозирования
```

Аналогичную нейронную сеть прописывают для каждого характерного масштаба и определяют следующие значения коэффициентов k . Для определения

уровня развития неисправностей в следующий период эксплуатации выполняют аппроксимацию результатов прогнозирования согласно таблице 4.2.

В качестве вектора цели задается функция максимума входных значений:

$$fault1 = \max([K1 \ K2 \ K3])$$

$$fault2 = \max([K4 \ K5])$$

Отрицательное значение параметра *fault* свидетельствует о том, что отказа объекта по причине данной неисправности в следующий период эксплуатации не произойдет, в то время как положительное значение предвещает его наступление. Общее состояние сервопривода определяется аппроксимацией коэффициентов развития неисправностей:

$$servo = \max([fault1 \ fault2])$$

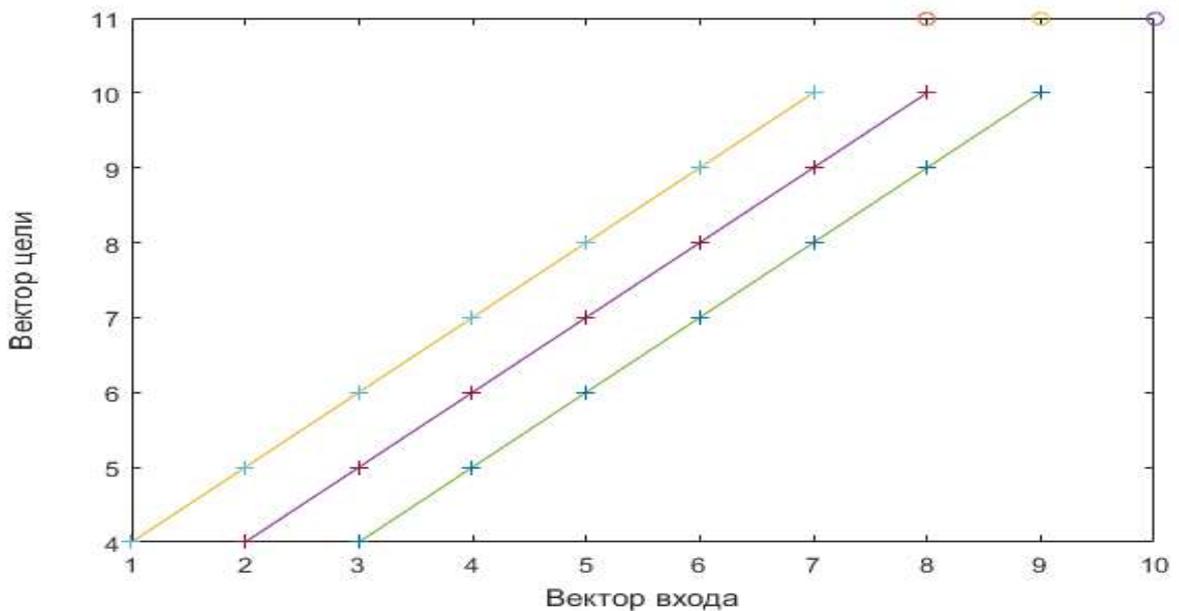


Рисунок А.8 – Результаты работы сети прогнозирования

Если получено отрицательное значение, то спрогнозированные значения коэффициентов $K1 \ K2 \ K3 \ K4 \ K5$ добавляются в вектор данных для прогнозирования S , и окно смещается на единицу вправо. Условием остановки алгоритма прогнозирования является достижение параметром *servo* положительного значения. Число

пройденных итераций будет равно количеству периодов сохранения работоспособности T .

Синтез отказоустойчивой системы приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры

Модель расчета дополнительной нагрузки на сервоприводы

В случае наличия неисправных приводов возникает необходимость выполнения перераспределения высвободившейся нагрузки на соседние исправные исполнительные элементы. Согласно теории, описанной в п. 4.4, половина нагрузки с неисправного привода ложится на соседний исправный (4.46) -(4.49), а величина дополнительной нагрузки зависит от коэффициента изменения нагрузки L_{ch} , учитывающего количество и взаимное расположение неисправных приводов.

Для расчета коэффициента дополнительной нагрузки использованы системы нечеткого логического вывода *Mamdani* и приложение *Fuzzy Logic Toolbox* пакета прикладных программ MATLAB. Задаются функции принадлежности входов и выходов системы согласно рисунку 4.19.

Количество входов и выходов системы равно числу приводов МПКС. Входными значениями является текущее техническое состояние каждого привода. Графики функции принадлежности входа приведены на рисунке 5.22, а. Если привод исправен, то соответствующая функция принадлежности равна 1, если неисправен – 0.

Выходами нечеткой логической системы является коэффициент увеличения нагрузки на сервопривод. Графики функции принадлежности выходов приведены на рисунке 5.22, б.

Фрагмент нечеткой базы знаний приведен в таблице 5.2. Полученная модель сохраняется в виде файла *LOADCHANGE.fis*.

Для задания входных значений модели создается М – файл – функция:

$$\text{function } [Lc1, Lc2, Lc3, \dots Lcn] = \text{LOADCHANGE}[c1, c2, c3, \dots cn]$$

где $Lc1, Lc2, Lc3, \dots, Lcn$ – значения соответствующих коэффициентов изменения нагрузки, $c1, c2, c3, \dots, cn$ – текущее техническое состояние сервоприводов

Для чтения сохраненного FIS – файла используется команда

$a = \text{readfis}('LOADCHANGE')$ % чтение файла *LOADCHANGE*

Исходными данными для расчета нагрузки являются значения коэффициентов аппроксимирующей прямой:

$$lc = [c1, c2, c3, \dots, cn]$$

Обращение к нечеткой подмодели из М-файла осуществляется с помощью функции *evalfis* (/вектор параметров, имя/), в результате выполнения которой выводится выходное значение модели L , характеризующее текущую нагрузку на сервопривод:

$$Lc = \text{evalfis}(lc, a)$$

Данный программный код позволяем использовать нечеткую модель из М – файла, подставляя рассчитанные значения коэффициентов аппроксимирующей прямой. Выходом модели является значение от 0 до 2 показывающее коэффициент дополнительной нагрузки на привод. Полученное значение вектора коэффициентов дополнительной нагрузки необходимо округлить согласно правилам математики:

$$Lc = \text{round}(\text{evalfis}(lc, a)).$$

Для нахождения дополнительной нагрузки необходимо полученные коэффициенты умножить на соответствующее текущее значение нагрузки на приводы:

$$dLoad = Lc \cdot L.$$

Для реализации модели принятия решения необходимо вычислить максимальное значение дополнительной нагрузки:

$$dL = \max(dLoad).$$

Модель принятия решения для МПКС с параллельными кинематическими цепями

Задача принятия решения по выбору режима эксплуатации выполняется в облачном сервере. С каждого сервопривода МПКС после отработки нижнего уровня

на верхний передается текущая нагрузка на привод L и период сохранения работоспособности T . Определяется количество сервоприводов, у которых $T > 0$. Определяется количество исправных сервоприводов и рассчитывается средняя и максимальная дополнительная нагрузки на сервоприводы МПКС, а также минимальный прогнозный срок исправной работы сервоприводов (см. п. 5.5). Данные параметры являются исходными данными нечеткой модели принятия решения по выбору режима эксплуатации МПКС с параллельными кинематическими цепями. Моделируется система типа *Mamdani*, содержащая два входа и один выход (рисунок А.9).

Для каждого из введенных множеств задаются функции принадлежности, как показано на рисунках 5.25–5.28 и формируется система предикатных правил, приведенная в таблице 5.3. Полученный файл сохраняется как *FIS*-модель с именем *Optimum.fis*.

Для задания входных значений модели создается М – файл – функция

$$\text{function } [D] = \text{Optimum}(L, dL, Tg),$$

где D, L, dL, Tg – имена выходного и входных параметров соответственно.

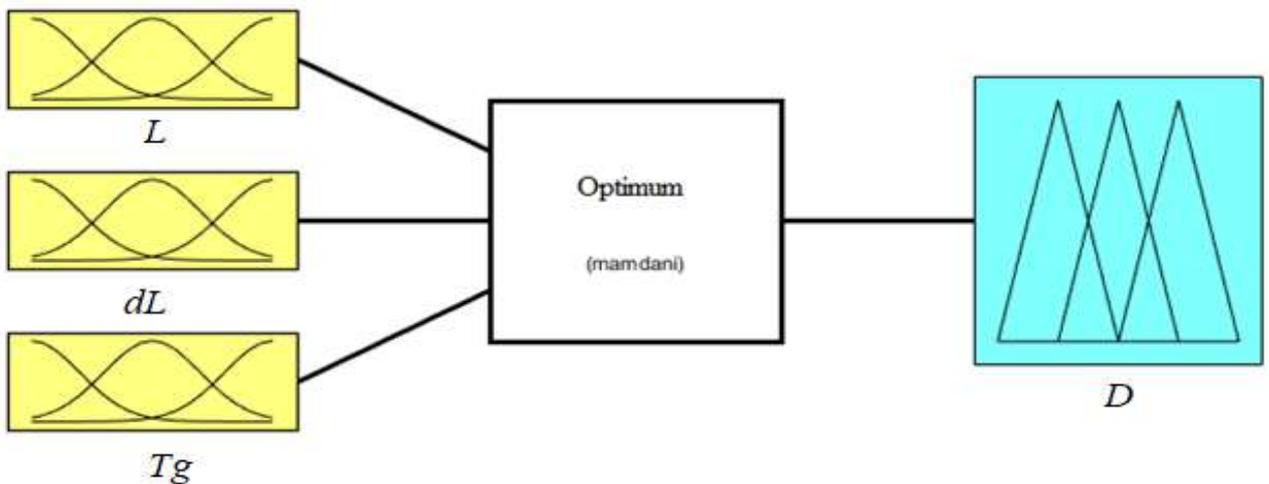


Рисунок А.9 – Структура модели выбора режима эксплуатации сервоприводов МПКС с параллельными кинематическими цепями

Чтение сохраненного файла FIS – файла осуществляется с помощью команды

```
b=readfis('Optimum')      % чтение файла 'Optimum'
```

Входными данными модели являются среднее значения текущей нагрузки, максимальное значение дополнительной нагрузки, а также минимальный период сохранения работоспособности:

$$v = [L \quad dL \quad Tg].$$

Как модель принятия решения используется функция

$$D = \text{evalfis}(v, b).$$

Результатом выполнения данной функции является значение D , по знаку которого можно определить целесообразность изменения нагрузки.

Данный программный код предоставляет возможность использовать нечеткую модель из М – файла, подставляя рассчитанные значения средних текущих и дополнительных нагрузок, а также с помощью среднего времени сохранения работоспособности определить целесообразность изменения режима работы при $D > 0$. В противном случае необходимо прекратить эксплуатацию МПКС.

Модель принятия решения для МПКС со сходящимися кинематическими цепями

Модель принятия решения по выбору технического состояния МПКС со сходящимися кинематическими цепями (см. рисунок 5.12, б) состоит из двух функциональных частей: выбор режима работы узлов (шарниров) МПКС; выбор режима работы МПКС в целом. Структура первой подмодели приведена на рисунке А.10.

Для каждого из введенных множеств задаются функции принадлежности, как показано на рисунке 5.22, а. В качестве выхода задаются функции принадлежности согласно рисунку 5.28 и формируется система предикатных правил, приведенная в таблице 5.5. Полученный файл сохраняется как *FIS* – модель сименем *opt1.fis*.

Для задания входных значений модели создается М – файл – функция,

$$\text{function}[Dc] = \text{opt1}(c_1, c_2)$$

где Dc , c_1, c_2 – имена выходного и входных параметров соответственно.

Чтение сохраненного файла *FIS* – файла осуществляется с помощью команды

```
B=readfis('opt1') % чтение файла 'opt1.fis'
```

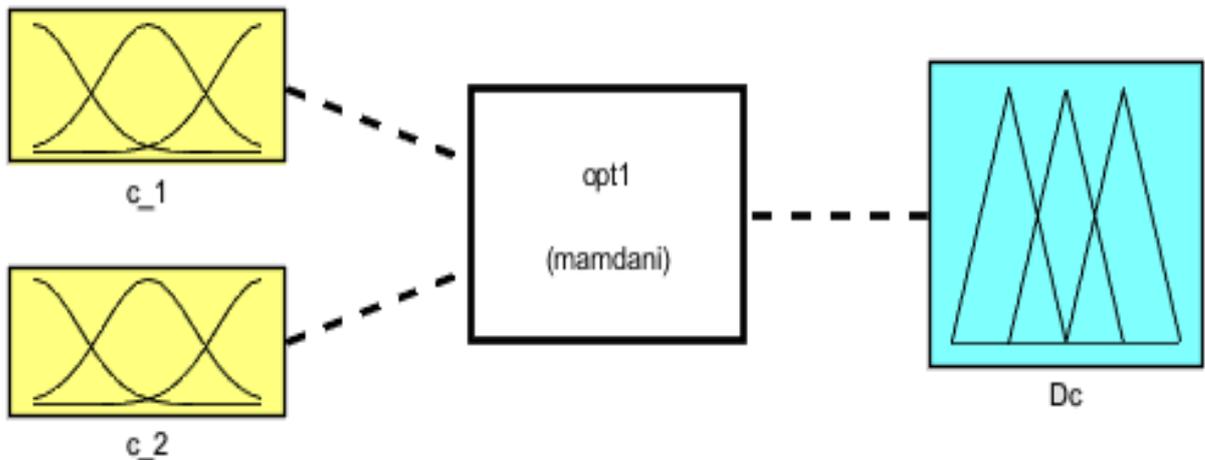


Рисунок А.10 – Структура модели выбора режима эксплуатации сервоприводов узла МПКС

Входными данными модели является вектор-строка, содержащая значения, характеризующие техническое состояние приводов кинематических цепей, сходящихся в узле

$$V=[c_1 \ c_2].$$

Для использования модели принятия решения используется функция

$$Dc=evalfis(V,B).$$

Результатом выполнения данной функции является значение *Dc*, по знаку которого можно определить целесообразность изменения нагрузки в узле МПКС.

Подставляя исходную информацию о техническом состоянии приводов всех узлов МПКС, принимаем решение по каждому из узлов МПКС, определяя значения *Dc_1*, *Dc_2*, *Dc_3* и подавая на вход подмодели принятия решения по выбору режима эксплуатации МПКС (рисунок А.11).

Для каждого входов и выхода подмодели задаются функции принадлежности согласно рисунку 5.28, и формируется система предикатных правил, приведенная в таблице 5.6. Полученный файл сохраняется как *FIS* – модель сименем *opt2.fis*.

Для задания входных значений модели создается М – файл – функция.

$function[D]=opt2(Dc_1,Dc_2,Dc_3),$

где D,Dc_1,Dc_2,Dc_3 – имена выходного и входных параметров соответственно.

Чтение сохраненного файла FIS – файла осуществляется с помощью команды

$A=readfis('opt2')$ % чтение файла 'opt2.fis'

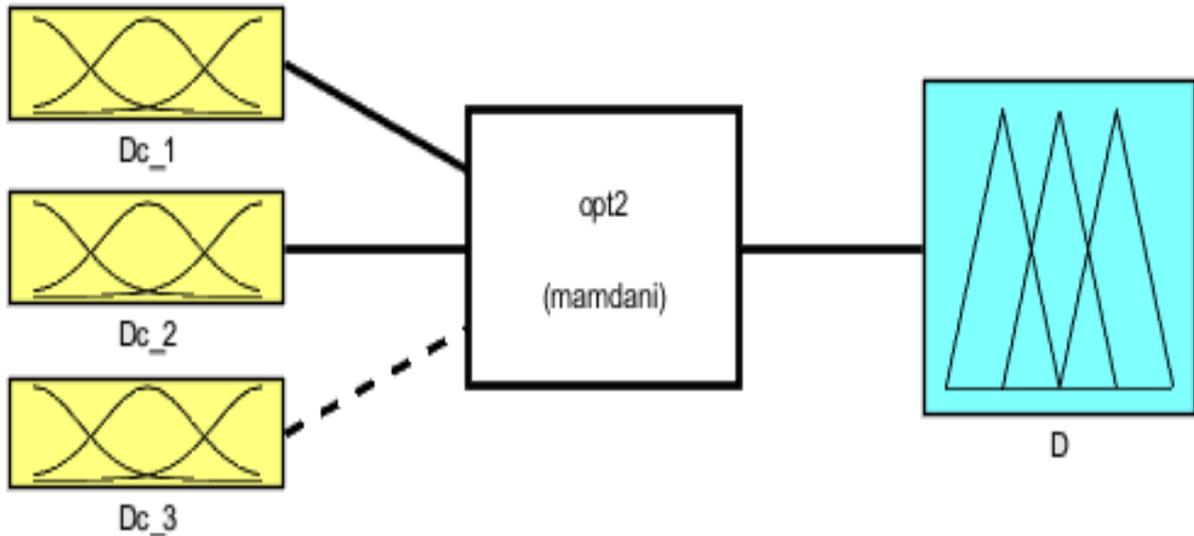


Рисунок А.11 – Структура модели выбора режима эксплуатации МПКС со сходящимися кинематическими цепями

Входными данными модели является вектор-строка, содержащая решения по выбору режима эксплуатации каждого узла МПКС, полученного в результате первого этапа моделирования:

$$w=[Dc_1 \ Dc_2 \ Dc_3].$$

Для использования модели принятия решения используется функция

$$D=evalfis(W,A).$$

Результатом выполнения данной функции является значение D , по знаку которого принимается решение по изменению режима эксплуатации в соответствующих узлах МПКС. Если получено значение параметра $D>0$, то режим работы приводов узлов можно изменить. В противном случае необходимо прекратить эксплуатацию объекта.

Приложение Б. Акты внедрения результатов диссертационного исследования



НОВОЧЕРКАССКИЙ
ЭЛЕКТРОВОЗОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
ЗАВОД

ООО «ПК «НЭВЗ»
346413, Россия, Ростовская область,
г. Новочеркасск, ул. Машиностроителей, д. 7-а
Тел.: +7 863 529 22 00 Email: nevz@nevz.com
www.nevz.com

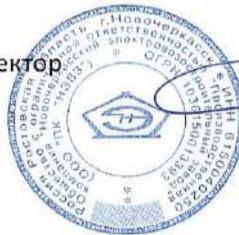
« _____ » _____ 20__ г. № _____

АКТ

о внедрении результатов диссертационных исследований

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационных работы Кругловой Татьяны Николаевны «Методология оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры» в ООО «ПК «Новочеркасский электровозостроительный завод» для оценки технического состояния систем электрических приводов электровозов 2(3,4)ЭС5К, 2(3)ЭС4К, 2(3)ЭС5С, НП-1, НПМ2М, ЭП1М, ЭП20. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения в производство составит около 1 млн. рублей.

Технический директор



В.В. Кинжигазиев



Система менеджмента предприятия
сертифицирована на соответствие
требованиям ISO/TS 22163:2017,
ISO 9001:2015, ГОСТ Р ИСО 9001:2015,
ISO 14001:2015 и ISO 45001:2018

ООО «АССОЦИАЦИЯ ЭКОТЕХМОНИТОРИНГ»
400087, Волгоградская область, г. Волгоград, Новороссийская улица, 10
ИНН 3444057420
e-mail: ptb_volgograd@mail.ru
Тел: 8 (8442) 37-12-76

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы
Кругловой Татьяны Николаевны на тему:
**«МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
СИСТЕМ ПРИВодОВ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ
ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ»**

Настоящий акт составлен в том, что результаты докторской диссертации Кругловой Т.Н. внедрены в ООО «Ассоциация Экотехмониторинг» при проектировании отказоустойчивых систем приводов машиностроительной техники. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения в составит около 1 млн. рублей.

Генеральный директор
ООО «Экотехмониторинг»



Хабаров С. А.

«15» июля 2021 г.



**Общество с ограниченной ответственностью
«Аграрум-техника»**

ОГРН 1186196020746 ИНН 6165213629 КПП 616501001 ОКВЭД 28.30
344010, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, пер. Соборный, дом 66а, оф.204
тел. +7 (863) 3330134, 8-800-5117584

Исх. от 10.09.2021
№ 001-10/09

По месту требования

Акт

о внедрении результатов диссертационных исследований

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационной работы Кругловой Татьяны Николаевны «Методология оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры» в ООО "Аграрум-техника" для диагностирования систем гидравлических приводов универсальных сеялок прямого посева модельного ряда VITON (модели: VITON-I, VITON-I Plus и VITON-II) в процессе эксплуатации. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения в составит около 1,5 млн. рублей.

Генеральный директор



Медведева Т.И.

Исполнитель:
к.э.н. Мошкин Игорь Валерьевич
Тел.: 8(918) 519-65-82
economist@agro-viton.ru

Общество с ограниченной ответственностью фирма



Россия, 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Михайловская, 164 А, телефон (8635) 24-41-50, факс 24-02-88,
E-mail: plastic@plasticenterprise.ru www.plasticenterprise.ru ИНН 6150000995, КПП 615001001, ОКПО 27205138, ОКВЭД 33.30

№ 928/1 от «07» 09 2021 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационных исследований

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационных работы Кругловой Татьяны Николаевны «Методология оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры» в ООО фирма «Пластик Энтепрайз» для оценки технического состояния систем электрических приводов оборудования химических производств. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения составит около 1.2 млн. рублей.

Директор
ООО фирма
«Пластик Энтепрайз»



Тюрин Олег Георгиевич



«УТВЕРЖДАЮ»
Зам. директора
Баев А. В.
«18» марта 2021 г.

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы
Кругловой Татьяны Николаевны тему:

«МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИ- СТЕМ ПРИВОДОВ МАШИНЫ И МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ»

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Кругловой Т. Н. «Методология оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры» внедрены в ООО «Проектно-техническое бюро Волгоградгражданстрой» при диагностировании и прогнозировании технического состояния строительной техники. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения в ООО «Проектно-техническое бюро Волгоградгражданстрой» составит около 900 тыс. рублей.



АКТ
внедрения результатов диссертационного исследования
в учебный процесс

Комиссия в составе: председатель д.т.н., профессор кафедры «Мехатроника и гидропневмоавтоматика» Н. А. Глебов, члены к.т.н., доцент кафедры «Мехатроника и гидропневмоавтоматика» Д. М. Крапивин, к.т.н., доцент кафедры «Мехатроника и гидропневмоавтоматика» М. Д. Притчина, составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Кругловой Татьяны Николаевны на тему «Методология оценки технического состояния машин и механизмов параллельной кинематической структуры», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук, внедрены в учебный процесс на кафедре «Мехатроника и гидропневмоавтоматика» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова на основании решения кафедры (протокол № 12 от 2 июля 2021 г.).

Результаты диссертационного исследования, приведенные в учебном пособии «Мехатронные системы в специализированной технике», авторами которой являются к. т. н., доцент, соискатель учёной степени доктора технических наук Круглова Т.Н., к. п. н., доцент Шошиашвили И.С., ассистенты Власов А.С., Карташова Т.П., магистрант Шмелев И.А., используются при подготовке магистров по направлению 15.04.06 - «Мехатроника и робототехника», направленность «Проектирование мехатронных и робототехнических систем специального назначения».

Председатель комиссии

Н. А. Глебов

Члены

Д. М. Крапивин

М. Д. Притчина