

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора, Зорина Владимира Александровича на диссертационную работу Кругловой Татьяны Николаевны на тему «Методология оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.2 – Машиноведение (технические науки)

Актуальность темы диссертационного исследования

Актуальной тенденцией развития транспортного, грузоподъемного, строительного и сельскохозяйственного машиностроения является внедрение разнообразных механизмов параллельной кинематической структуры. К достоинствам таких механизмов относятся точность программных движений, высокая грузоподъемность, маневренность и конструктивная гибкость. Однако, для корректного функционирования параллельных механизмов необходимо обеспечить согласованную работу всех исполнительных приводов, что накладывает особые требования к эксплуатационной надежности исполнительных конструктивных элементов. Отказ части приводов системы может стать причиной выхода из строя всего механизма, следовательно, проблема обеспечения высокой эксплуатационной надежности системы исполнительных приводов параллельных механизмов весьма актуальна. Для решения данной проблемы Кругловой Т.Н. разработана методология оценки технического состояния систем приводов параллельной кинематической структуры, предусматривающая контроль и оценку текущего и прогнозного состояния, поиск возникших неисправностей, определение текущих и дополнительных нагрузок на исправные приводы системы, а также коррекцию порядка использования параллельного механизма при частичном отказе в системе его исполнительных приводов в режиме реального времени. Основным принципом предложенной автором методологии является совместное использование киберфизического подхода и методов искусственного интеллекта, предоставивших возможность реализовать бесшовную интеграцию вычислительных ресурсов и физических процессов, обеспечив повышение коэффициента технического использования оборудования на 16 %.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, сформулированных в диссертационной работе

Достоверность основных теоретических положений, результатов расчетов и экспериментальных данных, выводов и рекомендаций обоснована корректным использованием математической теории надежности и диагностики технических систем, результатов интеллектуального анализа и оптимизации полученных данных; на экспериментальных исследованиях, выполненных на стендах и опытных образцах в лабораторных и производственных

условиях, а также на результатах апробации и обсуждения материалов диссертации на национальных, всероссийских и международных конференциях и семинарах, подтверждена экспертизой научных статей в ведущих российских и международных изданиях.

Теория построена на известных, проверяемых данных, согласуется с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

Автором по материалам диссертации опубликовано 127 научных трудов, в том числе в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и в научных журналах, включенных в международную базу цитирования SCOPUS – 34, получено 2 патента РФ на изобретения и 2 патента РФ на полезные модели. По теме диссертации опубликована монография.

Научная новизна исследований и полученных результатов

Автором сформулированы принципы обоснования возможности использования (выбора режима эксплуатации) механизмов параллельной кинематической структуры при возникновении неисправности, отличающиеся введением в расчетные выражения управляющих сил интегральных коэффициентов, учитывающих техническое состояние, текущие и дополнительные нагрузки на приводы системы.

Предложена архитектура системы оценки технического состояния параллельных механизмов, реализующая сбор и обработку диагностической информации методами и средствами искусственного интеллекта в режиме реального времени, отличающаяся киберфизическим принципом построения на основе установленной взаимосвязи пяти уровней реализации функциональной структуры применяемых средств.

Предложен метод оценки технического состояния, реализующий поиск неисправностей и прогнозирование отказа системы приводов механизмов параллельной кинематической структуры в режиме реального времени, отличающийся использованием установленной закономерной взаимосвязи коэффициентов вейвлет-преобразования сигналов силы тока и/или параметров вибрации различных исполнительных приводов с их техническим состоянием с помощью нейросетевой экстраполяции.

В рецензируемой диссертационной работе предложен метод проектирования отказоустойчивых механизмов параллельной кинематической структуры, отличающийся учетом граничных условий статической устойчивости, управляемости, режима нагружения и технического состояния систем исполнительных приводов.

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

Усовершенствован метод управления параллельным механизмом, отличающийся учетом технического состояния исполнительных приводов для

выполнения заданного закона движения механизма при изменении внешней нагрузки на приводы системы.

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

Научная новизна защищена патентами на изобретения и полезные модели (Патенты №139162, №112405, №2289802, № 2799489).

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в разработке методологии оценки технического состояния систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры, как совокупности методов, основанных на киберфизических подходах, обеспечивающих:

- выбор режима эксплуатации параллельного механизма с учетом технического состояния, текущей и дополнительной нагрузки на приводы системы с возможностью коррекции режима работы механизма для реализации заданного закона управления в случае возникновения частичного отказа в системе исполнительных приводов;
- оценку текущего и прогнозного технического состояния систем приводов параллельных механизмов в режиме реального времени;
- определение текущей и дополнительной нагрузок при частичном отказе системы приводов механизма параллельной кинематической структуры;
- принятие решения по выбору режима эксплуатации механизма параллельной кинематической структуры с частичным отказом в системе исполнительных приводов;
- управление исполнительными звеньями параллельного механизма с учетом технического состояния систем приводов и внешней нагрузки для обеспечения заданного закона движения.

Практическая значимость полученных результатов

В диссертации 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 механизмов параллельной кинематической структуры. Решение поставленной задачи позволяет:

- определить техническое состояние систем приводов в процессе эксплуатации без применения сложных громоздких вычислительных средств в режиме реального времени;

- определить текущую внешнюю нагрузку на исполнительные приводы системы;
- выполнить совместный анализ технического состояния приводов параллельных механизмов, 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 механизмов параллельной кинематической структуры.

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.

Общая характеристика диссертации и автореферата диссертации

Представленный текст диссертации является законченной, самостоятельно выполненной автором научно-квалификационной работой, соответствующей по поставленным целям, задачам исследований и содержанию паспорта научной специальности 2.5.2 – Машиноведение. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, описаны объект и предмет исследований. Сформулированы цель и задачи исследования, новизна, теоретическая и практическая значимость работы, применяемые методы решения. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Проведена оценка степени достоверности, апробация и публикация основных полученных результатов работы.

В первой главе «Области применения и существующие методы оценки технического состояния систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры» рассмотрены основные сферы применения параллельных механизмов и выполнен критический анализ существующих методов оценки текущего и прогнозного технического состояния их систем приводов, сформулированы цели и задачи дальнейших исследований.

Во второй главе «Динамический анализ и принципы выбора режима эксплуатации механизмов параллельной кинематической структуры при частичном отказе их исполнительных приводов» рассмотрена динамика параллельных механизмов двух наиболее распространенных кинематических структур с шестью активными независимыми кинематическими цепями. Для каждой кинематической структуры получена система уравнений Лагранжа второго рода, описывающая взаимосвязь управляющих сил и обобщенных координат платформы. Сформулирована проблема обеспечения заданного

закона движения при частичном отказе системы приводов механизма параллельной кинематической структуры. Автором предложено в формулу расчета управляющей силы ввести интегральный коэффициент, учитывающий техническое состояние привода, нагрузку, количество и взаимное расположение неисправных приводов друг относительно друга.

В третьей главе «Принципы построения систем оценки технического состояния приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры» обоснована актуальность и целесообразность применения киберфизических систем оценки технического состояния исполнительных приводов параллельных механизмов. Рассмотрены основные компоненты, входящие в состав киберфизических систем и сформулированы основные требования к ним. Предложена структура и сформулированы принципы построения системы оценки технического состояния, предусматривающие анализ сигнала тока и/или вибрации привода в режиме реального времени, используя сочетание традиционных математических методов с искусственными нейронными сетями. Сформулированы принципы построения отказоустойчивой системы приводов, предусматривающих определение текущей и дополнительной нагрузок на приводы системы, а также принятие решения по выбору режима эксплуатации параллельного механизма с применением аппарата нечеткой логики. В работе предложена структура информационной части системы оценки технического состояния приводов механизма параллельной кинематической структуры, определены этапы разработки и сформулированы основные принципы синтеза, предусматривающие анализ параметров 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.

Четвертая глава «Метод оценки технического состояния приводов механизмов параллельной кинематической структуры» посвящена разработке метода оценки текущего и прогнозного технического состояния систем приводов параллельных механизмов по параметрам тока и/или вибрации. В работе установлена закономерная взаимосвязь, позволяющая по результатам вейвлет - разложения сигналов параметров тока и/или вибрации привода определить техническое состояние и внешнюю нагрузку на приводы системы. Автором предложен метод оценки текущего технического состояния приводов параллельных механизмов, отличающийся расчетом коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие вейвлет-коэффициентов на характерных масштабах. Предложен метод оценки прогнозного технического состояния приводов, реализующий ступенчатую экстраполяцию спрогнозированных значений коэффициентов прямых, аппроксимирующих огибающие значений вейвлет-коэффициентов на характерных масштабах для определения периода сохранения работоспособности приводов. Объединение методов оценки текущего и прогнозного значения позволило автору получить единую

систему оценки технического состояния приводов.

Пятая глава «Метод синтеза отказоустойчивых машин и механизмов параллельной кинематической структуры» посвящена разработке метода проектирования отказоустойчивых параллельных механизмов. В работе проведён анализ способов повышения надежности механизмов параллельной кинематической структуры и обоснована целесообразность применения нагрузочного резервирования систем приводов и целесообразность количественной оценки изменения надежности с применением комплексного показателя – коэффициента технического использования. Автором сформулированы критерии выбора режима эксплуатации параллельного механизма, учитывающие граничные условия надежности, статической устойчивости, нагрузки и управляемости системы. Разработаны модели оценки текущей и дополнительной нагрузок при частичном отказе системы приводов, модель принятия решения по выбору режима эксплуатации параллельного механизма с частичным отказом систем приводов, метод синтеза отказоустойчивых систем приводов, объединяющий модели расчета текущей и дополнительной нагрузок с моделью интеллектуального принятия решения и оптимизации режима эксплуатации параллельного механизма, 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. В работе предложен метод управления механизмом параллельной кинематической структуры с учетом технического состояния и внешней нагрузки для обеспечения поддержания заданной скорости движения звеньев и выполнения необходимого технологического процесса.

В шестой главе «Принципы структурирования киберфизических систем оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры» разработаны принципы структурирования систем оценки технического состояния приводов параллельных механизмов, обеспечивающие измерение текущих значений параметров тока и/или вибрации и их анализ с помощью предложенных методов оценки технического состояния. Автором предложена двухуровневая архитектура киберфизической системы оценки технического состояния отказоустойчивых систем приводов механизма параллельной кинематической структуры, нижний уровень которой реализует методы оценки технического состояния каждого привода, а верхний – принятие решения по выбору режима дальнейшей эксплуатации механизма в соответствии с его кинематической структурой.

В седьмой главе «Экспериментальные исследования моделей и методов оценки технического состояния и синтеза отказоустойчивых приводов механизмов параллельной кинематической структуры» выполнена серия экспериментов, подтвердившая работоспособность предложенных теоретических основ оценки технического состояния, точность определения текущего состояния привода, поиска неисправностей и прогнозирования технического

состояния, возможность перераспределения при отказе части приводов группы, а также адекватность модели принятия решения при выборе режима эксплуатации и целесообразность изменения нагрузки с учетом текущего и прогнозного состояний работоспособных сервоприводов параллельного механизма. В работе исследована система управления звеньями механизма при частичном отказе системы приводов и показано, что введенная корректирующая функция обеспечивает заданную скорость перемещения при изменении внешней нагрузки на сервоприводы.

В работе автором рассмотрены вопросы эффективности и достоверности использования методологии оценки технического состояния. Установлено, что применение предложенной методологии обеспечивает повышение коэффициента технического использования оборудования на 16 %; достоверность диагностирования по току и вибрации – не менее 93 %. При этом 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.

Автором разработаны рекомендации по проектированию отказоустойчивых систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры с учетом текущего и прогнозного технического состояния, учитывающие тип исполнительного привода и кинематическую структуру механизма.

В приложении к диссертации представлены программные модули киберфизической системы диагностирования и прогнозирования технического состояния, а также акты внедрения результатов работы.

Диссертация написана грамотным языком на высоком техническом уровне, оформлена и иллюстрирована в соответствии с предъявляемыми требованиями. 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. Автором получены 2 патента РФ на изобретения и 2 патента РФ на полезные модели. По теме диссертации опубликована монография.

Автореферат отражает достаточно полно основные положения и выводы диссертации.

Замечания по содержанию диссертации

Подтверждая актуальность, научную обоснованность и практическую значимость диссертационной работы, необходимо отметить ряд моментов, требующих пояснения:

1. В тексте диссертации на стр. 28 сказано, что «элементы системы должны быть встроены в корпус всех исполнительных приводов МПКС, осу-

ществлять измерение и анализ диагностической информации в режиме реального времени». Это открывает возможности дистанционного диагностирования. Можно также использовать переносные диагностические комплексы, которые намного дешевле в расчете на единицу обслуживаемого оборудования. В работе отсутствуют рекомендации по выбору диагностического оборудования и обоснованию метода диагностирования.

2. Требуется пояснения, почему для анализа технического состояния сервоприводов выбраны диагностические параметры тока или вибрации (повидимому, имеется в виду сила тока, частота и амплитуда колебаний?), а не многопараметрические методы диагностирования. Также непонятно, почему не использованы методы тестового диагностирования.

3. В п. 2.3 при описании принципов выбора режима эксплуатации механизмов параллельной кинематической структуры при частичном отказе систем приводов используется словосочетание «оценить будущий уровень нагрузки». Необходимо пояснить, каким образом выполняется данная оценка, кем и по каким параметрам?

4. В п.2.3 словосочетание «режим эксплуатации» не совсем удачно, т.к. речь идёт о возможности использования изделия при наличии неисправности (частичного отказа).

5. В п. 3.2. предложена функциональная схема киберфизической системы диагностирования, содержащая пять уровней. В п. 3.3 и 3.4 при рассмотрении принципов построения описаны только системы диагностирования и принятия решения, остальные уровни в третьей главе не рассмотрены.

6. На рисунке 3.6 (стр.81) показана структурная схема системы оценки технического состояния, а на рисунке 3.7 (стр. 84) – структурная схема отказоустойчивой системы приводов механизма параллельной кинематической структуры, которая включает основные блоки схемы с рисунка 3.6. Необходимо обосновать данное объединение.

7. Целесообразно пояснить, в чем заключаются особенности оценки технического состояния систем приводов механизмов параллельной кинематической структуры. Могут ли данные принципы быть использованы для других общепромышленных электрических и гидравлических приводов?

8. В тексте работы отсутствует описание порядка расчёта вейвлет-коэффициентов (п. 4.2). Почему в качестве базового был выбран вейвлет Морле?

9. В диссертации автор предлагает несколько моделей определения текущей и дополнительной нагрузок, а также методы обоснования режима эксплуатации. Почему нельзя было ограничиться одной моделью?

10. В тексте встречается небрежность в формулировках, например на стр. 65 «...гидронасоса, вращаемого электродвигателем,,», а также опечатки.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным ВАК Минобрнауки России для докторских диссертаций

В целом, изложенные выше замечания не снижают ценности проведенных исследований и не ставят под сомнение их научную новизну, обоснованность и достоверность.

Диссертационная работа Кругловой Татьяны Николаевны является законченной научно-квалификационной работой, в которой автором на основании собственных исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно расценивать как научное достижение - решение научной проблемы, имеющей важное экономическое и хозяйственное значение для машиностроения.

Автором разработана методология оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры. Изложены новые научно-обоснованные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие машиностроительной отрасли.

Диссертационная работа содержит новые научные результаты, свидетельствующие о личном вкладе автора в науку. Акты внедрения результатов исследования и разработок свидетельствуют о практическом использовании полученных автором научных результатов и наличии экономического эффекта от внедрения.

По научному уровню, новизне, объему полученных данных, теоретической и практической значимости диссертационная работа Кругловой Т.Н. «Методология оценки технического состояния систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры» является завершенной научно-квалифицированной работой, соответствующей критериям Положения о присуждении ученых степеней (п.п. 9-11, 13-14), и паспорту специальности 2.5.2, по которой представлена к защите, а ее автор **Круглова Татьяна Николаевна**, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.2 – Машиноведение.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), академик Академии проблем качества, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный инженер России, доктор технических наук, профессор

Владимир Александрович Зорин

Почтовый адрес:

125319, г. Москва, Ленинградский проспект 64

Тел. 8(499)155-04-55

Моб. Тел. +7(916)6382144

e-mail: madi-dm@list.ru

Дата: « 14 » мая 2024



Подпись *В.А. Зорин* удостоверяю
документовед о/к *И.А. Маршова*