

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
и инновационной деятельности

Д. Т. Н. Дощейт

А. А. Семенов

мая 2024 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования**

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»**

на диссертацию **Скрябина Алексея Валерьевича** на тему:

«Разработка методов и алгоритмов системы ранней диагностики технического состояния электромеханического рулевого привода летательного аппарата с использованием интеллектуального анализа данных», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Актуальность. Диссертация посвящена разработке методов и алгоритмов для последующего создания системы ранней диагностики технического состояния системы электромеханического рулевого привода (ЭМРП), используемого для отклонения аэродинамических поверхностей летательного аппарата. В настоящее время ЭМРП находят широкое применение на борту летательных аппаратов различных типов и продолжается их внедрение в эксплуатацию, связанное с созданием

электрического самолета. Характерной особенностью ЭМРП является с одной стороны – его ответственная область применения, а с другой стороны – сложность организации резервирования его компонентов, поэтому создание систем ранней диагностики технического состояния для ЭМРП является крайне актуальным. Одновременно в диссертации дается общая картина достижений в данной области исследований. Существующие системы диагностики ЭМРП, обеспечивают только мониторинг технического состояния с использованием сравнения признаков технического состояния с пороговыми значениями, либо с сигналами математических моделей рабочих процессов, протекающих в ЭМРП, что не позволяет определять текущее техническое состояние и предсказывать события отказов для проведения своевременного технического обслуживания и недопущения опасных ситуаций во время полета.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав и заключения, списка литературы, включающего 110 наименований и 1 приложения. Диссертация изложена на 180 страницах машинописного текста, содержит 116 рисунков и 33 таблицы.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки) поскольку проведенное исследование посвящено:

- Формализации и постановке задач для ранней диагностики технического состояния ЭМРП с использованием методов и алгоритмов интеллектуального анализа данных;
- Разработке критериев оценки эффективности для выбора алгоритмов интеллектуального анализа данных;
- Разработке методики определения технического состояния и алгоритмов фильтрации диагностических сигналов, а также

классификации и прогноза состояния системы электромеханического привода;

- Разработке математической модели системы электромеханического привода и моделированию сценариев ухудшения динамических характеристик, связанных с неисправностями редуктора, используемых для формирования обучающей и тестовой выборок для интеллектуального классификатора, основанного на нейронной сети;
- Разработке и исследовании генетических алгоритмов поиска оптимальных значений, обеспечивающих наилучшие показатели качества линейного тренда при прогнозировании ухудшения характеристик привода.

Научные результаты исследований и их новизна. К новыми научным результатам работы следует отнести следующие:

- Разработана модель системы ранней диагностики, обеспечивающей как определение технического состояния ЭМРП, так и прогнозирование его изменения на основе анализа признаков износа отдельных подсистем ЭМРП.
- Разработаны схемы реализации алгоритмов диагностики и критерии выбора методов интеллектуального анализа данных, используемые для решения задач классификации и прогнозирования в создаваемых алгоритмах.
- Для эффективной диагностики состояния ЭМРП разработан комбинированный алгоритм классификации (интеллектуальный классификатор), обеспечивающий фильтрацию диагностических сигналов (выбор информативных признаков) с использованием статистических методов, и определение класса технического состояния с использованием двухслойной нейронной сети прямого распространения.

- Определены внутренние признаки износа редуктора и экспериментально исследованы их связи с сигналами ЭМРП, которые контролируются в ходе эксплуатации, в результате сформирована методика классификации технического состояния редуктора ЭМРП на основании анализа ухудшения частотных характеристик, связанного с ростом люфта, и снижения запасов по располагаемому моменту, связанного с ростом трения.
- Разработан метод прогнозирования технического состояния ЭМРП, основанный на построении тренда по интегральному информативному признаку, определяемому по спектру изменения стационарного диагностического сигнала: сумма амплитуд на заданных частотных диапазонах. Для поиска границ диапазонов, содержащих наиболее ценную информацию о развитии неисправности, разработаны многокритериальная и однокритериальные оптимизационные модели, которые позволяют определить адекватный и наиболее выраженный линейный тренд.
- Разработана и экспериментально подтверждена программно-математическая модель редуктора, которая была использована для формирования входных векторов (выборок) и исследования разработанных алгоритмов ранней диагностики. С использованием результатов моделирования ЭМРП подтверждена высокая эффективность работы разработанных алгоритмов фильтрации, классификации и прогнозирования.

Достоверность полученных результатов. Достоверность применяемых автором схем анализа данных и алгоритмов обеспечена корректным использованием методов системного анализа.

Опираясь на проведенные результаты экспериментальных исследований ЭМРП, автор отмечает его недетерминированный режим работы, связанный с различными сценариями воспроизведения позиционных

управляющих воздействий и внешними факторами: механической нагрузкой (шарнирным моментом) и температурой. Рассматривая существующие подходы, методы и алгоритмы к диагностике ЭМРП, автор делает обоснованный вывод о возможности применения интеллектуального анализа данных в перспективных разрабатываемых системах ранней диагностики.

Достоверность результатов моделирования и сценариев развития неисправностей подтверждается результатами выполнения экспериментальных исследований и верификации разработанной автором математической модели ЭМРП.

Практическая значимость заключается в разработке методики и алгоритмического обеспечения, которые могут применяться для создания систем ранней диагностики следящих позиционных электромеханических систем, используемых в качестве исполнительных механизмов в системах управления летательным аппаратом. Разработанные и исследованные схемы анализа данных совместно с критериями выбора методов интеллектуального анализа данных могут также использоваться для оценки технического состояния электромеханических систем в других областях машиностроения.

Рекомендации по использованию результатов и выводов. Разработанные методы позволяют оценить техническое состояние одного исполнительного механизма, тем не менее при разработке и внедрении технологии ранней диагностики на борту летательного аппарата рекомендуется разработать диагностический комплекс, который мог бы определять и прогнозировать техническое состояние системы рулевых приводов. Также целесообразно разработать процедуру сервисного обслуживания, предусматривающую функционирование подобного комплекса совместно с существующими системами мониторинга и наземными средствами технического обслуживания.

Разработанные алгоритмы являются универсальными для определения технического состояния сложной технической системы и могут быть опробованы для диагностики исполнительных механизмов гидравлического типа, которые в настоящее время широко применяются на современных пассажирских самолетах. Таким образом возможно решить проблему ограниченного ресурса агрегатов, замена которых в настоящий момент проводится по времени налета, и внедрить сервисное обслуживание по состоянию гидравлических приводов.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для дальнейшего использования и внедрения в отраслевых научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях и авиастроительных предприятиях, в том числе: ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» (Москва), ПАО «Яковлев» (Москва), ПАО "ОАК" ОКБ Сухого.

Научные исследования по данной тематике рекомендуется продолжать в АО «ПМЗ Восход» (г. Павлово), в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ», в ЦНИИ РТК (Санкт-Петербург), в «Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете)» (МАИ) и др.

Реализация результатов. Результаты диссертации использованы в целом ряде научно-исследовательских работ, проведенных в ФАУ «ЦАГИ» с Министерством промышленности и торговли, а также внедрены в ОАО «ЛИИП им. Гризодубовой В.С.», что позволило сократить сроки летных испытаний БЛА и в учебный процесс в МАИ в Филиале «Стрела» в качестве составной части курса кафедры С-12. В ФАУ «ЦАГИ» разработана установка для проведения ресурсных испытаний ЭМРП БЛА, в которой для определения технического состояния используются разработанные алгоритмы ранней диагностики.

Апробация результатов работы и публикации по теме. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных работах, из них 3 работы, опубликованных в научных изданиях согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты исследований на соискание ученой степени кандидата наук (перечень ВАК), докладывались на международных и всероссийских конференциях (6 работ в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science), зарегистрировано 2 патента на полезную модель и 1 программа для ЭВМ.

Автореферат и публикации автора полностью отражают содержание диссертационной работы.

В качестве замечаний по диссертационной работе можно отметить, следующие:

1. Разработанная автором программно-математическая модель ЭМРП (стр. 53) представляет трение моделью Карнопа, которая является статической и в ряде случаев контролируемые параметры, наблюдаемые в программно-математической модели, могут расходиться с контролируемыми параметрами, протекающими в натурном ЭМРП.

2. В созданной методике классификации (стр. 89) автор оценивает эффективность разработанных алгоритмов на данных моделирования сценариев развития неисправностей при постоянной температуре и отсутствии механической нагрузки, вариативность которых, существующая в реальной системе, может оказывать существенное влияние на результат решения.

3. Основное внимание в работе уделяется исследованию механических неисправностей. Тем не менее, в сочетании с ухудшением характеристик в других системах (например, при падении напряжения в цепях питания инвертора и/или электродвигателя), характер признаков неисправностей редуктора может сильно отличаться от характера при

изолированном рассмотрении. Поэтому, при создании системы ранней диагностики ЭМРП следует рассмотреть неисправности смешанных типов, относящихся к разным подсистемам ЭМРП.

4. Для оценки эффективности работы разработанных алгоритмов классификации и прогнозирования целесообразно использовать сигналы моделирования работы ЭМРП при наложении на них шумовой составляющей с различными характеристиками, что позволит оценить устойчивость работы алгоритмов в различных условиях.

5. Из текста работы не понятно каким образом разработанные алгоритмы и методы могут быть интегрированы на борт летательного аппарата для их практического применения.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Скрябина Алексея Валерьевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны и изложены новые теоретические положения и научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития систем ранней диагностики сложных систем электромеханических рулевых приводов, что позволит обеспечивать повышение безопасности и эффективности органов управления летательного аппарата.

Уровень диссертации соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (в ред. Постановлений Правительства РФ), а соискатель, Скрябин Алексей Валерьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Отзыв на диссертацию и автореферат Скрябина Алексея Валерьевича подготовлен, обсужден и утвержден на заседании кафедры Систем автоматического управления ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина)», протокол № 1/05-2024 от «15 мая 2024 года. Доклад Скрябина Алексея Валерьевича заслушан на этом же заседании.

И.о. заведующего кафедрой САУ
Кандидат технических наук, доцент

Профессор кафедры САУ
Доктор технических наук, доцент

Ученый секретарь кафедры САУ
Кандидат экономических наук, доцент

 Н.А. Доброскок
 В.Е. Кузнецов
 Т.Л. Русева

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф.

Телефон: +7 812 234-6818

Электронная почта: vekuznetcov@etu.ru, info@etu.ru

Сайт: www.etu.ru

С отзывом ознакомлен

28.05.2024

