

На правах рукописи



Скрябин Алексей Валерьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СИСТЕМЫ РАННЕЙ
ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО РУЛЕВОГО ПРИВОДА
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Жуковский
2024

Работа выполнена в испытательном центре «Динамика» научно-исследовательского центра безопасности полетов федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ») ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского».

Научный руководитель: Баженов Сергей Георгиевич, доктор технических наук, доцент, начальник НИО-15 «Динамика и системы управления ЛА» ФАУ «ЦАГИ», заведующий кафедрой С-12 «Аэромеханика, управление и навигация ЛА» филиала «Стрела» МАИ, профессор УНИЦ АЛТ МФТИ

Официальные оппоненты: Романова-Большакова Ирина Константиновна, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры Робототехнические системы и мехатроника, заместитель декана по магистратуре факультета Специальное машиностроение МГТУ им. Н. Э. Баумана

Косьянчук Владислав Викторович, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора ФАУ «ГосНИИАС»

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

Защита диссертации состоится «20» июня 2024 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте МАИ по адресу: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=179319#

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 Учёный совет МАИ.

**Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.03
доктор технических наук**



А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время наблюдается значительный прогресс в интеллектуализации систем управления и мониторинга сложных технических систем. В ближайшем будущем этот прогресс будет невозможен без применения методов и средств искусственного интеллекта, включая методы машинного обучения и анализ больших данных, искусственные нейронные сети (НС), базы данных и знаний. Одним из актуальных направлений применения интеллектуальных методов является разработка методов и средств оценки состояния критически важных технических систем летательного аппарата (ЛА) с последующим формированием рекомендаций по их эксплуатации.

В настоящее время в РФ и за рубежом активно ведутся интенсивные работы в области создания «более электрического самолета» (БЭС), предполагающего применение электромеханических рулевых приводов (ЭМРП) вместо традиционно применяемых гидравлических приводов, с целью улучшения сервисного обслуживания и снижения расходов на эксплуатацию при сохранении либо повышении безопасности полета.

Исследования, проводимые ведущими производителями авиатехники (Airbus, Boeing, Sikorsky и др.), исследовательскими организациями (NASA, DLR, CESA, ЦАГИ и др.) и разработчиками силовых систем управления (Liebherr, Moog, Parker и др.) показали возможность решения задачи оценки технического состояния ЭМРП и его прогнозирования путем анализа признаков неисправностей, прямого измерения которых не существует, для косвенного измерения в стендовых условиях применяют дополнительные датчики вибрации и акустической эмиссии. За исключением линейных стационарных систем поиск признаков является неформализованной задачей, поэтому требуется разработка методов ранней диагностики состояния ЭМРП.

В связи с этим весьма перспективным представляется использование методов анализа больших данных (“big data”), полученных в ходе математического моделирования, натуральных испытаний и эксплуатации ЭМРП для выявления трендов изменения характеристик ЭМРП и ранней диагностики его состояния.

В работе на основе системного подхода разработаны методы и алгоритмы системы ранней диагностики технического состояния ЭМРП, предназначенной для обнаружения деградации характеристик и прогнозирования появления неисправностей.

Таким образом, актуальность работы обусловлена: переходом на архитектуру системы управления БЭС;

- необходимостью повышения показателей безопасности эксплуатации летательных аппаратов и снижения затрат на техническое обслуживание авиационной техники;

- возрастающими возможностями применения средств интеллектуального анализа данных в технических системах, и, соответственно, необходимостью формирования требований к эффективности применяемых алгоритмов ранней диагностики технического состояния систем;

- необходимостью перехода к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении результатов обработки больших объемов данных, технологий машинного обучения и искусственного интеллекта (п. 21а Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утв. Указом Президента РФ от 28.02.2024 № 145).

Целью работы является разработка методов и алгоритмов ранней диагностики сложной технической системы ЭМРП на основе системного подхода с использованием интеллектуального анализа данных для повышения безопасности эксплуатации и эффективности технического обслуживания при использовании ЭМРП в системах управления полетом БЛА и БЭС.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие научно-технические **задачи**:

1. Разработка модели системы ранней диагностики технического состояния ЭМРП и определение ее архитектуры (подсистем, надсистем и их взаимосвязей) и функций.

2. Разработка модели деградации характеристик ЭМРП на основе экспериментальных данных и математического моделирования.

3. Выбор репрезентативных параметров ЭМРП, характеризующих деградации и разработка методики для определения признаков,

характеризующих техническое состояние ЭМРП.

4. Разработка программно-математической модели ЭМРП, учитывающей изменения технического состояния в отдельных компонентах, и ее верификация по экспериментальным данным.

5. Разработка и исследование методов и алгоритмов анализа функционирования ЭМРП в различных технических состояниях на основе анализа больших данных.

6. Валидация и оценка эффективности разработанных методов и алгоритмов ранней диагностики технического состояния ЭМРП на результатах математического моделирования и экспериментальных данных.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, методы обработки информации в сложных системах, методы теории больших данных, методы машинного обучения, компьютерное моделирование сложных технических систем с использованием специализированных сред моделирования и методы экспериментальных исследований силовых систем управления.

Научная новизна заключается в разработке методической основы системы ранней диагностики технического состояния ЭМРП, а именно:

- На основе системного подхода сформирована архитектура системы ранней диагностики ЭМРП, подсистемами которой являются блок управления и контроля электромеханического привода, интеллектуальный классификатор, база прецедентов и алгоритмы прогнозирования информативных признаков. Системами верхнего уровня (надсистемами) являются комплексная система электронной индикации и сигнализации (КСЭИС) и бортовая система технического обслуживания (БСТО) или их функциональные аналоги.

- Разработана программно-математическая модель ЭМРП, учитывающая ухудшение характеристик при развитии наиболее вероятных деградаций в редукторе ЭМРП. Модель верифицирована на полученных в работе экспериментальных данных и адаптирована к работе с эксплуатационными данными работы реальных приводов.

- Сформирована система классификации и прогнозирования технического состояния ЭМРП и его элементов, включая штатное

функционирование, функционирование с допустимыми параметрами деградации, функционирование в режиме, близком к отказному состоянию.

- Разработана методика обнаружения прогрессирующих деградаций, опробованная на программно-математической модели ЭМРП. Выбраны параметры, характеризующие деградации редуктора ЭМРП, исследовано их влияние на регистрируемые сигналы для формирования набора сигналов системы ранней диагностики для классификации технического состояния ЭМРП.

- На основе методов машинного обучения разработаны алгоритмы классификации технического состояния ЭМРП и его прогнозирования. Для получения обучающей и тестовой выборки для формирования алгоритмов системы ранней диагностики технического состояния ЭМРП и исследования ее эффективности используется разработанная программно-математическая модель ЭМРП.

- Подтверждена эффективность разработанных алгоритмов на экспериментальных данных моделирования процессов развития деградаций редуктора ЭМРП.

Практическая значимость результатов. Сформированы и отработаны рекомендации по архитектуре, функциям и алгоритмам системы ранней диагностики технического состояния ЭМРП. Реализация предложенных автором новых научно-технических решений в области систем диагностики технического состояния ЭМРП позволит:

- повысить безопасность полета и снизить затраты на сервисное обслуживание перспективных пилотируемых и беспилотных ЛА с силовой системой управления на базе ЭМРП.

- использовать разработанные подходы и методы в инженерной практике для диагностики технического состояния электромеханических систем в авиационном, железнодорожном и автомобильном транспорте с повышенной степенью электрификации.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы использовались в научно-исследовательских работах Министерства промышленности и торговли, выполняемых ФАУ «ЦАГИ». Материалы диссертационной работы внедрены в ОАО «ЛИИП им. Гризодубовой

В.С.», что позволило сократить сроки летных испытаний БЛА. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе в Филиале «Стрела» МАИ 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.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием классических методов системного анализа, современных методов и средств исследований систем управления, отработанных технологий машинного обучения, корректным применением математического аппарата и экспериментальной верификацией модели ЭМРП и валидацией функций системы ранней диагностики.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 21-й международной конференции «Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES)». Франция, г. Марсель, 2017 г.; 11-16 международных конференциях «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD)». г. Москва, ИПУ РАН, 2018-23 гг.; XII мультиконференции по проблемам управления «Управление аэрокосмическими системами (МКПУ-УАКС)». п. Дивноморское, г. Геленджик, 2019 г.; «XXIV Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM)». г. Санкт-Петербург, ЛЭТИ, 2021 г.; «32-м Конгрессе международного совета авиационных наук (ICAS)», КНР, г. Шанхай, 2021 г.; международном форуме «АРМИЯ», круглый стол «Интеллектуальные алгоритмы в системах управления летательных аппаратов», аэродром г. Кубинка, 2022 г.

Все результаты, представленные в диссертации, **получены автором лично или при его непосредственном участии**. При непосредственном участии автора проведены экспериментальные исследования статических и динамических характеристик ЭМРП, на основании которых автором лично разработана программно-математическая модель ЭМРП БЛА, а также проведена ее верификация, т.е. показано, что модель адекватно воспроизводит функционирование

ЭМРП с учетом деградации редуктора. Исследованы процессы развития деградаций и выбраны характеризующие их параметры ЭМРП, на основании которых автором предложена классификация технического состояния, разработаны методы диагностики и прогнозирования технического состояния с использованием данных экспериментальных исследований и математического моделирования ЭМРП. Автором определены критерии выбора методов интеллектуального анализа данных и машинного обучения, используемых в алгоритмах диагностики и прогнозирования технического состояния ЭМРП. При разработке проекта стенда ресурсных испытаний систем управления автором разработана методика проведения ускоренных ресурсных испытаний ЭМРП с использованием разработанных методов диагностики и прогнозирования его технического состояния.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ (включая электронные сборники и журналы). Из них 3 работы, входящие в перечень ВАК и 6 работ, индексируемых в базах цитирования Scopus и Web of Science. По теме работы зарегистрировано 2 патента на полезную модель и 1 программа для ЭВМ.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный системный подход к построению системы ранней диагностики ЭМРП, предлагаемая структура, функции и алгоритмы. Подход основан на предложенной классификации технических состояний ЭМРП, анализе параметров работы привода с помощью алгоритмов интеллектуального анализа данных, позволяющих определять текущее состояние привода и его компонентов и прогнозировать его изменение.

2. Разработанная нелинейная программно-математическая модель ЭМРП БЛА, учитывающая деградации редуктора типа «люфт» и «трение», верифицированная по результатам испытаний и результаты моделирования сценариев развития деградаций.

3. Методика определения параметров деградаций ЭМРП путем анализа статических и энергетических характеристик ЭМРП на основе экспериментальных исследований и математического моделирования с

помощью разработанной программно-математической модели ЭМРП.

4. Разработанные алгоритмы поиска информативных признаков деградаций, основанные на методах анализа временных рядов и спектрального состава, которые используются для прогнозирования технического состояния ЭМРП на основе контролируемых сигналов.

5. Интеллектуальный классификатор технического состояния, построенный с использованием методов машинного обучения на данных большого объема.

6. Результаты экспериментальных исследований и математического моделирования по оценке эффективности разработанных методов и алгоритмов оценки технического состояния ЭМРП для обнаружения деградаций ЭМРП, классификации его состояния и прогноза изменения технического состояния.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложенных на 180 страницах машинописного текста, включая 116 рисунков, 33 таблицы и 110 наименований литературных источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, на основе системного анализа поставлены цели и задачи исследования, кратко охарактеризовано состояние проблемы, определена научная новизна и показана практическая значимость работы.

В первой главе проведен обзор темы исследования, отмечается широкое использование следящих ЭМРП (рис. 1) на современных БЛА, а также перспектива их внедрения в эксплуатацию на пилотируемой технике в связи с повышением степени электрификации ЛА. Отмечена необходимость внедрения систем диагностики технического состояния, позволяющих определить степень деградации ЭМРП при воспроизведении тестового управляющего сигнала.

Выполнен обзорный анализ применяемых средств диагностики технического состояния ЭМРП, к которому предъявляются высокие требования по точности позиционирования и динамическим характеристикам, требуемым для управления объекта. Отмечен недетерминированный режим работы следящего ЭМРП,

затрудняющий формализацию признаков технического состояния, в отличие от электромеханических систем, работающих на режимах с постоянной скоростью. Тем не менее диагностика ЭМРП может выполняться по данным проведения «пассивного» эксперимента (в полете) и «активного эксперимента» (при отработке заданных последовательностей сигналов, напр. при наземном обслуживании между полетами ЛА).

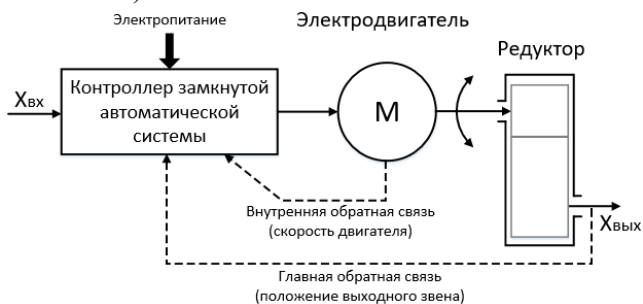


Рисунок 1 – Функциональная схема ЭМРП

Проведен анализ существующих демонстраторов и реальных систем диагностики технического состояния ЭМРП и результаты исследований их функционирования. Основным диагностическим признаком, связанным со степенью деградации ЭМРП, является увеличение потребляемого тока питания. Редуктор является наиболее критичной подсистемой ЭМРП, отказ (заклинивание или рассоединение) в которой может приводить к особой ситуации. Существует много факторов, характеризующих деградации редуктора (износ, выработка зубцов, развитие трещин и пр.) для выявления которых может применяться «активный эксперимент». Перспективные системы диагностики механических систем в качестве основных признаков неисправностей (деградаций) используют параметры люфта и сухого трения.

Отмечается, что в настоящее время широкое распространение получили методы диагностики технических систем, основанные на интеллектуальном анализе больших данных и методах машинного обучения, которые показали высокую эффективность. Подобные методы для их внедрения требуют наличия статистических данных, содержащих информацию о развитии неисправностей. В связи с тем,

что получение данных с натуральных образцов ЭМРП в настоящий момент затруднительно (данные отсутствуют на предприятиях-изготовителях ЭМРП), возможно построить математическую модель, которая отражает процессы развития неисправностей (модель износа) и провести моделирование и регистрацию сигналов, которые могут измеряться в натурном ЭМРП.

В результате анализа сделан вывод о целесообразности разработки подхода к решению задачи диагностики технического состояния ЭМРП, сочетающего преимущества метода оценки технического состояния путем сравнения процессов, протекающих в реальной системе и в ее математической модели (традиционный контроль по схеме «канал-модель») и подхода на основе методов машинного обучения на основе прецедентных данных о работе ЭМРП, получаемых в ходе его жизненного цикла и математического моделирования.

На основе системного подхода определены структура и функции системы ранней диагностики технического состояния ЭМРП, подсистемами которой являются блок управления и контроля электромеханического привода, интеллектуальный классификатор и база прецедентов. Системами верхнего уровня (надсистемами) являются комплексная система электронной индикации и сигнализации (КСЭИС) и бортовая система технического обслуживания (БСТО) или их функциональные аналоги.

Во второй главе описывается разработанная программно-математическая модель (рис. 2) ЭМРП БЛА, которая использовалась для разработки и исследования методов оценки технического состояния.

При разработке модели использовались модели физических подсистем (стандартные блоки среды моделирования). Модель редуктора выполнена в виде «двухмассовой системы» и представляет собой моменты инерции ротора ЭД и редуктора, между которыми существует упругая связь и люфт, а также учитываются сухое и вязкое трения. Именно эти параметры характеризуют деградацию редуктора, поскольку упругая связь и люфт оказывают существенное влияние на частотные характеристики ЭМРП, а трение определяет увеличение потребляемого тока и увеличение температуры. В качестве модели

трения используется статическая модель Карноппа, которая не требует расчета с малым шагом интегрирования и позволяет сократить время при моделировании сценариев развития деградаций в сравнении с динамическими моделями трения.

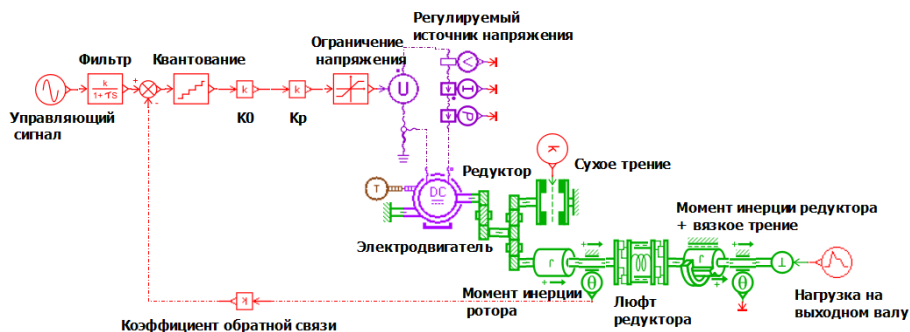


Рисунок 2 – Блок схема программно-математической модели ЭМРП

Для определения параметров разработанной модели и ее верификации были проведены экспериментальные исследования статических и динамических характеристик ЭМРП БЛА.

Рассмотрены основные факторы, определяющие динамику развития деградаций в ЭМРП: механическая нагрузка на штоке, определяемая шарнирным моментом органа управления и инерционными силами, и температурное воздействие при функционировании.

Исследование прогрессирующих деградаций обуславливает необходимость разработки методики формирования данных о работе ЭМРП в процессе эксплуатации, которые в дальнейшем используются в качестве выборки для обучения и тестирования интеллектуального классификатора. Для получения статистических данных, необходимых для обучения классификатора запланировано проведение испытаний нескольких изделий и регистрация диагностических сигналов при выработке ресурса. Предлагается исследовать процессы износа ЭМРП при недопущении выхода на предельные режимы по нагрузке с использованием известного метода ускоренного воспроизведения рабочих циклов, при котором работа, выполняемая приводом в процессе испытаний, соответствует типовой полетной циклограмме (рис. 3), воспроизводимой на протяжении эксплуатации

привода. Для исследования процессов развития деградаций для нелинейной системы ЭМРП предлагается использовать треугольную форму управляющего сигнала амплитуды и частоты, подбираемых для обеспечения предельного режима работы ЭМРП по скорости.

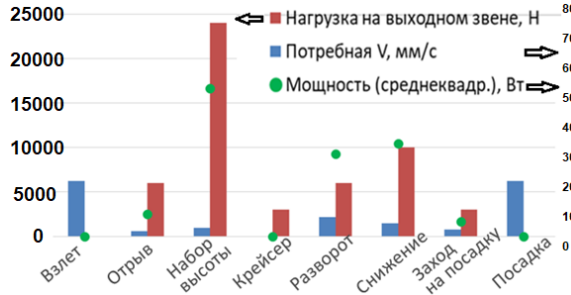


Рисунок 3 – Пример механической полетной циклограммы элерона современного магистрального самолета

При воспроизведении рабочих циклов нагружения в виде сигналов треугольной формы (рис. 4) работа, выполненная приводом $E_{\Sigma \text{ исп}}$ и длительность испытаний t_{ucn} определяются выражениями:

$$E_{\Sigma \text{ Исп.Треуг.}} = 2 \cdot X_{Cmd} \cdot f \cdot F_{Cmd} \cdot t_{ucn}, \quad t_{ucn} = \frac{E_{\Sigma \text{ ЖЦ}}}{2 \cdot X_{Cmd} \cdot f \cdot F_{Cmd}}$$

где X_{Cmd} , f – амплитуда и частота управляющего сигнала, F_{Cmd} – действующая нагрузка, $E_{\Sigma \text{ ЖЦ}}$ – энергия, потребляемая приводом при эксплуатации ЭМРП на протяжении всего жизненного цикла.

Для исследования процессов развития деградаций редуктора и выбора их параметров на стенде нагрузочных испытательных машин ФАУ «ЦАГИ» в процессе нагрузочных испытаний проведена экспериментальная оценка статических характеристик позиционирования, полученные при отработке треугольных управляющих сигналов малой частоты 0,01 Гц и малой амплитуды 0,5% максимального хода, позволяющие оценить характеристики нелинейностей «в малом», т.е. люфта и трения. Был зафиксирован рост люфта с начального значения ~ 50 мкм до 100 мкм, вследствие деградации редуктора, возникшей при проведении типовой программы испытаний рулевого привода под нагрузкой, (рис. 4).

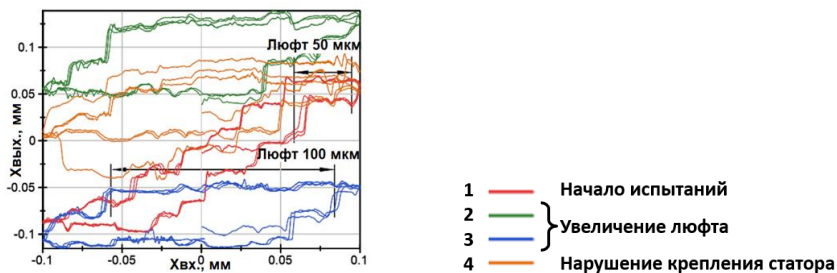


Рисунок 4 – Статические характеристики позиционирования ЭМРП, в процессе испытаний на нагрузочном стенде

С ростом деградаций редуктора увеличиваются потери потребляемой энергии на трение, которые можно определить через изменение силы тока при воспроизведении управляющего сигнала с максимальной амплитудой и разной частотой. Момент трения в значительной мере зависит от механической нагрузки и температуры окружающей среды, что подтверждено в ходе стендовых испытаний. Таким образом, для оценки степени деградации редуктора предлагается использовать оцениваемые величины механического люфта и трения, возрастающие в ходе эксплуатации ЭМРП.

Разработанная методика формирования данных о работе ЭМРП в процессе эксплуатации была применена к созданной программно-математической модели, отражающей динамику изменения процессов износа. Разработанная нелинейная модель ЭМРП воспроизводит данные испытаний с высокой точностью, ошибка в статических и динамических характеристиках не превышает 10% (рис. 5).

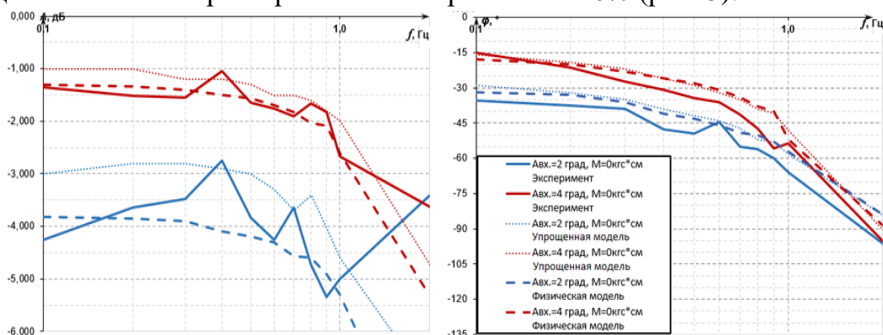


Рисунок 5 – Сравнение АЧХ и ФЧХ математической модели и результатов эксперимента ЭМРП

В третьей главе изложен теоретический подход к диагностике технического состояния ЭМРП, на основе разработанной его программно-математической модели и предложенной модели деградации редуктора, оцениваемой на основании регистрируемых диагностических сигналов работы ЭМРП.

Задача диагностики технического состояния ЭМРП формулируется, на основе теоретико-множественного подхода как задача классификации. На основе известного конечного множества описаний состояния ЭМРП: $\{(\bar{x}_1, \bar{y}_1), \dots, (\bar{x}_k, \bar{y}_k)\}$, $\bar{x}_i \in X, \bar{y}_i \in Y, i = 1, \dots, k$, требуется построить алгоритм оценки состояния ЭМРП $\Phi: X \rightarrow Y$, позволяющий для произвольного вектора $\bar{x} \in X$ получить вектор $\bar{y} \in Y$, где X – множество векторов значений контролируемых параметров ЭМРП, Y – множество меток классов, отражающих состояния ЭМРП, в отношении которых могут приниматься решения о принадлежности к одинаковым классам.

В общем случае $X = R^{n \times q}$, $Y = R^m$, где n – число контролируемых параметров ЭМРП; q – размерность временного ряда, на котором рассматриваются значения параметров ЭМРП; m – множество целых чисел, являющихся метками классов, соответствующих одинаковым состояниям ЭМРП.

В работе рассматривается три класса состояний ЭМРП, определяемых параметрами люфта (BL) и сухого трения (Mfr):

- **Исправное:** $BL \in [0,05 \ 0,50]^\circ, Mfr \in [0,25 \ 0,70]$ Нм;
- **Предаварийное:** $BL \in [0,55 \ 1,00]^\circ, Mfr \in [0,75 \ 1,20]$ Нм;
- **Аварийное:** $BL \in [1,05 \ 1,50]^\circ, Mfr \in [1,25 \ 1,70]$ Нм.

Границы диапазонов, характеризующих исправное состояние, определены в конструкторской документации разработчика ЭМРП и подтверждены экспериментально при стендовых испытаниях серийного образца ЭМРП. Границы диапазонов, характеризующих аварийное состояние по моменту выбраны в соответствии с ограничениями, задаваемыми разработчиком ЭД по длительности безопасной работы привода под нагрузкой, а по люфту обусловлены появлением самопроизвольных периодических процессов на выходном звене, которые наблюдались в ходе экспериментальных исследований при увеличенном люфте. Границы диапазонов, характеризующих

предаварийное состояние, являются промежуточными между исправным и предаварийным состояниями.

Необходимо определить закономерности во временных рядах регистрируемых параметров ЭМРП, по которым можно определить его принадлежность к тому или иному классу. Эта задача может быть решена различными методами. В частности, были проанализированы различные алгоритмы классификации технического состояния: метод k-ближайших соседей, деревья решений, метод опорных векторов и др. Однако, эти методы требуют значительных объемов памяти для хранения базы прецедентов, высокой производительности для расчета избыточно сложной модели оценки технического состояния и неустойчивы при работе с зашумленными сигналами, что затрудняет их использование в системе диагностики. В результате был разработан интеллектуальный классификатор на базе двухслойной нейронной сети прямого распространения, показавшей высокую точность для решения задачи классификации и обладающей высокой компактностью хранения данных, что позволяет использовать обученный алгоритм на промышленных контроллерах. Для обучения НС формируется база прецедентов, т.е. сценариев и результатов моделирования ЭМРП с использованием разработанной программно-математической модели при различных значениях люфта, сухого трения и эксплуатационных параметров. Реализация разработанного подхода в системе ранней диагностики технического состояния ЭМРП включает два этапа.

На первом этапе с использованием методов интеллектуального анализа данных (ИАД) осуществляется поиск и формализация закономерностей в данных, соответствующих выбранному набору прецедентов (техническое состояние, сценарий функционирования, регистрируемые данные во временной области) – настройка весовых коэффициентов связей НС. *На втором этапе* формальное представление найденных закономерностей и выбранные методы ИАД интегрируются в алгоритм классификации технического состояния ЭМРП и его прогноза.

Для формирования требований к разрабатываемой системе оценки технического состояния ЭМРП определены следующие критерии выбора методов ИАД: уровень формализации, детерминированность

алгоритма, вычислительная сложность, способ добавления новой информации, т.е. возможность модификации и дообучения. К примеру, дообучение НС для оценки степени деградации ЭМРП может проводиться между полетами по данным бортовых регистраторов. Критериями для формирования требований к эксплуатационным свойствам системы определены: функциональность, адекватность, интерпретируемость результата, устойчивость функционирования в условиях неопределенности, вычислительная сложность алгоритма формирования решения, компактность хранения взаимосвязей, возможность формирования альтернативных вариантов решения.

С учетом этих требований разработана система ранней диагностики технического состояния ЭМРП, которая использует:

- интеллектуальный классификатор на основе искусственной НС и алгоритмов фильтрации диагностических сигналов;
- алгоритм прогнозирования технического состояния ЭМРП с помощью построения тренда изменения информативных признаков на основе методов оптимизации. В работе для построения тренда использовались генетические алгоритмы.

В четвертой главе представлены результаты исследований разработанных алгоритмов диагностики и прогнозирования технического состояния при моделировании процессов развития деградаций ЭМРП с использованием программно-математической модели, описанной в главе 2.

Анализируемый вектор контролируемых параметров, которые доступны измерениям, состоит из 12 диагностических сигналов: V1 Управляющий сигнал [°]; V2 Угол поворота ротора [°]; V3 Положение выходного вала [°]; V4 Напряжение питания ЭД [В]; V5 Ток питания ЭД [А]; V6 Мощность питания ЭД [Вт]; V7 Частота вращения ротора ЭД [Об/мин]; V8 Момент на роторе ЭД [Нм]; V9 Мощность на роторе ЭД [Вт]; V10 Частота вращения выходного вала [Об/мин]; V11 Момент на выходном валу [Н·м]; V12 Мощность на выходном валу [Вт].

Для сокращения размерности вектора контролируемых параметров и выбора сигналов, удовлетворяющих условию идентифицируемости, т.е. достоверно отражающих деградацию ЭМРП была оценена их корреляция с признаками отнесения технического

состояния ЭМРП к тому или иному классу. Для этого выполнена их сортировка и отбор по критерию χ^2 Пирсона, определенному по формуле: $\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{(N_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}$, где N_{ij} – наблюдаемая частота совместного наступления событий i и j (признак h принимает i -е значение в заданной шкале градаций, а прецедент относится к классу j); E_{ij} – ожидаемая частота совместного наступления событий i и j ; r – количество градаций признака контролируемого параметра h ; s – количество классов, определяемых вектором \bar{y} .

Также выполнена оценка уровня взаимной корреляции контролируемых параметров и формирование групп взаимосвязанных признаков. Из каждой группы взаимосвязанных признаков выбирается один признак, имеющий наибольшую важность по критерию χ^2 , в результате выбраны информативные признаки: V2, V5, V9, V11 (рис. 6).

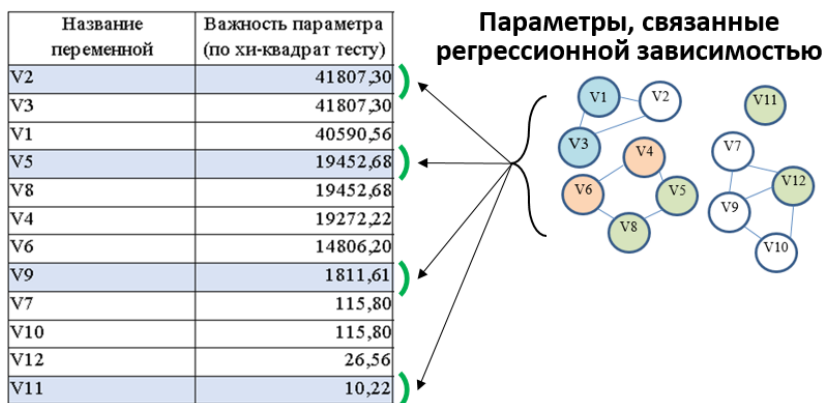


Рисунок 6 – Отбор (фильтрация) признаков для обучения НС

Для выбора эффективного классификатора было обучено 50 двухслойных НС, у которых в скрытом слое от 4 до 16 нейронов, с отбором наиболее информативных сигналов. Обучение проходило на примере воспроизведения полетной циклограммы. На рис. 7 приведен участок, соответствующий взлету БЛА.

Точности классификации лучшей НС на обучающей и тестовой выборках представлены в табл. 1. При уменьшении количества входных параметров с 12 до 4, обеспечена высокая точность классификации и уменьшение количество нейронов, что значительно

ускорило обучение НС. Для проведения исследований была использована обучающая выборка, содержащая 20000 примеров и тестовая выборка, содержащая 60000 примеров.

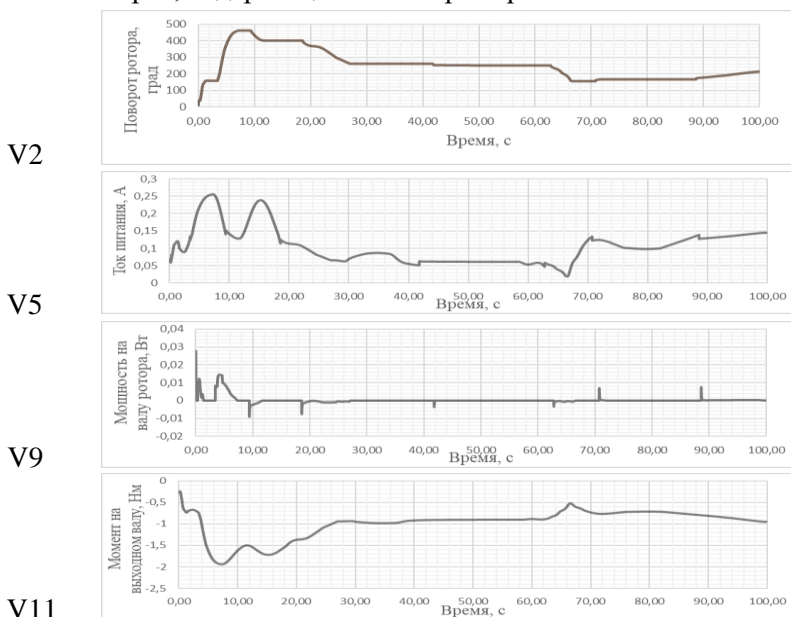


Рисунок 7 – Выделенные информативные признаки ЭМРП при моделировании взлета БЛА

Таблица 1 – Результаты использования НС, показавшей наилучшие результаты

Входные параметры	Количество нейронов			Точность классификации	
	Вх. слой	Скрыт. слой	Вых. слой	Обуч. выборка (%)	Тест. выборка (%)
V2,V5,V9,V11	4	14	2	99,985	98,010

При воспроизведении ЭМРП треугольных управляющих сигналов исследованы деградации смешанного типа, характеризующиеся значениями люфта и трения, для определения состояния по каждому из которых используется своя НС. Результат применения НС на тестовой выборке обеспечил точность 99,75 % для классификации по изменению трения и 98,64 % по изменению люфта (см. табл. 2).

Таблица 2 – Матрица «перепутывания» при классификации технического состояния по деградации люфта на тестовой выборке

Объективное моделируемое состояние	Оценка состояния с применением алгоритма		
	Штатное состояние	Предаварийное состояние	Аварийное состояние
Штатное	98,64%	1,36%	0,00%
Предаварийное	1,00%	98,00%	1,00%
Аварийное	0,00%	0,67%	99,33%

На рис. 8 видно, что при определении состояния ЭМРП возможны ошибки классификации на граничных значениях, характеризующих классы деградаций. Причиной этого может быть ложное срабатывание НС по одному признаку или несрабатывание по другому. Информация о таких событиях передается в бортовую систему технического обслуживания (БСТО) для более детального исследования.

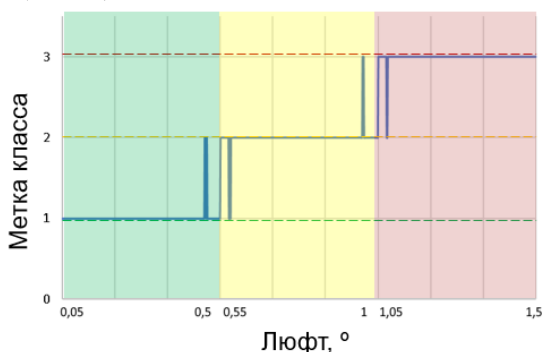


Рисунок 8 –Результат применения НС для определения технического состояния редуктора ЭМРП, связанного с изменением люфта

Для прогноза состояния ЭМРП используется тренд изменения наиболее информативного параметра, который формируется по его спектральной мере, в качестве которой берется сумма амплитуд на выбранных частотах. Выбор частот выполняется по разработанным алгоритмам, основанным на многокритериальных оптимизационных моделях с критериями: угол наклона линейного тренда (α) и коэффициент детерминации (R^2), отражающих адекватность прогнозирования и «выраженность» тенденции. Для поиска частот интегрирования спектра использовались генетические алгоритмы,

формирующие множество решений α и R^2 на Парето-фронте. Алгоритмы исследованы на данных моделирования ЭМРП (рис. 9) и верифицированы на данных ресурсных стендовых испытаний бесколлекторного электродвигателя, что позволяет использовать их для прогнозирования деградаций в реальном приводе.

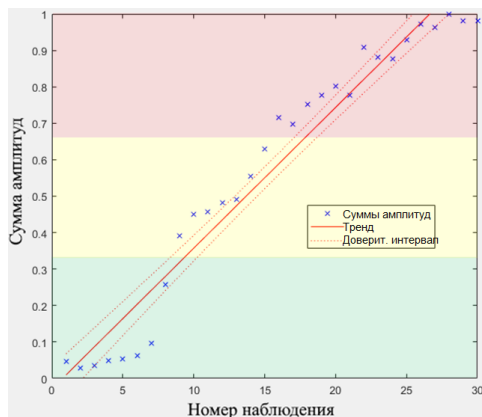


Рисунок 9 – Построение тренда по сигналу силы тока питания, для выбранных оптимальных значений R^2 и α , деградация по люфту

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для решения задачи ранней диагностики ЭМРП ЛА на базе системного анализа сформирована архитектура системы ранней диагностики, т.е. системы верхнего и нижнего уровней и их взаимодействие. Определены функции системы, разработаны модели формирования и анализа данных, в которых объединены методы интеллектуального анализа данных (ИАД) и алгоритмы выделения информативных признаков.

На стенде нагрузочных испытательных машин ФАУ «ЦАГИ» проведены экспериментальные исследования рабочих процессов, протекающих в редукторе ЭМРП, и определены репрезентативные параметры деградаций: люфт и трение, которые могут быть использованы для определения классов технического состояния.

На основе экспериментальных данных создана и верифицирована программно-математическая модель ЭМРП БЛА, позволяющая реализовать различные сценарии деградаций редуктора. Проведено

моделирование развития деградаций редуктора при воспроизведении управляющего сигнала, соответствующего полетной циклограмме и периодическому сигналу треугольной формы.

Разработаны алгоритмы ИАД выделения и анализа информативных признаков, основанные на методах: «фильтрации», «оберточных» и «встроенных», которые обеспечили подготовку данных для классификации прогнозирования технического состояния на примере результатов моделирования ЭМРП ЛА. Использование разработанных алгоритмов позволило снизить размерность вектора исходных данных и необходимый объем обучающей выборки, что повысило качество моделей оценки и прогнозирования технического состояния ЭМРП.

Проведен анализ эффективности алгоритмов классификации технического состояния ЭМРП и его прогнозирования как путем математического моделирования, так и по результатам экспериментальных данных. Результаты проведенных исследований показали, что применение разработанных моделей, алгоритмов и методов в задаче диагностики ЭМРП ЛА является обоснованным и позволяет как классифицировать текущее техническое состояние с высокой точностью и достоверностью, так и прогнозировать его изменение при проведении регулярных наземных проверок, выполняемых между полетами при техническом обслуживании ЛА в случае организации обслуживания по состоянию системы рулевых приводов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Скрябин А.В. Системы контроля технического состояния и прогнозирования неисправностей электромеханических рулевых приводов летательного аппарата. Современный уровень развития. // Общероссийский научно-технический журнал «Полет», №2, с. 50-64, 2018 (№ 1947 в перечне ВАК по состоянию на 19.12.2023 г.).

2. Вересников Г.С., Гуцевич Д.Е., Скрябин А.В. Разработка математической модели для исследования алгоритмов оценки и прогноза технического состояния сервопривода БЛА // Известия ЮФУ. Технические науки № 7-2019 URL: http://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/issue/view/13/15, Таганрог, 2019, С: 170-181 (9 с. авт., № 1017 в перечне ВАК по состоянию на 03.04.2019 г.).

3. Вересников Г.С., Скрябин А.В. Методы искусственного интеллекта в системах автоматизированного управления беспилотными летательными аппаратами // «Информационные технологии», 2024, Т.30, №3, С. 115-123 (7 с. авт., № 1385 в перечне ВАК по состоянию на 19.12.2023 г.).

Публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus и WoS

1. Skryabin A., Veresnikov G. The development of data mining methods criteria to identify failures of aircraft control surface actuator // 21st International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems, Марсель, Франция, университет Экс-Марсель, Procedia Computer Science vol. 112, с. 1007-1014, 2017.

2. Skryabin A., Veresnikov G. The Electromechanical Actuator Technical Condition Monitoring System Based on Data Mining Methods, 2018 Eleventh International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Москва, ИПУ РАН, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/MLSD.2018.8551829.

3. Veresnikov G., Skryabin A. Methods for Mechanical Failures Assessment to Determine the Technical State of Aircraft Control Surface Electromechanical Actuator, 2021 XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Санкт-Петербург, 2021, pp. 60-62, doi: 10.1109/SCM52931.2021.9507174, ЛЭТИ.

4. Bazhenov S., Skryabin A., Veresnikov G. The Development of Algorithms for EMA Fault Early Detection System // Proceedings of 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2020), Шанхай, КНР, CSAA, 2021 г.

5. Skryabin A., Veresnikov G. Feature Selection Algorithms for Forecasting Technical Condition of Electromechanical Actuator, 2021 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Москва, ИПУ РАН, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/MLSD52249.2021.9600182, Россия.

6. Veresnikov G. and Skryabin A., "Diagnostics of Mixed Type Failures in the Aircraft Electromechanical Gear by Using Neural Networks" 2022 15th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Москва, М.: IEEE, 2022, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9600182>, Россия.

Результаты интеллектуальной деятельности

1. Потетенькин В.Я., Скрябин А.В., Халецкий Л.В. Электромеханический следящий привод // Патент на полезную модель № 147865 от 17.06.2014.

2. Арапов Г.Е., Ерофеев Е.В., Кудрявцев П.С., Скрябин А.В., Стеблинкин А.И., Халецкий Л.В. Патент на полезную модель 191471 Нагрузочная машина для динамических испытаний рулевых приводов летательных аппаратов от 07.08.2019.

3. Берко Г.С., Ерофеев Е.В., Скрябин А.В., Стеблинкин А.И. Программа определения частотных характеристик испытуемых рулевых приводов на стенде нагрузочных испытательных машин // Св-во о регистрации программы для ЭВМ № 2013661808 от 16.12.2013.