

# Методы оценки кинематических параметров для определения технического состояния электромеханического рулевого привода летательного аппарата

Г. С. Вересников

Лаборатория поддержки принятия решений  
Институт проблем управления Российской академии  
наук им. В.А. Трапезникова  
Москва, Россия  
veresnikov@mail.ru

А. В. Скрыбин

Отделение динамики полета и систем управления  
ФГУП «ЦАГИ»  
Филиал «Стрела» МАИ  
Жуковский, Россия  
skryabinalexey@gmail.com

**Аннотация.** В работе рассматриваются способы определения технического состояния следящего электромеханического привода с использованием диагностических признаков позиционирования и потерь энергии на трение. Приводится обоснование выбранных признаков на примере испытанного макета электромеханического рулевого привода с роликвинтовой передачей. Показано влияние механических неисправностей на статическую характеристику позиционирования привода. Предложены и опробованы на модельных данных алгоритмы оценки технического состояния электромеханического рулевого привода с использованием методов машинного обучения.

**Ключевые слова:** электромеханический привод, электрический самолет, диагностика неисправностей, анализ данных

## I. ВВЕДЕНИЕ

Разработки перспективных летательных аппаратов (ЛА) характеризуются повышением степени электрификации их основных систем [1]. Важным направлением разработок электрического ЛА является создание силовой системы управления (ССУ) полетом с электрическим энергопитанием. Одним из элементов подобной системы является следящий электромеханический рулевой привод (ЭМРП) (рис. 1).

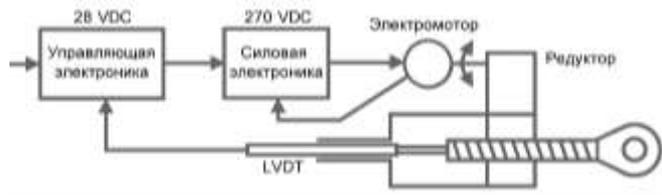


Рис. 1. Обобщенная схема следящего ЭМРП

Основной сложностью применения ЭМРП в ССУ самолета транспортной категории является необходимость сохранения или повышения показателей безопасности

полета на уровне не ниже системы с широко используемыми в настоящее время электрогидравлическими рулевыми приводами. Подобное использование ЭМРП требует обеспечения установленных требований динамики, точности позиционирования и энергетической эффективности. Наличие деградаций в основных компонентах ЭМРП может ухудшать реализуемые приводом характеристики до уровней, приводящих к отказам исполнительного механизма, поэтому целесообразно выполнять мониторинг и диагностику технического состояния ЭМРП.

Для признания ЭМРП самолета транспортной категории работоспособным он должен, по крайней мере, удовлетворять следующим требованиям:

- позиционирование выходного звена с точностью не менее 1 мм;
- движение штока привода, отклоняющего рулевую поверхность со скоростью не менее 30 °/с, как без нагрузки, так и под нагрузкой, не превышающей 66 %  $F_{max}$ ;
- способность удержания штоком привода заданного положения при действии максимальной нагрузки 100%  $F_{max}$ ;
- полоса пропускания привода (-3 дБ) не менее 1 Гц при воспроизведении управляющего сигнала 1 мм;
- запаздывание по фазе для малых амплитуд входного сигнала  $X_{in}=[0,5...1]$  мм на частоте 0,5 Гц не более 20 °, на частоте 1 Гц не более 35 °;
- подъем амплитудной характеристики в диапазоне до 0,5 Гц не более 1,5 дБ; в диапазоне [0,5...25] Гц не более 2,5 дБ;
- способность совершать перемещения от упора до упора;
- плавный ход при движении (без подклиниваний);

- корректный обмен данными блока управления приводом с вычислителем комплексной системы управления ЛА.

Представленные выше требования могут быть частично проверены в ходе нормального функционирования привода (при полете), но для выполнения полной оценки исправности требуется проведение дополнительных исследований (например, в ходе наземной отработки ЭМРП). Отклонения от данных требований могут являться критериями оценки технического состояния ЭМРП в целом. Диагностирование неисправности возможно с использованием показаний датчиков, которые регистрируются в блоке управления приводом.

Классификация отказного состояния и степени деградации отдельных компонентов возможна с использованием современных методов анализа данных [2-4], выполняющих сравнение текущего состояния ЭМРП с паттернами из базы технических состояний, сформированной на основе знаний о работе ЭМРП.

Получение знаний о работе ЭМРП целесообразно проводить на всех этапах жизненного цикла, в том числе включающих этапы его разработки, изготовления и испытаний, а также последующую эксплуатацию. На начальном этапе проектирования и создания аппаратуры управления, когда разрабатываемые подсистемы существуют только в виде их математических моделей, проводятся изыскательные работы на этих моделях. По мере создания макетных образцов ЭМРП появляется возможность отработки его в натурном виде в предполагаемых внешних условиях работы (физические нагрузки, климатические воздействия и др.).

## II. ОСНОВНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ ЭМРП

Каждая подсистема ЭМРП обладает набором различных характерных классов неисправностей. Для редуктора, в основном включающего в себя вращающиеся элементы (подшипники, тела качения, шестерни, а также гайка и винт для винтовой передачи, либо волнообразователь для волновой передачи) наиболее характерны такие деградации, как: износ, пластические деформации, образование трещин и коррозия, которые, в конечном счете, приводят к образованию стружки, увеличению люфта, увеличению вибраций, заклиниванию или полному разрушению отдельных узлов. Помимо механического воздействия на ЭМРП износ компонентов происходит из-за коррозии металлов, развивающейся под воздействием атмосферной влажности и наличия химически агрессивных веществ в рабочей среде. Основным материалом изготовления механических узлов привода – сталь – обладает средней коррозионной стойкостью. На локализацию коррозионных процессов также влияют механические нагрузки, вызывающие напряженное состояние материала и местное изменение электрического потенциала. Скорость развития коррозии в значительной мере связана с температурой, при которой развивается данный процесс. Следовательно, время наработки системы на отказ из-за развития деградации химической природы может уменьшаться при увеличении воздействующей температуры и сохранении концентраций

действующих реагентов. Повышение температуры приводит также к интенсификации процессов изменения микроструктуры металлических деталей, находящихся под силовым нагружением, и, как следствие, к снижению их прочностных характеристик [5].

Рост деградаций электродвигателя (ЭД) и его управляющей электроники, в большинстве случаев, является следствием износа электрических компонентов, полупроводников и магнитов из-за температурного воздействия, коррозии, ионизирующего излучения и естественного старения. Такой износ может вызывать как длительное ухудшение работы системы (напр. уменьшение выходной мощности), так и внезапные отказы (разрыв цепи, короткое замыкание, пробой диэлектрика и т. д.).

Известен способ оценки технического состояния механической системы, имеющей вращающиеся элементы с использованием спектра сигнала акустической эмиссии [6]. Подобный способ требуют установки дополнительных датчиков (микрофонов и/или вибропреобразователей), что ограничивает его применение. Поэтому в задаче диагностики механических компонентов технического состояния ЭМРП наиболее информативными физическими признаками является кинематический люфт и трение, обусловленное диссипативными факторами, возникающими при развитии деградаций. ЭМРП, как правило, оснащен датчиками, необходимыми для определения этих признаков.

## III. ВЫБОР ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Износ редуктора определяется уровнем действующих диссипативных сил трения и величинами зазоров в контактирующих парах, что может быть выявлено увеличением порога чувствительности и общего люфта, а также изменением общего характера статической характеристики позиционирования. Статическая характеристика позиционирования:  $X_{out}=f(X_{ref})$  – это изменение положения выходного звена  $X_{out}$  в зависимости от входного сигнала  $X_{ref}$  при медленно изменяющемся периодическом сигнале постоянной скорости (треугольный сигнал,  $f=0.01$  Гц). Получение данной характеристики необходимо выполнять с использованием сигнала датчика положения выходного звена, при этом замыкание позиционного контура должно выполняться по датчику положения ротора электродвигателя. При замыкании обратной связи по датчику, установленному на выходном звене, сигнал рассогласования возрастает (управляющий сигнал линейно нарастает, выходной вал неподвижен, пока не выбран люфт), тем самым ротор электродвигателя сохраняет скорость не постоянной, а увеличивает её, выбирая люфт быстрее. Таким образом, «величина люфта», определяемая по характеристике позиционирования при замыкании позиционного контура по внешнему датчику положения штока будет в большей степени зависеть от коэффициентов регулятора (при большом коэффициенте усиления «люфт» уменьшается, при малом – увеличивается), а не от фактических текущих зазоров в механической системе.

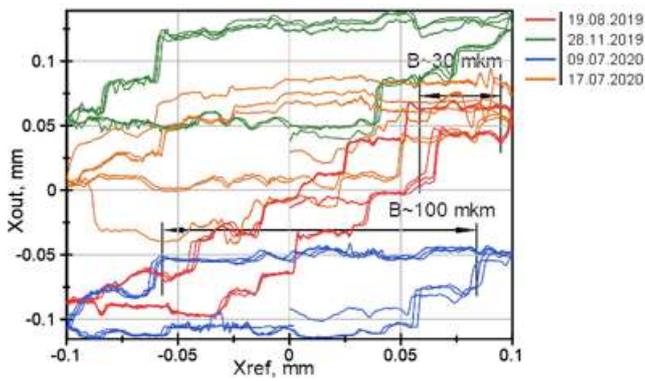


Рис. 2. Статическая характеристика позиционирования макета ЭМРП с РВП, определяемая по датчику положения штока в ходе проведения испытаний под нагрузкой

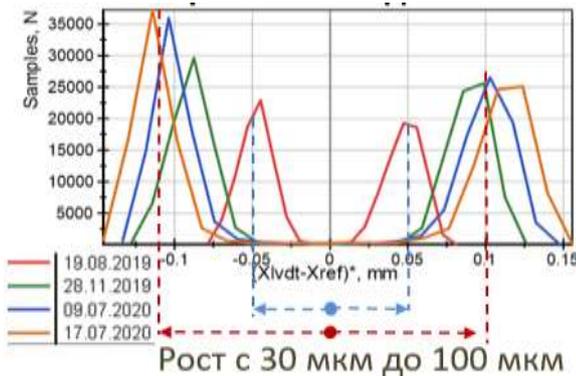


Рис. 3. Статистические значения люфта макета ЭМРП с РВП в ходе проведения испытаний под нагрузкой

Для исследования изменений позиционных признаков на примере макета ЭМРП с роликвинтовой передачей (РВП) были собраны данные для проведения анализа изменения статической характеристики позиционирования в разные моменты времени в ходе проведения испытаний на нагрузочном стенде (рис. 2). В процессе испытаний наблюдался рост значения механического люфта со штатного 30 мкм до 100 мкм (рис. 3), вызванный деградациями механической природы.

Таким образом, осуществляя непрерывный мониторинг данной характеристики в течение жизненного цикла конкретного изделия и накапливая статистические данные о его позиционировании в рабочем диапазоне хода выходного звена можно диагностировать его текущее техническое состояние, выявлять неисправности и снижать вероятность возникновения отказных ситуаций в ходе полета.

Для выявления деградаций механической природы может осуществляться мониторинг потерь энергии на трение. Характеристика трения  $Mst = f(V)$  – зависимость статического момента  $Mst$ , развиваемого ЭД, от скорости вращения его вала (или перемещения штока)  $V$ . Анализ потерь энергии следует проводить при воспроизведении квазистатических режимов (например, при обработке треугольного сигнала) и исследовать участки постоянной скорости, на которых контролируемые параметры должны достигать своих установившихся значений.

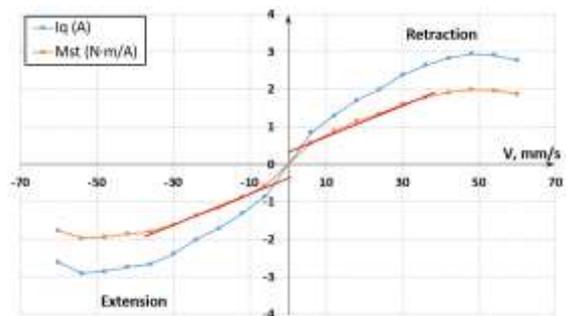


Рис. 4. Определение статического момента трения  $Mst$  по активному току статора  $I_q$  на квазистатических режимах постоянной скорости без нагрузки

Получение характеристики трения может выполняться косвенным способом посредством регистрации установившихся значений активного тока  $I_q$  с последующим его пересчетом в статический момент ЭД и самой скорости  $V$  с использованием коэффициента по моменту  $K_t$ :  $Mst = I_q \cdot K_t$ . На рис. 4 показан способ определения характеристики трения на примере макета ЭМРП с РВП, а в таблице основные параметры трения.

ТАБЛИЦА 1 ПАРАМЕТРЫ ТРЕНИЯ МАКЕТА ЭМРП С РВП

Параметр	Значение параметра
Сухое трение, приведенное к валу электродвигателя, Н·м	0,363
Коэффициент вязкого трения, приведенного к валу электродвигателя, Н·м·с/рад (в интервале скоростей до 1700 об/мин или 36 мм/с)	0,011

#### IV. АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Оценку технического состояния ЭМРП предполагается выполнять с использованием методов машинного обучения. Для построения алгоритма оценки технического состояния ЭМРП предлагается схема анализа данных, представленная на рис. 5.

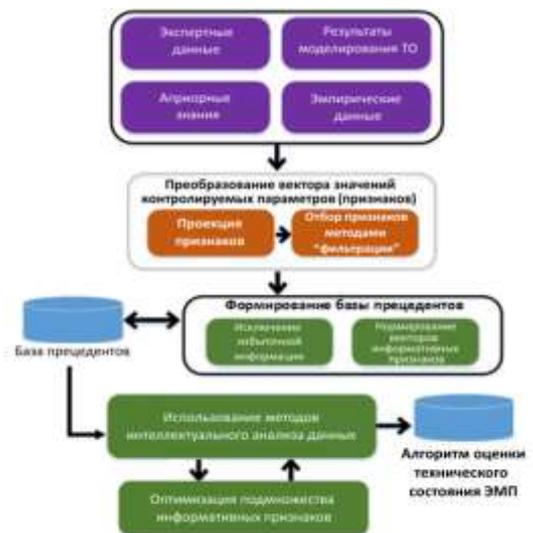


Рис. 5. Схема анализа данных для построения алгоритма оценки технического состояния ЭМП

Представленная схема была исследована на данных, полученных с использованием математической модели ЭМРП с прямозубым редуктором (номинальный момент 3,5 Нм) беспилотного ЛА при отработке режима взлета и «треугольных» сигналов. Для моделирования различных вариантов технического состояния ЭМРП варьировались значения диссипативного момента  $M_{cf}$ . Для нормального состояния  $M_{cf} \in [0.225, 0.375]$  Нм, для опасного состояния  $M_{cf} \in [0.875, 1.025]$  Нм. Полученные данные были разделены на обучающую и тестовую выборки, которые содержат входные параметры (входной сигнал ( $^\circ$ ), поворот ротора ( $^\circ$ ), выходной сигнал ( $^\circ$ ), напряжение питания (В), ток питания (А), мощность питания (Вт), скорость вращения вала (об/мин), момент на валу ротора (Нм), мощность на валу ротора (Вт), скорость вращения выходного вала (об/мин), момент на выходном валу (Нм), мощность на выходном валу (Вт) и метку класса, отражающую нормальное и опасное техническое состояние ЭМРП.

Данные, соответствующие  $M_{cf} = 0.225$  и  $M_{cf} = 1.025$  вошли в обучающую выборку, остальные данные вошли в тестовую выборку.

Применение схемы на рис. 5 позволило на основе обучающей выборки получить алгоритмы оценки технического состояния ЭМРП, которые при отработке режима взлета и «треугольных» сигналов классифицируют верно 100% и 97,6% примеров из тестовой выборки соответственно.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований изучено влияние механических неисправностей на статические характеристики позиционирования ЭМРП. Рассмотренный способ оценки потерь энергии при воспроизведении управляющих треугольных сигналов постоянной скорости позволяет получить значения параметров трения, что необходимо для параметризации математической модели редуктора ЭМРП. Математическая модель ЭМРП, учитывающая люфт и

трение в двухмассовой системе «ротор электродвигателя – редуктор», позволит обеспечить получение адекватных исходных данных для построения алгоритма оценки технического состояния механического тракта ЭМРП в соответствии с предложенной схемой анализа данных.

Построение подробных моделей классификации технического состояния и трендов развития деградаций потребует более детального описания рабочих процессов в ЭМРП и натурной отработки или моделирования системы при действии таких эксплуатационных факторов, как механическая нагрузка и температура окружающей среды, оказывающих существенное влияние на значение диссипативных потерь в системе ЭМРП [7].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Стеблин А.И. Работы по электрификации систем рулевых приводов самолетов в рамках международного проекта RESEARCH // Труды научно-технической конференции «Электрификация летательных аппаратов». М: ид Академии Жуковского, 2016. 332 с.
- [2] Khelifi A., Mansour N., Lakhel B., Gharsallaoui H. Artificial Neural Network-based Fault Detection // 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Thessaloniki, Greece, 2018.
- [3] Li C., Wang Z., Bu S., Liu Z. Semi-Supervised Adaptive Parzen Gentleboost Algorithm for Fault Diagnosis // Proceedings 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012), Tsukuba, Japan, 2012, pp. 2290-2293.
- [4] Patil S.S., Pathan S.K. A novel approach of fault detection using artificial neural network (ANN) // International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) vol. 4, issue 6, 2015, pp. 2715-2720.
- [5] Пивоваров В.А., Хрустик С.Г., Коротков В.А. Диагностика повреждаемости авиационных конструкций: Учебное пособие. МГТУГА, Москва, 73 стр., 2008.
- [6] Phillips P.A. Health Monitoring of Electrical Actuators for Landing Gears // Thesis for the degree of engineering, The school of mechanical, aerospace and civil engineering, University of Manchester, 2012, 241p.
- [7] J.-C. Mare. Friction modeling and simulation at system level: a practical view for the designer. // Proc ImechE Part I: Journal of systems and control engineering 226(6) ImechE 2012, pp. 728-741.