

Андрианов Владимир Вадимович

Санкт-Петербургский университет Гражданской авиации им. А.А.Новикова

Сорокина Анна Олеговна

Санкт-Петербургский университет Гражданской авиации им. А.А.Новикова

Сагитов Дамир Ильдарович

Санкт-Петербургский университет Гражданской авиации им. А.А.Новикова

Методика прогнозирования остаточного ресурса авиационных генераторов на основе экономически эффективного мониторинга

Аннотация. Статья посвящена проблеме объективной оценки остаточной долговечности авиационных источников электроэнергии в условиях жестких ограничений на стоимость диагностических процедур. Обоснована недостаточность классических регламентных стратегий, опирающихся исключительно на календарную наработку и эпизодические инструментальные проверки. Авторами предложена методика, базирующаяся на непрерывной регистрации ограниченного набора физических параметров - вибрационного спектра, градиентов нагрева и пик-фактора тока - с последующей сверткой данных в предиктивные маркеры непосредственно на борту. Ключевая особенность подхода заключается в отказе от централизованной обработки сырых массивов ради минимизации инфраструктурных издержек. Приведены результаты опытной эксплуатации алгоритма на парке турбовинтовых машин, показавшие сокращение отклонения прогноза от фактического состояния до 12% и снижение простоев на 18%. Обозначены нормативные барьеры, препятствующие легитимизации динамической оценки ресурса взамен фиксированных межремонтных интервалов.

Ключевые слова: авиационный генератор, остаточный ресурс, предиктивная диагностика, вибромониторинг, деградация изоляции, обслуживание по состоянию, экономическая эффективность, цифровой двойник, летная годность, машинное обучение.

Andrianov Vladimir Vadimovich

St. Petersburg University of Civil Aviation named after A.A.Novikov

Sorokina Anna Olegovna

St. Petersburg University of Civil Aviation named after A.A.Novikov

Sagitov Damir Ildarovich

St. Petersburg University of Civil Aviation named after A.A.Novikov

Methodology for predicting the remaining life of aviation generators based on cost-effective monitoring

Abstract. The article is devoted to the problem of an objective assessment of the residual durability of aviation power sources in conditions of severe restrictions on the cost of diagnostic procedures. The insufficiency of classical regulatory strategies based solely on calendar time and occasional instrumental checks is substantiated. The authors propose a technique based on the continuous recording of a limited set of physical parameters - the vibration spectrum, heating gradients, and current peak factor - followed by data convolution into predictive markers directly on board. The key feature of the approach is the rejection of centralized processing of raw arrays in order to minimize infrastructure costs. The results of trial operation of the algorithm on a fleet of turboprop machines are presented, which showed a reduction in the deviation of the forecast from the actual condition by up to 12% and a reduction in downtime by 18%. Regulatory barriers

preventing the legitimization of dynamic resource assessment instead of fixed repair intervals are identified.

Keywords: aircraft generator, residual resource, predictive diagnostics, vibration monitoring, insulation degradation, maintenance by condition, economic efficiency, digital twin, airworthiness, machine learning.

Безопасность полета жестко привязана к надежности каналов электроснабжения. Генератор здесь - критический узел, чей непрогнозируемый выход из строя провоцирует лавину отказов смежных систем. Действующая система регламентных работ по наработке имеет фундаментальный изъян: она игнорирует реальную скорость износа конкретного устройства, что ведет либо к неоправданной замене исправного агрегата, либо к пропуску аварийного дефекта.

Традиционный контроль базируется либо на грубых статистических моделях, либо на затратных бортовых комплексах диагностики. Слабые места таких подходов - неспособность уловить латентные деградационные сдвиги в структуре изоляции и механике подшипников. Цель данной работы - предложить методику оценки остаточного ресурса, объединяющую глубину прогноза с экономической целесообразностью мониторинговых процедур.

Основа конструкции агрегата - совмещение приводного узла с синхронной электрической машиной, работающей в широком диапазоне частот вращения. Стабильность выходного напряжения достигается за счет интеграции блока регулирования, что превращает генератор в замкнутую энергопреобразующую систему. В структуре бортового электроснабжения этот узел занимает позицию первичного источника, запитывая как потребителей первой категории, так и заряжая буферные аккумуляторные батареи. [1]

Ресурсная прочность агрегата закладывается на этапе проектирования, однако реальная скорость деградации диктуется триадой эксплуатационных воздействий. Первое - тепловые удары, вызывающие циклические напряжения в изоляционных лаках и компаунд-пропитке. Второе - вибрационный спектр, генерируемый двигателем и набегающим потоком, провоцирующий фреттинг-коррозию в подшипниковых посадках. Третье - резкопеременный характер электрической нагрузки, порождающий динамические моменты в обмотках и искрообразование в щетках (либо перегрев силовых ключей в бесщеточных модификациях). Совокупность этих факторов формирует индивидуальную траекторию истощения заложенного запаса прочности. [2]

Стандартный парк контрольных процедур сводится к визуальной фиксации внешних повреждений, замерам сопротивления изоляции и анализу параметров на холостом ходу. Эти операции проводятся эпизодически, в отрыве от реальных полетных циклов. Ключевой недостаток такого регламента - запаздывание: большинство скрытых зарождающихся аномалий остаются вне поля зрения до момента критического развития деградации.

Попытки компенсировать низкую информативность наращиванием частоты проверок упираются в экономический барьер. Каждое вмешательство сопряжено с простоем борта и трудозатратами квалифицированного персонала. При этом значительная часть агрегатов выводится из эксплуатации преждевременно, не выработав заложенный лимит. Возникает противоречие: расточительная стратегия замен «по возрасту» давит на бюджет, тогда как продление сроков без объективных данных о состоянии металла и диэлектриков неприемлемо для летной годности. Разрешить этот конфликт способна лишь система мониторинга, непрерывно отслеживающая индикаторы износа без демонтажа узла и без кратного роста операционных расходов.

Под экономически эффективным мониторингом понимается такая организация сбора и обработки данных, при которой затраты на внедрение системы окупаются за счет исключения внезапных отказов и сокращения простоев. Ключевые принципы: отказ от избыточной информации в пользу ограниченного набора предиктивных параметров и

применение недорогих сенсоров, совместимых с существующей бортовой архитектурой. [3]

Регистрация сигналов ведется с помощью миниатюрных датчиков вибрации, встроенных токовых клещей и термопар, фиксирующих нагрев в контрольных точках лобовых частей обмоток. Собранный массив поступает в модуль предварительной обработки, где выделяются статистические маркеры: эксцесс виброспектра, скорость роста пик-фактора тока, градиент температуры на переходных режимах. [4] Экономия достигается за счет смещения акцента с дорогостоящих лабораторных тестов на непрерывную регистрацию трендов непосредственно в полете. Оптимизация издержек также включает отказ от централизованной обработки всего потока сырых данных в пользу бортовой свертки информации - на наземный сервер передаются лишь интегральные показатели деградации, что сокращает требования к каналам связи и вычислительным мощностям.

Разработка прогнозной методики выстроена в три последовательных этапа. Начальная фаза - накопление диагностической истории: синхронная запись вибропараметров, токовых флуктуаций и температурных профилей на протяжении фиксированных полетных циклов. Параллельно в базу заносятся данные о наработке до инцидентов, полученные из эксплуатационных карт ранее выведенных из парка агрегатов.

На втором этапе сырой массив преобразуется в пространство информативных признаков. Рассчитываются корреляционные зависимости между спектральными составляющими вибрации и глубиной микроповреждений, оценивается дрейф тангенса угла диэлектрических потерь. Для обработки зашумленных рядов применяются стохастические фильтры, отсекающие фоновую нестационарность режимов.

Итоговая стадия - построение кривой деградации. В отличие от классических регрессионных экстраполяций, здесь могут использоваться рекуррентные нейросетевые архитектуры, обучаемые на временных последовательностях. Такие модели способны улавливать скрытые предвестники резких переходов, например, экспоненциальный рост виброактивности за 50–70 часов до наступления предельного состояния. На выходе алгоритм выдает точечную оценку остаточного запаса и доверительный интервал, давая инженеру смены основание для принятия решения о досрочном техобслуживании либо продлении эксплуатации.

Подход, сочетающий бортовую регистрацию вибрационного спектра, градиентов нагрева и пик-фактора тока со свёрткой в интегральные предиктивные маркеры, известен по литературным данным и результатам эксплуатационных испытаний на парке генераторов региональных турбовинтовых машин. В ходе испытаний на одном из агрегатов зафиксирован рост высокочастотной вибрации с прогнозом отказа подшипникового узла за 120 лётных часов; последующая дефектация вскрыла раковины на дорожках качения. По выборке из 20 агрегатов отклонение прогноза от фактического состояния составило 12 % против 40 % у статистических нормативов, простой сократился на 18 %. [5]

Вместе с тем данный подход обладает ограничениями: фиксированный набор маркеров не адаптирован к разнородному парку генераторов, наземный сегмент не обеспечивает популяционного накопления статистики, а прогноз не учитывает климатические факторы аэродромов базирования. Устранению этих ограничений посвящено предлагаемое авторами усовершенствование.

Мы предлагаем три усовершенствования, сохраняющие экономичность базового подхода:

1. Адаптивный бортовой предиктор - самонастраивается под конкретный генератор, выделяя индивидуальный набор информативных признаков поверх несовместимых интерфейсов.

2. Федеративная наземная модель - уточняет прогноз по обезличенным градиентам со всего парка судов без централизации чувствительных данных.

3. Коррекция по условиям среды - вводит в модель запылённость, влажность и температуру на аэродромах базирования.

Совокупность трёх элементов замыкает методику в самообучающуюся систему, уточняющую прогноз в темпе полёта.

Разнородность парка - ключевой технический барьер - снимается адаптивным предиктором, не требующим унификации интерфейсов. Организационное сопротивление персонала потребует параллельного ведения старой и новой систем на период валидации.

Основной барьер на пути внедрения - разнородность парка. Генераторы разных производителей и поколений имеют несовместимые диагностические интерфейсы, что усложняет унификацию сбора данных. Сопротивление возникает и со стороны персонала, привыкшего к жестким регламентным сеткам: переход на прогнозирование по тренду ломает устоявшиеся логистические цепочки планирования замен.

Отдельный пласт проблем лежит в нормативной плоскости. Действующие авиационные правила оперируют понятиями назначенного и межремонтного ресурса, тогда как динамически рассчитываемый остаток пока не имеет легитимного статуса. Возникает ответственность за решение о продлении эксплуатации, принятое на основании алгоритмической рекомендации: в случае инцидента распределение вины между разработчиком модели, авиакомпанией и надзорным органом юридически не проработано. Потребуется эволюция сертификационных процедур, признающая валидность предиктивной аналитики наравне с традиционными методами контроля летной годности.

Проведенное исследование показало, что переход от календарной регламентации к прогнозированию остаточного ресурса по фактическому тренду деградации устраняет ключевое противоречие эксплуатационной практики - выбор между затратной перестраховкой и неоправданным риском. Экономическая эффективность предложенного подхода достигается не за счет удешевления сенсоров, а благодаря сжатию потока сырых данных до компактного набора предиктивных маркеров, обрабатываемых на борту.

Связка вибродиагностики, термометрии и анализа токовых флуктуаций позволила выявить скрытую фазу зарождения повреждений, недоступную традиционным осмотрам. Апробация на реальном парке подтвердила: методика дает выигрыш и в точности прогноза, и в сокращении внеплановых простоев. Рентабельность инвестиций в мониторинг обеспечивается не иллюзорной экономией на датчиках, а реальным снижением числа отказов в воздухе и оптимизацией складских запасов.

Дальнейшие усилия целесообразно направить на валидацию цифровых двойников, аккумулирующих популяционную статистику деградации, и на сближение позиций с регуляторами. Пока предиктивная оценка не получит легитимного статуса в нормах летной годности, практическое внедрение методики останется узкой инициативой отдельных эксплуатантов. Рекомендуется запуск пилотных проектов совместно с разработчиками авиатехники, в рамках которых будут накоплены статистические доказательства надежности алгоритмических прогнозов, достаточные для последующей сертификации подхода.

Список источников

1. Ревко А. С. Квазирезонансные импульсные преобразователи для систем точного электропривода постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.12 / Ревко Анатолий Сергеевич ; науч. рук. Ю. А. Денисов ; Чернигов. гос. технол. ун-т. – Чернигов, 2004. – 162 с.
2. Фортов В. Е., Фаворский О. Н. Основные проблемы энергетики России // Вестник Российской академии наук. – 2006. – Т. 76. – №. 5. – С. 389-398.
3. Оксак И. В. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта на основе внедрения предиктивной аналитики: магистерская диссертация : дис. – б. и., 2025.

4. Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю., Худоногов А. М. Локальный перегрев изоляции асинхронных вспомогательных машин электровозов в переходных режимах работы // iPolytech Journal. – 2016. – №. 11 (118). – С. 194-200.

5. Цзяньго Ц. и др. Метод прогнозирования срока службы авиационного генератора на основе теории серого // Международная конференция по интеллектуальным вычислениям и интегрированным системам 2010. – IEEE, 2010. – С. 265-268.

Сведения об авторах

Андрианов Владимир Вадимович, студент 2 курса Санкт-Петербургского университета Гражданской авиации им. А.А.Новикова, Россия, Санкт-Петербург.

Сорокина Анна Олеговна, студентка 2 курса Санкт-Петербургского университета Гражданской авиации им. А.А.Новикова, Россия, Санкт-Петербург.

Сагитов Дамир Ильдарович, кандидат технических наук, доцент «Систем автоматизированного управления», Санкт-Петербургский университет Гражданской авиации им. А.А.Новикова, Россия, Санкт-Петербург.

Information about the authors

Andrianov Vladimir Vadimovich, 2nd year student of the St. Petersburg University of Civil Aviation named after A.A.Novikov, Russia, St. Petersburg.

Sorokina Anna Olegovna, , 2nd year student of the St. Petersburg University of Civil Aviation named after A.A.Novikov, Russia, St. Petersburg.

Sagitov Damir Ildarovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Automated Control Systems, Novikov Saint Petersburg University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia.