НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-629.7.083

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПО ФАКТИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ АНАЛИТИКИ

Гулчарова Багтыгуль
Преподаватель, Институт инженерно-технических и транспортных коммуникаций Туркменистана
г. Ашхабад Туркменистан

Джепбарова Чынар
Преподаватель, Институт инженерно-технических и транспортных коммуникаций Туркменистана
г. Ашхабад Туркменистан

Байрамов Алты
Преподаватель, Институт инженерно-технических и транспортных коммуникаций Туркменистана
г. Ашхабад Туркменистан

Сахетмырадов Аманмырат
Преподаватель, Институт инженерно-технических и транспортных коммуникаций Туркменистана
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В статье рассматриваются научно-методические и практические аспекты перехода от планово-предупредительной системы технического обслуживания воздушных судов к обслуживанию по фактическому техническому состоянию на основе бортовых и наземных систем мониторинга. Проанализирована эволюция стратегий технического обслуживания авиационной техники — от обслуживания с жестко установленным ресурсом к логике MSG-3 и концепции обслуживания, ориентированного на надежность. Описана функциональная архитектура системы мониторинга и прогнозирования технического состояния в соответствии с международным стандартом ISO 13374, рассмотрены вероятностные и деградационные модели оценки остаточного ресурса, а также методы машинного обучения, применяемые для прогнозирования отказов газотурбинных двигателей. Сформулированы нормативные, организационные и кадровые условия внедрения прогностического обслуживания в эксплуатирующих организациях и показана роль подготовки инженерно-технического персонала в высших учебных заведениях транспортного профиля.

Ключевые слова: техническое обслуживание воздушных судов, обслуживание по состоянию, летная годность, мониторинг технического состояния, остаточный ресурс, MSG-3, газотурбинный двигатель, распределение Вейбулла, машинное обучение, надежность.

Введение

Гражданская авиация является одним из наиболее наукоемких и ответственных видов транспорта, в котором требования к безопасности полетов, регулярности перевозок и экономической эффективности предъявляются одновременно и с одинаковой строгостью. Значительная часть жизненного цикла воздушного судна приходится на этап эксплуатации, а затраты на техническое обслуживание и ремонт составляют одну из крупнейших статей эксплуатационных расходов авиакомпаний. Поэтому совершенствование методов технической эксплуатации авиационной техники остается актуальной научной и практической задачей.

Традиционная система технического обслуживания, основанная на выполнении регламентных работ через фиксированные интервалы налета, числа циклов «взлет – посадка» или календарного времени, обеспечивает приемлемый уровень безопасности, однако нередко приводит к преждевременной замене исправных агрегатов, избыточным трудозатратам и простоям воздушных судов. Одновременно жесткие межремонтные интервалы не гарантируют отсутствия внезапных отказов, если механизм деградации элемента не связан напрямую с наработкой. Именно поэтому в мировой практике последних десятилетий сформировалась устойчивая тенденция перехода к техническому обслуживанию по фактическому состоянию, при котором решение о выполнении работ принимается на основе объективной информации о текущем техническом состоянии изделия и прогноза его изменения.

Для Туркменистана, где последовательно реализуются программы развития транспортно-коммуникационного комплекса, модернизируется инфраструктура аэропортов и обновляется парк воздушных судов национальной авиакомпании, вопросы рациональной организации технической эксплуатации авиационной техники приобретают особую актуальность. Не менее важной задачей является подготовка инженерных кадров, владеющих современными методами диагностики, анализа данных и управления надежностью. Цель настоящей работы — систематизировать научно-методические основы технического обслуживания воздушных судов по состоянию, рассмотреть архитектуру систем мониторинга и модели прогнозирования остаточного ресурса, а также определить условия их практического внедрения.

1. Эволюция стратегий технического обслуживания авиационной техники

В теории технической эксплуатации принято выделять три основных метода поддержания летной годности элементов воздушного судна: обслуживание с

жестко установленным ресурсом (Hard Time, HT), обслуживание по состоянию с контролем параметров (On-Condition, OC) и обслуживание по состоянию с контролем уровня надежности (Condition Monitoring, CM) [2; 8]. При первом методе изделие снимается с эксплуатации по достижении назначенного ресурса независимо от его фактического состояния. При втором выполняются периодические проверки, и изделие остается в эксплуатации до тех пор, пока контролируемые параметры находятся в установленных пределах. Третий метод применяется к изделиям, отказ которых не оказывает прямого влияния на безопасность полетов: решения принимаются на основе статистического анализа потока отказов в рамках программы надежности эксплуатанта. Сравнительная характеристика методов, дополненная прогностическим обслуживанием, приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов технического обслуживания воздушных судов

Метод	**Основание для выполнения работ**	**Преимущества**	**Ограничения**
По ресурсу (HT)	Достижение назначенного ресурса: летные часы, циклы, календарное время	Простота планирования, предсказуемость затрат	Недоиспользование ресурса исправных изделий; внезапные отказы не исключаются
По состоянию с контролем параметров (OC)	Результаты периодических проверок и измерений относительно установленных допусков	Использование индивидуального ресурса изделия, сокращение числа замен	Необходимы средства контроля и обоснованные допуски; трудоемкость проверок
По состоянию с контролем уровня надежности (CM)	Статистические показатели надежности парка: интенсивность отказов и съемов	Минимальные затраты на профилактику, гибкость программы ТО	Допускается отказ в эксплуатации; неприменим к элементам, критичным для безопасности
Прогностическое (предиктивное)	Непрерывный мониторинг и прогноз остаточного ресурса	Планирование работ до возникновения отказа, сокращение простоев	Высокие требования к данным, моделям и их сертификации

Важнейшим этапом развития научных основ технического обслуживания стало исследование Ф. Ноулана и Г. Хипа, выполненное по заказу Министерства обороны США на основе опыта авиакомпании United Airlines и опубликованное в 1978 году под названием «Reliability-Centered Maintenance» [1]. Анализ статистики отказов показал, что лишь около 11 % элементов гражданских воздушных судов имеют выраженную зависимость вероятности отказа от наработки (кривые типов A, B и C), тогда как для остальных 89 % интенсивность отказов после периода приработки остается практически постоянной или носит случайный характер (кривые типов D, E и F). Следовательно, для большинства изделий плановая замена по ресурсу не повышает надежность, а иногда даже снижает ее за счет внесения дефектов при демонтаже и монтаже.

Эти выводы легли в основу логики принятия решений MSG (Maintenance Steering Group), которая прошла путь от MSG-1, использованной при разработке программы обслуживания самолета Boeing 747, через MSG-2 к современной методологии MSG-3 [7]. В отличие от предыдущих версий, ориентированных на процессы обслуживания отдельных изделий, MSG-3 ориентирована на последствия отказов: для каждой функции системы анализируются виды отказов и их влияние на безопасность, эксплуатацию и экономику, после чего выбирается наиболее эффективная задача технического обслуживания. Аналогичные принципы закреплены в стандарте SAE JA1011, устанавливающем критерии оценки процессов обслуживания, ориентированного на надежность [10]. В русскоязычной научной литературе теоретические основы обслуживания авиационной техники по состоянию были системно изложены в трудах Н. Н. Смирнова и А. А. Ицковича [8], а вопросы эксплуатационной технологичности — в работах Н. Н. Смирнова и Ю. М. Чинючина [9].

2. Архитектура системы мониторинга и прогнозирования технического состояния

Современное воздушное судно представляет собой сложную киберфизическую систему, оснащенную тысячами датчиков. Бортовые средства сбора и регистрации данных — система мониторинга состояния самолета (Aircraft Condition Monitoring System, ACMS), регистратор быстрого доступа (Quick Access Recorder, QAR), встроенные средства контроля (Built-In Test Equipment, BITE) и центральная система технического обслуживания — непрерывно регистрируют параметры работы двигателей, планера и бортовых систем. Часть информации передается на землю в реальном времени по каналу ACARS, остальная выгружается после полета для углубленного анализа в наземном центре управления техническим обслуживанием.

Функциональную структуру системы мониторинга и прогнозирования целесообразно строить в соответствии с международным стандартом ISO 13374 и открытой архитектурой OSA-CBM, предусматривающими шесть последовательных уровней обработки информации [11]:

– сбор данных (Data Acquisition) — получение сигналов от датчиков и бортовых систем с привязкой ко времени и режиму полета;
– обработка данных (Data Manipulation) — фильтрация, приведение к стандартным атмосферным условиям, выделение диагностических признаков;
– обнаружение состояния (State Detection) — сравнение признаков с эталонными значениями и допусками, выявление аномалий;
– оценка технического состояния (Health Assessment) — диагностирование, локализация неисправности и определение степени деградации;
– прогнозирование (Prognostic Assessment) — оценка остаточного ресурса и вероятности отказа на заданном горизонте;
– формирование рекомендаций (Advisory Generation) — выработка решений для инженерного персонала и службы планирования технического обслуживания.

Такая многоуровневая архитектура обеспечивает модульность системы: алгоритмы каждого уровня могут совершенствоваться независимо, а результаты обработки передаются между уровнями через стандартизированные интерфейсы. Ключевым требованием является обеспечение достоверности и целостности данных, поскольку ошибки на ранних уровнях обработки неизбежно приводят к ложным срабатываниям или пропуску дефектов на последующих этапах [3].

3. Математические модели оценки надежности и прогнозирования остаточного ресурса

Классическим инструментом описания надежности авиационных изделий является распределение Вейбулла, функция надежности которого имеет вид

$$R(t) = \exp[-(t/\eta)^{\beta}], \tag{1}$$

где t — наработка (летные часы или циклы); η — параметр масштаба; β — параметр формы. Интенсивность отказов определяется выражением

$$\lambda(t) = (\beta/\eta)\cdot(t/\eta)^{\beta-1}. \tag{2}$$

При $\beta < 1$ интенсивность отказов убывает (период приработки), при $\beta = 1$ распределение вырождается в экспоненциальное с постоянной интенсивностью отказов, а при $\beta > 1$ наблюдается износовый характер отказов. Именно значение параметра формы, оцененное по статистике эксплуатации, во многом определяет целесообразность назначения жесткого ресурса: для изделий с $\beta \le 1$ плановая замена не дает выигрыша в надежности.

Экономически обоснованный интервал профилактической замены для изделий с возрастающей интенсивностью отказов может быть найден из классической модели замены по возрасту, минимизирующей удельные затраты в единицу времени [14]:

$$C(T) = [c_{п}\cdot R(T) + c_{о}\cdot(1 - R(T))] \,/\, \int_0^T R(t)\,dt, \tag{3}$$

где $c_{п}$ — стоимость плановой замены; $c_{о}$ — стоимость замены после отказа, включающая затраты на внеплановый простой воздушного судна, задержки рейсов и возможные вторичные повреждения. Оптимальный интервал T^{*} соответствует минимуму функции $C(T)$; конечный оптимум существует лишь при возрастающей интенсивности отказов ($\beta > 1$) и при $c_{о} > c_{п}$.

Для иллюстрации рассмотрим условный пример: пусть для некоторого агрегата по результатам обработки статистики съемов получены оценки $\beta = 2{,}5$ и $\eta = 10\,000$ ч. Тогда вероятность безотказной работы до наработки 5 000 ч составит $R(5000) = \exp[-(0{,}5)^{2{,}5}] \approx 0{,}838$, а до наработки 8 000 ч — $R(8000) = \exp[-(0{,}8)^{2{,}5}] \approx 0{,}564$. Столь быстрое снижение надежности во второй половине интервала

свидетельствует о выраженном износовом механизме и обосновывает применение либо профилактической замены, либо непрерывного контроля параметров, характеризующих износ.

Статистические модели, однако, описывают поведение совокупности однотипных изделий и не учитывают индивидуальные условия эксплуатации конкретного экземпляра. Переход к обслуживанию по состоянию требует моделей, использующих текущую диагностическую информацию. Широко применяется деградационный подход, при котором техническое состояние описывается обобщенным параметром x(t), монотонно изменяющимся по мере накопления повреждений:

$$x(t) = x_0 + a \cdot t^b + \varepsilon(t), \quad (4)$$

где x_0 — начальное значение параметра; a и b — коэффициенты, оцениваемые по данным мониторинга конкретного экземпляра; ε(t) — случайная составляющая, обусловленная погрешностями измерений и изменчивостью условий полета. Остаточный ресурс (Remaining Useful Life, RUL) в момент времени t определяется как время до достижения параметром предельного значения $x_{пр}$:

$$RUL(t) = \inf\{\tau \geq 0 : x(t + \tau) \geq x_{пр}\}. \quad (5)$$

Поскольку x(t) — случайный процесс, остаточный ресурс является случайной величиной, и практическое значение имеет не только его точечная оценка, но и доверительный интервал. Решение о выполнении работ принимается, если вероятность достижения предельного состояния до следующей плановой возможности обслуживания Δ превышает допустимый уровень риска p*, т. е. при выполнении условия $P\{RUL(t) \leq \Delta\} \geq p^*$. Такой подход позволяет органично встроить прогностическую информацию в существующую систему планирования форм технического обслуживания [4; 6].

Наряду с физико-статистическими моделями все шире используются методы, основанные на данных (data-driven): регрессионные модели, метод опорных векторов, ансамбли деревьев решений, а также рекуррентные и сверточные нейронные сети. Существенный импульс развитию этих методов дал открытый набор данных C-MAPSS, сформированный в исследовательском центре NASA Ames с помощью модели турбовентиляторного двигателя и содержащий многомерные траектории деградации от исправного состояния до отказа [5]. Обзорные исследования показывают, что гибридные модели, сочетающие физические знания о механизмах деградации с методами машинного обучения, обеспечивают наилучшее соотношение точности и интерпретируемости прогноза [4].

4. Мониторинг технического состояния газотурбинных двигателей

Наиболее зрелой областью применения обслуживания по состоянию является контроль авиационных газотурбинных двигателей, на долю которых приходится значительная часть затрат на техническое обслуживание воздушного судна. Тренд-мониторинг основан на регистрации на установившихся режимах полета таких параметров, как температура выходящих газов (EGT), частоты вращения роторов низкого и высокого давления (N1, N2), расход топлива, давление и температура масла, уровни вибрации. Измеренные значения приводятся к стандартным атмосферным условиям и сравниваются с базовой моделью исправного двигателя, а анализу подвергаются отклонения параметров от этой модели.

Одним из ключевых показателей является запас по температуре выходящих газов (EGT margin) — разность между предельно допустимой и фактической температурой газов на взлетном режиме. По мере эрозии лопаток компрессора, увеличения радиальных зазоров и загрязнения проточной части запас монотонно уменьшается, что делает его удобным обобщенным параметром деградации в смысле модели (4). Экстраполяция тренда позволяет заблаговременно спланировать промывку газовоздушного тракта, бороскопический осмотр или съем двигателя для ремонта, совместив эти работы с плановыми формами обслуживания.

Дополнительную диагностическую информацию дают сигнализаторы стружки в масляной системе, спектральный анализ масла на содержание продуктов износа, а также вибродиагностика опор роторов. Комплексирование разнородных признаков с помощью методов слияния данных (data fusion) повышает достоверность диагноза и снижает долю ложных тревог, которые являются одной из главных причин недоверия персонала к автоматизированным системам мониторинга [3; 6].

5. Нормативные, организационные и кадровые условия внедрения

Внедрение обслуживания по состоянию не сводится к установке программного обеспечения — оно затрагивает всю систему поддержания летной годности. В соответствии с Приложением 6 к Конвенции о международной гражданской авиации эксплуатант обязан обеспечивать техническое обслуживание воздушных судов в соответствии с программой, приемлемой для полномочного органа, а изменения интервалов и методов обслуживания должны быть обоснованы и согласованы с ним [12]. В европейской системе регулирования аналогичные требования установлены Регламентом Комиссии (ЕС) № 1321/2014 о поддержании летной годности, который предусматривает программы надежности как инструмент обоснования корректировки программы технического обслуживания [13].

С организационной точки зрения переход целесообразно осуществлять поэтапно: на первом этапе — создание единой базы данных о наработке, отказах и результатах диагностирования; на втором — внедрение тренд-мониторинга

двигателей и наиболее ответственных систем с использованием прогнозов в качестве дополнительной информации; на третьем — обоснованное изменение интервалов и методов обслуживания на основе накопленной статистики и подтвержденной точности прогнозов. Такой порядок позволяет минимизировать риски и последовательно формировать доказательную базу для полномочного органа.

Особое значение имеет кадровая составляющая. Инженер по технической эксплуатации воздушных судов нового поколения должен владеть не только знаниями конструкции авиационной техники и нормативной базы, но и методами теории надежности, математической статистики, анализа данных и основами машинного обучения. В связи с этим в учебные планы вузов транспортного профиля целесообразно включать дисциплины по диагностике и прогнозированию технического состояния, практикумы по обработке открытых наборов полетных данных, а также курсовое и дипломное проектирование, ориентированное на задачи эксплуатирующих организаций. Подготовка таких специалистов в Институте инженерно-технических и транспортных коммуникаций Туркменистана способствует решению задач, стоящих перед транспортно-коммуникационным комплексом страны.

6. Проблемы и перспективы развития

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение прогностического обслуживания сопряжено с рядом проблем. К ним относятся неполнота и неоднородность исторических данных, ограниченное число зарегистрированных отказов для обучения моделей, необходимость количественной оценки неопределенности прогноза, а также вопросы кибербезопасности при передаче данных между бортом, эксплуатантом, изготовителем и ремонтными организациями. Отдельной проблемой является сертификация алгоритмов, основанных на машинном обучении: их поведение сложно верифицировать традиционными методами, что требует разработки новых подходов к обеспечению доверия к результатам.

Перспективным направлением является создание цифровых двойников воздушных судов и их основных систем — постоянно обновляемых виртуальных моделей, объединяющих конструкторскую информацию, историю эксплуатации и данные мониторинга. Цифровой двойник позволяет моделировать накопление повреждений с учетом индивидуальных условий эксплуатации конкретного борта, оценивать последствия различных вариантов планирования технического обслуживания и оптимизировать логистику запасных частей. В сочетании с развитием спутниковых каналов передачи данных это открывает возможность перехода к практически непрерывному контролю технического состояния парка воздушных судов.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, научной основой перехода к обслуживанию по фактическому состоянию является установленный исследованиями надежности факт, что для большинства элементов воздушных судов вероятность отказа слабо зависит от наработки, а значит, плановая замена по ресурсу для них малоэффективна. Во-вторых, эффективная система мониторинга должна строиться по модульной многоуровневой архитектуре, охватывающей все этапы — от сбора данных до формирования рекомендаций. В-третьих, сочетание вероятностных моделей надежности, деградационных моделей и методов машинного обучения позволяет получать прогноз остаточного ресурса с оценкой его неопределенности и использовать его при планировании технического обслуживания. В-четвертых, успешное внедрение требует поэтапного подхода, согласования с полномочным органом и подготовки инженерных кадров нового профиля. Реализация этих положений будет способствовать повышению безопасности полетов, регулярности перевозок и экономической эффективности эксплуатации авиационной техники.

Литература

1. Nowlan F. S., Heap H. F. Reliability-Centered Maintenance. — San Francisco: United Airlines, 1978. — Report AD-A066579.
2. Kinnison H. A., Siddiqui T. Aviation Maintenance Management. — 2nd ed. — New York: McGraw-Hill, 2013.
3. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2006. — Vol. 20, No. 7. — P. 1483–1510.
4. Lei Y., Li N., Guo L., Li N., Yan T., Lin J. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2018. — Vol. 104. — P. 799–834.
5. Saxena A., Goebel K., Simon D., Eklund N. Damage propagation modeling for aircraft engine run-to-failure simulation // Proceedings of the International Conference on Prognostics and Health Management. — Denver, 2008.
6. Vachtsevanos G., Lewis F., Roemer M., Hess A., Wu B. Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
7. ATA MSG-3. Operator/Manufacturer Scheduled Maintenance Development. — Washington: Airlines for America.
8. Смирнов Н. Н., Ицкович А. А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. — 2-е изд. — М.: Транспорт, 1987.
9. Смирнов Н. Н., Чинючин Ю. М. Эксплуатационная технологичность летательных аппаратов. — М.: Транспорт, 1994.
10. SAE JA1011. Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes. — Warrendale: SAE International, 1999.

11. ISO 13374-1:2003. Condition monitoring and diagnostics of machines — Data processing, communication and presentation — Part 1: General guidelines. — Geneva: ISO, 2003.
12. Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. Эксплуатация воздушных судов. Часть I. — Монреаль: ИКАО.
13. Commission Regulation (EU) No 1321/2014 on the continuing airworthiness of aircraft and aeronautical products, parts and appliances // Official Journal of the European Union. — 2014. — L 362.
14. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. — М.: Советское радио, 1969.