

МЕХАНИЗМ ОТКАЗА В АНТИФРИКЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Национальный авиационный университет

Внезапный отказ в антифрикционных системах рассматривается как автокаталитический процесс необратимого разрушения трибологических структур. Это позволяет, используя диагностические признаки, обнаруживать возникновение состояний отказа на ранних этапах и избежать опасных последствий.

Введение. Антифрикционные системы в значительной степени определяют ресурс, надежность и безопасность авиационной техники, они применяются в узлах трения системы управления самолетом: гидравлической, топливной и масляной системах, в двигателях и шасси; отказ даже одного узла может стать причиной аварии или катастрофы. Вследствие экономии размеров и массы узлы трения авиационной техники периодически работают на максимально допустимых нагрузках, когда значимой становится вероятность отказов. Поэтому вопросам предотвращения отказов уделяется особое внимание на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации авиационной техники. Осуществляется тотальный анализ и синтез всей информации об отказах и неисправностях по всем типам воздушных судов за все время существования авиации. На основании этого создана эффективная система предупреждения отказов, относительное количество АП по техническим причинам уменьшилось с 70 % в тридцатые годы прошлого века, до 20 % - в настоящее время. Согласно требованиям «Норм летной годности» интенсивность аварий по техническим причинам для воздушного судна в целом не должна превышать 10^{-6} , а катастроф – 10^{-7} на час налета [1]. Однако, несмотря на то, что расходы на обслуживание, контроль, ремонт и замену отказавших узлов и агрегатов росли и стали сопоставимыми со стоимостью новых изделий, уровень технической безопасности в последние десятилетия менялся незначительно. Основанные на анализе существующего экстенсивные методы в значительной степени исчерпали свои возможности. Для решения проблем безопасности нужны качественно новые трибологические

системы. Необходимость этого связана также с решением одной из основных задач трибологии, достижением ресурса всех типов подвижных соединений уровня, соответствующего ресурсу конструкции. Достижение этих целей в авиации станет возможным, если новые трибологические системы будут иметь интенсивности износа и отказов, на порядок меньшие, чем у существующих. Разработка трибологических систем с такими свойствами невозможна без знания внутреннего механизма трибологических процессов.

Под отказом подразумевается событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, в теории надежности рассматривают постепенные и внезапные отказы. Постепенные отказы узлов трения определяются износом выше допустимого уровня, а внезапные связаны с заклиниванием, временным «зависанием», аномально высоким уровнем трения и износа, а также вызванными ими поломками и пожарами. Статистическими методами установлено, что износые отказы случайны, распределены во времени по нормальному закону и поэтому предсказуемы в вероятностном смысле. Механизм формирования износа представлен в работе [2]. В настоящей работе рассматривается механизм внезапных отказов, ниже термин «отказ» применяется именно к таким состояниям трибосистем.

Результаты. Отказ в реальных узлах трения – достаточно редкое событие, узел может безотказно проработать в продолжение ресурса самолетного парка, а может отказать один раз, привести к катастрофе и больше никогда не повториться. Поэтому исследование отдельных объектов дает недостоверные оценки, при исследовании состояний отказа нужна очень большая статистика, и это сдерживает процесс разработки новых материалов. Теория открытых систем и неравновесных процессов вместо понятий динамики индивидуальных траекторий и состояний предлагает мыслить в терминах ансамблей, функций распределения, флуктуаций, автокатализа, диссипативных структур [3]. При исследовании состояний отказа в авиации множество всех антифрикционных систем рассматривается как ансамбль, однородный относительно небольшого количества признаков отказа. Синтез информации о всех случаях возникновения и развития состояний отказа за все время существования авиации позволил определить диагностические признаки и

оценить связь каждого признака с вероятностью отказа.

В антифрикционных системах внезапный момент возникновения состояния отказа, затем процесс развивается до полной потери работоспособности. Это позволяет, используя систему признаков, обнаруживать состояние отказа на ранних этапах и избегать опасных последствий. С ранних этапов развития авиации в качестве признаков отказа использовали: повышение температуры, нарушение состояния поверхности трения, изменения акустического и вибрационного спектров, а также наличие в продуктах износа металлических частиц видимых размеров (> 100 мкм). Наличие признаков обнаруживали непосредственно органами чувств человека, затем стали использовать и совершенствовать средства и методы технической диагностики. Авиационные газотурбинные двигатели диагностируют по изменению вибрационных характеристик: частоты, амплитуды, виброскорости, ускорения, возникающих вследствие износа элементов ротора и опорных подшипников. По сигналам вибродатчиков оценивают средние значения и дисперсии этих характеристик, для каждого типа двигателей устанавливается критический уровень. Например, двигатель считается неисправным, если перегрузка превышает $1g$, а виброскорость >10 мм/с по сравнению с нормальным значением. В процессе эксплуатации авиационной техники уточнялись критические показатели дисперсности металлических частиц в продуктах износа, динамика изменения размера и количества частиц при развитии отказа. В нормальном состоянии продукты износа состоят из ультрадисперсных частиц окислов, сульфидов, фосфатов, коксов, смол, металлополимеров, металлокерамики и других конечных веществ физико-химических превращений в контакте. Появление металлических частиц размерами до 4 мкм соответствует пренебрежительно малым вероятностям отказа, при частицах размерами от 4 до 15 мкм двигатель ставят на подконтрольную эксплуатацию, если размер частиц становится более 15 мкм, то объект снимают с эксплуатации. Применение спектрального анализа стало следующим этапом развития диагностики, например, двигатель считается исправным, если концентрация металла в масле не превышает: Fe-14, Al-10, Cu-10, Sc-10, Pb-7 г/т. Опыт эксплуатации показывает, что при большом разнообразии используемых материалов, условий эксплуатации, типов воздушных судов и двигателей, антифрикционные системы однородны

относительно небольшого количества признаков отказа. Это можно объяснить одинаковым механизмом процессов отказа в различных системах.

У каждой антифрикционной системы на двухмерном пространстве скоростей и нагрузок существует область, в каждой точке которой определено устойчивое стационарное состояние. Эта область ограничена аномальными состояниями, в которых быстро растет вероятность отказа.

Устойчивые стационарные состояния в антифрикционных системах определяют самообразующиеся в контакте трибологические структуры диссипативного типа. Такие структуры формируются в контакте на этапе приработки, в процессе многоэтапного синтеза молекул, кластеров, мицелл ультрадисперсных частиц конечных продуктов, которые формируют трибологические структуры [4]. Конечные продукты очень устойчивы к внешним воздействиям и это обеспечивает стабильность свойств трибоструктур в широком диапазоне изменения внешних факторов.

В процессе приработки интенсивность отказов уменьшается до стационарного уровня, а также расширяется область допустимых нагрузок. Сформировавшись, трибоструктуры функционируют в стационарном режиме по нелинейным законам синергетики, их чрезмерный рост ограничен энтропией, а минимальный уровень – свободной энергией [5].

При нарушении стационарного баланса между энергией и энтропией увеличивается вероятность отказа. При избытке энтропии, например, перегреве, уменьшается несущая способность трибоструктуры в связи с повышенной подвижностью ее элементов, а при недостатке энтропии несущая способность уменьшается из-за недостаточной подвижности частиц трибоструктуры, вследствие чего происходит ее разрыв. В обоих случаях непосредственно взаимодействуют выступающие участки твердых тел и происходит когезионное отделение металлических частиц. Когда частицы достигают критического размера, они вызывают перенапряжение в контакте и отделение подобных частиц. Процесс, развиваясь по автокаталитическому механизму, приводит к необратимому разрушению трибоструктуры и отказу. Для обеспечения стационарного баланса в узлах трения усиливают теплоотвод от узлов трения, в случае избытка энтропии, при этом используются разнообразные системы

охлаждения. При недостатке энтропии трибосистемы подогревают, а при запуске прогревают на режимах малого газа.

В каждом самолете одновременно функционирует несколько сотен трибосопряжений, отказ которых может привести к авиационному происшествию. Отказ каждого трибосопряжения можно считать независимым событием; для таких событий суммарный поток равен сумме всех потоков. Авиационное происшествие является результатом действия суммарного потока отказов, то есть средняя интенсивность отказов, приходящаяся на один узел трения, приведший к АП, по порядку величины близка к 10^{-9} ч⁻¹. Согласно данным Международной авиационной организации ИКАО, авиационным происшествием заканчивается только 0,01 % от общего количества отказов; 98 % отказов выявляются и устраняются при техническом обслуживании, около 2 % парируются экипажем в полете. Соответственно, фактическая интенсивность отказов, приходящаяся на один узел трения, по порядку величины равна $\lambda \approx 10^{-5}$ ч⁻¹, а средняя наработка на отказ $\tau \approx 10^5$ ч. Это означает, что при оценке характеристики отказов трибосистемы нужна серия опытов продолжительностью порядка τ или очень большая серия опытов меньшей продолжительности. Время от начала наблюдения до момента возникновения состояния отказа является случайной величиной, в теории надежности изучают распределение этого времени. Надежность элемента или системы принято оценивать интенсивностью потока отказов $\lambda(t)$. После приработки поток отказов в трибологических системах является простейшим пуассоновским потоком, который удовлетворяет условиям стационарности, отсутствия последействия и ординарности. Для стационарного потока функция $\lambda(t) = \text{const}$ и, с точностью до величин второго порядка умноженная на dt , дает вероятность отказа элемента в интервале времени (t, dt) , если элемент в момент t работал исправно. Для простейшего пуассоновского потока время от начала наблюдения до первого отказа распределено по показательному закону

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (2)$$

где: $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $Q(t)$ – вероятность отказа.

По закону (1) распределена вероятность того, что расстояние по времени между соседними моментами отказа окажется большим, чем t . Среднее время на отказ в стационарном потоке $T_{\text{cp}} = 1/\lambda$ определяет

ся статистически. Выражение (1) переводит дискретную частоту возникновения отказов в однородном ансамбле большого количества трибосистем в непрерывную во времени вероятность отказа одного узла из ансамбля. Суммарный поток независимых простейших потоков также близок к простейшему; в этом проявляется свойство эргодичности временных вероятностей. В рассматриваемом случае свойство эргодичности состоит в том, что вероятность отказа одной системы или элемента равна отношению наработки отказавших элементов к общему времени наработки большого ансамбля. Вероятность отказа не зависит от предыстории, а только от характеристики трибосистемы λ и продолжительности временного интервала, например: для одного узла трения при $\lambda(t)=10^{-4}$ за любые 10 часов наработки $P(t) = 0,999$, а за 100 часов $P(t) = 0,99$. Соответственно в большом ансамбле за 10 часов признаки отказа будут иметь 0,1 %, а за 100 часов – 1 % от общего количества наблюдаемых систем.

Заключение. Главную роль в формировании потоков вещества и отказов в антифрикционных системах играют самообразующиеся в контакте трибологические структуры диссипативного типа. Трибоструктуры формируются на эволюционном этапе приработки и затем функционируют в стационарном режиме. В неравновесных условиях трибологического контакта устойчивость нормальных стационарных состояний обеспечивает конкуренция энергии и энтропии. Нарушение стационарного баланса может привести к внезапному возникновению состояний отказа, затем процесс развивается по автокаталитическому механизму, приводит к необратимому разрушению трибоструктуры и полной потере работоспособности. Поэтому при разработке новых материалов необходима оценка характеристик отказа, только глубокое изучение механизма формирования и функционирования трибологических структур позволит решить эту задачу. Определить признаки возникновения отказа особенно важно на начальных этапах эксплуатации новых материалов, когда еще нет достаточной статистики.

В антифрикционных системах существуют характерные для неравновесных состояний внутренние временные масштабы. Среднее время возникновения состояния отказа имеет порядок $10^4 - 10^5$ часов, а среднее время развития процесса отказа находится в диапазоне $50 - 200$ часов. Это позволяет обнаруживать состояние от-

каза на ранней стадии и избегать опасных последствий.

Синтез всей информации об отказах, использование методов субъективной логики и байесовского расчета позволили организовать системы контроля, диагностики и достичь средней наработки на авиационное происшествие 106 – 107 часов на воздушное судно в целом.

Список литературы

1. *Соломонов П.А.* Безопасность авиационной техники и безопасность полетов. – М.: Транспорт, 1977. – 272 с.
2. *Кульгавый Э.А.* О механизме износа в антифрикционных системах // Проблемы трения и износа: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2008. – Вып. 49. – Т. 2. С. 230–237.
3. *Пригожин И.* От существующего к возникающему. – М: Наука, Физматгиз. – 1985. – 328 с.
4. *Кульгавый Э.А.* Самоорганизация в трибопроцессах // Проблемы трибологии. – 2002. – Вып. № 3. – С. 63–67.
5. *Кульгавый Э.А.* Триботехнические характеристики и их применение // Проблемы трибологии.– 2003. – Вып. № 3. – С. 51–61.

Стаття надійшла до редакції 17.03.09.