

*М. В. Киндрачук, д-р техн. наук, проф.,
Э. А. Кульгавый, канд. техн. наук, старш. науч. сотруд.,
А. П. Данилов, асп.,
А. Л. Диденко, асп.*

ОТКАЗЫ В ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Национальный авиационный университет, kindrachuk@ukr.net

В работе дан краткий обзор и представлен механизм постепенных и внезапных отказов трибологических систем. Показано, что постепенные отказы определяют частичное и обратимое разрушение трибологических структур, а внезапные отказы полное и необратимое разрушение этих структур.

Отказы узлов в антифрикционных системах трения в значительной степени определяют надежность и безопасность техники, они ограничивают ресурс, являются причиной аварий и катастроф, поэтому, актуальны исследования механизма возникновения и закономерностей развития состояний отказа в трибологических системах, в работе представлены результаты исследований в этом направлении.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта. Работоспособность характеризуется таким состоянием объекта, при котором значения всех его параметров соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

Для определения численных значений большинства показателей надежности требуется по статистическим данным вычислять количество отказов, возникших в разные периоды эксплуатации изделий.

В зависимости от характера изменения основного параметра системы до момента возникновения отказы подразделяются на постепенные и внезапные [1].

Постепенный отказ – это случайное событие, заключающееся в медленном изменении параметра и закономерном выходе его за пределы установленных требований нормативно-технической документации. Причиной постепенного отказа в трибологии является износ деталей узлов трения выше допустимого значения. Износ можно представить как сумму независимых на интервале τ вели-

чин, которая при $t \gg \tau$, согласно центральной предельной теореме, распределена по нормальному закону и представима в виде:

$$I(t) = \langle i \rangle t \pm \tau \sigma \eta (t/\tau)^{1/2}, \quad (1)$$

где $I(t)$ – износ, $\langle i \rangle$ – среднее по времени значение интенсивности износа, σ – среднеквадратичное отклонение интенсивности износа, η – гауссовская величина с нулевой средней и единичной дисперсией, τ – временной интервал, на котором реализуется полный цикл частичного разрушения и возобновления трибологической структуры.

Из формулы (1) средняя величина интенсивности износа $\langle i \rangle$ определяется как:

$$\langle i \rangle = I(t)/t \pm \sigma \eta (t/\tau)^{-1/2} \quad (2)$$

В соответствие с этими формулами среднеквадратичное значение износа увеличивается, а среднее значение интенсивности износа уменьшается во времени как корень квадратный от количества независимых интервалов τ .

Время достижения предельного износа, также как и износ за фиксированное время распределены по нормальному закону, то есть локализованы около среднего значения и поэтому предсказуемы в вероятностном смысле.

При традиционном механистическом подходе основным методом исследования в трибологии является анализ – разделение целого на элементы, при этом износ рассматривается как различные варианты разрушения: микрорезания, когезионного, усталостного или хрупкого разрушения поверхностей твердых тел, или образовавшихся химических пленок. Различают следующие виды механического износа: абразивный, усталостный, коррозионно-механический, фреттинг-коррозию, кавитационный и др.

Внезапный отказ – это случайное событие, заключающееся в скачкообразном изменении параметра, оно с одинаковой вероятностью может произойти в любой момент и поэтому непредсказуемо и опасно. В трибологии состояние внезапного отказа может возникнуть и затем, с разной вероятностью, вернуться в нормальное состояние, либо развивается процесс отказа, который заканчивается аномально высоким значением износа, заклиниванием, поломкой конструкции или пожаром [2].

Внезапный отказ определяет безопасность технических сис-

тем. Он может быть вызван резким изменением внешних воздействующих факторов. Такой отказ может также произойти и за счет постепенного накопления повреждений, которые нельзя заранее обнаружить имеющимися в эксплуатации техническими средствами: например, отслоение покрытия, попадание в контакт твердых частиц из внешней среды смазочное голодание и др.

Анализ опыта многолетней эксплуатации узлов трения в промышленности и на транспорте позволил установить, что антифрикционные системы однородны относительно достаточно небольшого количества признаков возникновения отказа. Эти признаки свидетельствуют о разрушении трибологических структур, которое обратимо в состоянии износа и необратимо в состоянии отказа [3]. В реальных узлах трения состояние внезапного отказа возникает чрезвычайно редко, среднее время безотказной работы узла измеряется десятками тысяч часов. Развитие состояния отказа происходит во временных интервалах от нескольких часов до нескольких десятков часов. Это позволяет обнаруживать процесс отказа на раннем этапе и предотвращать опасные последствия. По данным Международной авиационной организации (ИКАО) только 0,01 процента отказов приводит к авиационным происшествиям, 98 % обнаруживается и устраняется при техническом обслуживании на земле, около 2 % экипажем в воздухе. Тотальный анализ информации об отказах и неисправностях за все время существования авиации позволил создать эффективную систему диагностики и контроля, достичь вероятности катастрофы по техническим причинам для воздушного судна в целом не более 10^{-6} , а аварии – не более 10^{-7} на час налета. На воздушном судне имеется сотни узлов трения, отказ каждого может привести к авиационному происшествию. Вероятность отказа одного узла трения близка к нулю, поэтому для определения этой характеристики нужен синтез информации на базе очень большого массива исследуемых объектов.

Внезапные отказы определяются частотой появления аномальных состояний в трибологическом контакте, то есть, это последовательность дискретных событий. Использование времени нахождения системы в данном состоянии в качестве меры и временной интерпретации вероятности позволяет объединить два потока (постепенных и внезапных отказов) в единое целое: дискретный и непрерывный. При этом случайные величины, такие как интенсивность отказов, время достиже-

ния предельно допустимого значения износа, время до первого отказа и среднее время между отказами используются в качестве меры, а вероятности этих состояний – в качестве характеристики процессов отказа.

При исследовании редких событий используется свойство функции $(1+x)^{1/x}$, которое заключается в том, что при $x \rightarrow 0$ эта величина стремится к пределу $e \approx 2,718$. Если вероятность отказа узла трения за час эксплуатации равна p , то вероятность того, что отказ не появится в течение n часов равна:

$$1 - (1 - p)^n = 1 - (1 - p)^{-1/p(-np)}$$

Если $p \rightarrow 0$ то и $-p \rightarrow 0$, значит $(1 - p)^{-1/p} \rightarrow e$. Потому при достаточно малых p :

$$1 - (1 - p)^n \approx 1 - e^{-np} = 1 - e^{-\alpha}; \quad \alpha = np; \quad (3)$$

Выражение (2) отлично от нуля или единицы в том случае, когда α ограничена, то есть не стремится ни к 0, ни к ∞ . Это означает, что число испытаний должно иметь порядок $1/p$, при этом p имеет порядок $1/n$. В случае использования в качестве меры непрерывного времени t , выраженного в часах, при вероятности отказа $p = 10^{-4}$ на час работы, нужны эксперименты продолжительностью не менее 10^4 часов. Вероятность того, что в серии n испытаний произойдет m редких событий дает формула Пуассона:

$$p_m = \frac{\alpha^m}{m!} e^{-\alpha}.$$

Этой формулой пользуются при больших, но конечных n , подставляя np на место α . После начального этапа приработки стационарный поток отказов является простейшим Пуассоновским потоком, то есть, он удовлетворяет условиям стационарности, отсутствием последействия и ординарности. Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$ распределены по закону:

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \quad (4)$$

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (5)$$

По закону (4) распределена вероятность того, что расстояние по времени между соседними моментами отказа окажется большим чем t , среднее время на отказ в стационарном потоке $T_{cp} = 1/\lambda$ определяется статистически; выражение (4) переводит дискретную частоту возникновения отказов в однородном ансамбле большого ко-

личества узлов трения в непрерывную во времени вероятность отказа любого узла из ансамбля. Здесь появляется свойство эргодичности временных вероятностей, которое, в рассматриваемом случае, состоит в том, что вероятность отказа одной системы равна относительному количеству отказавших систем из 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 ч наработки $P(t) = 0,99$, а за 100 ч – соответственно в большом ансамбле за 10 ч признаки отказа будут иметь 0,1 %, а за 100 ч 1 % от общего количества антифрикционных узлов.

Устойчивость стационарных состояний в открытых системах связывают с образующимися в неравновесных условиях диссипативными структурами. В трибосистемах поверхностные слои после приработки состоят из частиц от атомных до микроскопических размеров, которые обладают высоким уровнем избыточной свободной энергии. Стремление свободной энергии к минимуму приводит к самопроизвольному возникновению коагуляционно-конденсационных связей между частицами, а также между частицами и твердыми поверхностями. Образование связи между поверхностными атомами контактирующих тел при трении сопровождается превращением избыточной поверхностной энергии в тепло и производством энтропии. При последующем разрыве связей атомы становятся поверхностными, при этом затрачивается работа на восстановление поверхностной энергии и формируется сила трения.

Взаимоперенос атомов между поверхностями, взаимодействие их со смазкой сопровождается образованием молекул, кластеров, наноразмерных частиц. Граничные условия, задаваемые скоростью и нагрузкой, препятствуют возникновению равновесных состояний с минимумом свободной энергии или максимумом энтропии. Воздействие на активные частицы потоков энергии и вещества приводит к возникновению в контакте диссипативных структур, в которых консолидирующую роль играет стремление избыточной свободной энергии к минимуму, а подвижность и информационную связь между элементами структуры обеспечивает энтропия. Образовавшиеся на эволюционном этапе трибологические структуры способствуют расширению области допустимых скоростей и нагрузок, они определяют уровень трения и износа.

Под действием энтропии, силовых полей и диффузии происходит выравнивание концентрации частиц по площади контакта, частичное разрушение трибоструктуры, при этом некоторая часть ее вещества выносится из контакта в виде продуктов износа.

При повышенных скоростях и нагрузках преобладающим становится энтропийный фактор, уменьшается несущая способность структуры, происходит когезионное взаимодействие на отдельных участках твердых тел. В контакте отделившиеся частицы вызывают перенапряжение и отделение новых частиц, процесс развивается по автокаталитическому механизму приводит к разрушению трибоструктуры и отказу.

Для обнаружения состояния отказа на ранней стадии в качестве признаков отказа используют: повышение температуры, нарушение состояния поверхности трения, изменения акустического и вибрационного спектров, а также наличие в продуктах износа металлических частиц видимых размеров (> 100 мкм) [4].

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.

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.

Выводы. Вероятность отказа в трибологических системах определяется состоянием самообразующихся в контакте трибологических структур диссипативного типа. Постепенные отказы определяет износ – многократное обратимое разрушение трибоструктур. Износ на временном интервале τ является независимой величиной, поэтому за время $t \gg \tau$, как сумма независимых однородных величин имеет нормальное распределение, то есть предсказуема в вероятностном смысле.

Внезапные отказы распределены во времени с очень малой и постоянной плотностью вероятности, и поэтому непредсказуемы. В трибологических системах внезапный отказ определяет достаточно быстрое необратимое разрушение трибоструктуры, что приводит к аномально высокому износу, заклиниванию или пожару. Момент возникновения состояния отказа внезапен, поэтому для предотвращения отказа необходимо определить это состояние на ранней стадии. Для этого нужно для каждой трибосистемы определить признаки возникновения отказа и технические методы их обнаружения.

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.

От момента возникновения до полной потери работоспособности происходит во времени по этому введено понятие «процесс отказа».

Список литературы

1. Величко Ю. К. Теория надежности / Ю. К. Величко, В. Г. Коронин // МГА КИИГА, Киев. –1971. –120 с.
2. Кульгавый Э. А. Трибосистемы в случайных средах / Э. А. Кульгавый // Проблемы трибологии. Вып. №3. – 2004. – С.8–12.
3. Кульгавый Э. А. Триботехнические характеристики и их применение / Э. А. Кульгавый // Проблемы трибологии. Вып. №3. – 2003. – С. 51–61.
4. Лозицкий Л. П. Практическая диагностика авиационных газотурбинных двигателей/ Л. П. Лозицкий, В. П. Степаненко, В. А. Студеникин //: –М.: Транспорт, 1985. – 102 с.

Кіндрачук М.В., Кульгавий Е.А., Данілов А.П., Діденко О.Л. Відмови в трибологічних системах// Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С.17–24.

В роботі наведено короткий огляд і представлений механізм поступових і раптових відмов трибологічних систем. Показано, що поступові відмови визначає часткове і оборотне руйнування трибологічних структур, а раптові відмови повне і незворотне руйнування цих структур.

Список літ.: 4 найм.

Kindrachuk M.V., Kulgavii E.A., Danilov A.P., Didenko O.L. **Failure of tribological systems**

The paper presents an overview and presented a mechanism of gradual and catastrophic failure of tribological systems. It is shown that the phasing defines a partial and reversible disruption of the tribological structures, but the sudden failures of the complete and irreversible destruction of these structures.

Ключевые слова: трибологическая структура, внезапный отказ, износ, постепенный.

Стаття надійшла до редакції 12.10.2011