

**Кульгавый Э.А.**Национальный авиационный университет,  
г. Киев, Украина**ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА ОТКАЗОВ  
В АНТИФРИКЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Отказы узлов 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, результаты исследований в этом направлении, представлены в настоящей работе. Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности, при этом достаточно, чтобы хотя бы одно значение хотя бы одного параметра не соответствовало требованиям нормативно-технической документации. В теории надежности различают постепенные и внезапные отказы [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 узла трения выше допустимого значения. Внезапный отказ – это случайное событие, которое с одинаковой вероятностью может произойти в любой момент и заключающееся в скачкообразном изменении параметра. В трибологии состояние внезапного отказа может возникнуть в любой момент, и затем, с разной вероятностью, вернуться в нормальное состояние; либозазвивается процесс отказа, который заканчивается аномально высоким значением износа, заклиниванием, поломкой конструкции или пожаром [2].

В антифрикционных системах интенсивность отказов  $\lambda(t)$  представляет собой сумму потоков постепенных и внезапных отказов. Постепенные отказы связаны с участием вещества твердых тел в непрерывном трибологическом процессе, в результате которого происходит износ. 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 в единое целое: дискретный и непрерывный. При этом случайные величины, такие как интенсивность отказов, время достижения 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. Типичная форма изменения интенсивности потока отказов  $\lambda(t)$  во времени представлена на рис. 1

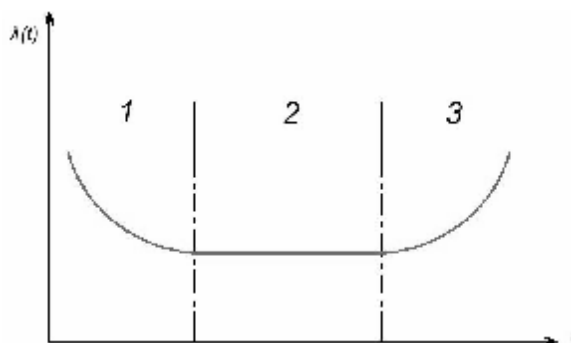


Рис. 1 – Интенсивности потока отказов  $\lambda(t)$  во времени  $t$ :

- 1 – приработка;
- 2 – стационарное состояние;
- 3 – этап износовых отказов

### Постепенные отказы

Главную роль в формировании потоков отказов играют трибологические структуры диссипативного типа, которые образуются в контакте на эволюционном этапе приработки и затем функционируют в стационарном режиме по нелинейным законам синергетики [3]. В зависимости от соотношения энергии и энтропии в трибоструктуре интенсивность потока вещества при прохождении через трибологическую систему может увеличиваться, уменьшаться или оставаться на одном уровне. Источником вещества в трибологической системе могут быть только твердые тела, то есть: если трибологическая структура пополняется веществом твердых тел, то поток вещества увеличивается проходя через контакт, а значит, происходит износ и развивается постепенный отказ. Если в формировании трибоструктур участвует только вещество смазки и в системе отсутствует источник и сток – дивергенция потока вещества равна нулю, при этом, реализуется безыносное и безотказное состояние. Если в системе существует сток, то из динамической диссипативной трибологической

структуры на поверхности трения образуется и растет покрытие, а это может привести к перегреву, заеданию, зависанию подвижных элементов или к другой форме отказа. В настоящей работе рассматриваются износовые отказы. Исследовали механизм возникновения и закономерности развития отказа при постоянных и переменных состояниях среды, действующей на трибосистему.

На эволюционном этапе приработки (рис. 1) трибосистемы переходят из состояния, задаваемого технологией - в состояние, определяемое самим процессом. В формировании потоков вещества основную роль играют процессы переноса и самоорганизации, которые приводят к образованию в контакте трибологических структур диссипативного типа. Механизм образования этих структур определяется организующим действием неравновесных состояний на потоки вещества [4]. Формирование потоков вещества в трибологическом контакте определяется явлениями переноса на атомном уровне. При координационном числе кристаллической решетки равной восьми, поверхностные атомы имеют от семи до одной связи с внутренними атомами твердого тела и от одной до семи свободных связей, энергия которых формирует избыточную поверхностную энергию твердых тел. Межатомная связь рассматривается не в смысле реального физического объекта, а как результат динамического перераспределения плотности вероятности электронных состояний, в следствие которого, возникают электрические силы притяжения, отталкивания или нейтральное состояние. В контакте, между атомом одной поверхности и атомами контртела могут образоваться состояния, которые соответствуют энергии от одной до семи связей. Если энергия связей с атомами контртела превышает энергию внутренних связей, то при относительном движении твердых тел атом переносится на другую поверхность. При трении происходит непрерывный перенос атомов между поверхностями, эти активные атомы вступают в химическую связь с атомами контртела и молекулами смазки.

В минеральных маслах в различных соотношениях содержатся углеводороды парафинового, нафтенового, ароматического рядов, а также их кислородных, сернистых, азотистых производных. В незначительных количествах масла содержат: асфальтены, смолы, органические кислоты и др. Молекулы таких соединений имеют сложную цепную структуру, в процессе трения происходит их деструкция с образованием радикалов, гидроксильных и полярных групп. Молекулы взаимодействуют активными частями с аналогичными молекулами и переносимыми атомами металлов, образуя мицеллы. В процессе трения происходит окисление и образуются: кислоты, альдегиды, нафтеновые окиси, асфальтовые окиси, ангидриды, закиси кислот, ароматические асфальтены, продукты полимеризации [5]. Соединения фосфора серы, хлора образуют конечные вещества чрезвычайно устойчивые к внешним воздействиям, например, хлористое железо устойчиво до 1100 °С, а окислы железа не изменяют физико-механических свойств до 800 °С. В трибологическом контакте происходит многоступенчатый синтез, в результате которого образуются конечные продукты физико-химических превращений: окислы, сульфиды, фосфаты, коксы, хлориды, металлоорганические соли, комплексы и др. в виде молекул, кластеров, мицелл и наноразмерных частиц. На этом синтез не заканчивается, в неравновесных условиях трибологического контакта в потоках вещества возникает самоорганизация. В процессе непрерывного обмена связей происходят флуктуации потенциала, контакт можно считать случайным потенциальным полем. На каждом см<sup>2</sup> поверхности трения одновременно образуются и рвутся  $\sim 10^9 - 10^{12}$  межатомных связей, при образовании связи избыточный поверхностный потенциал атомов превращается в тепло. При разрыве связи атомы становятся поверхностными, потенциал восстанавливается; на это затрачивается работа и возникает сила, суммарная мгновенная сила связей в направлении движения, равная силе трения. В неравновесных условиях трибологического контакта в различных местах случайным образом возникают скопления частиц, которые становятся центрами; к ним присоединяются новые частицы и постепенно формируются структуры в виде отдельных участков, сеток, ячеек, клино- и волнообразных слоев толщиной от нано до микрометров. Уменьшение энтропии, при образовании трибоструктур, многократно компенсируется ее производством в процессе трения и ростом при отводе тепла из системы. В процессе формирования трибоструктур молекулы, кластеры, ультрадисперсные частицы, в стремлении уменьшить свободную энергию, устремляются к образовавшимся центрам, потоки вещества из системы уменьшаются, пока не стабилизируются на стационарном уровне (рис. 1).

На этапе приработки процесс контролирует энергия: в стремлении свободной энергии к минимуму происходит агрегация переносимых частиц. Внутренние потоки вещества направлены на формирование трибоструктуры и увеличение ее объема, одновременно растет экстенсивная величина - энтропия трибоструктуры. Когда влияние энтропии и энергии становятся сопоставимыми, система переходит в стационарное состояние, функционирующее по нелинейным законам синергетики. Устойчивость стационарных состояний определяет конкуренция между свободной энергией  $F$  и энтропией  $S$ . Когда влияние энтропии становится преобладающим, трибоструктура теряет устойчивость. Стремление к равномерному распределению приводит к частичному разрушению трибоструктуры и выносу некоторого количества ее вещества из системы в виде продуктов износа. Объем и энтропия трибоструктуры, при этом, уменьшаются; преобладающим становится стремление свободной энергии к минимуму. Происходит взаимодействие выступающих участков твердых тел, взаимоперенос атомов, синтез молекул, класте-

ров, ультрадисперсных частиц, присоединение их к трибоструктуре, ее объем увеличивается, растет и цикл повторяется. Величина износа, изменения линейных размеров твердых тел, определяется участием их вещества в формировании трибоструктур; поток этого вещества, усредненный по площади контакта, равен скорости износа  $i(t) = dI(t)/dt$ . В стационарном состоянии это процесс с постоянным средним и дисперсией, устойчивость его к флуктуациям обеспечивает конкуренция свободной энергии и энтропии, при этом, вторая производная  $d^2i/dt^2$  противоположна по знаку отклонению  $i(t)$  от среднего значения. Само же среднее значение является точкой перегиба функции  $i(t)$ , в которой свободная энергия и энтропия меняются местами по степени влияния на процесс.

Уровень стационарного состояния определяет не вся производимая энтропия, а только та ее малая часть, которая связана с веществом трибоструктуры; при постоянной температуре она пропорциональна объему и может, как увеличивается, так и уменьшаться, полная же энтропия в процессе трения всегда растет. Конкуренция свободной энергии  $F$  и энтропии  $S$ , которую можно представить уравнением  $F = E - TS$ , порождает, в далеких от равновесия условиях, устойчивые периодические процессы. В координатах  $F - TS$  таким процессам соответствуют модели Лотки-Вольтера, брюсселятор и др. Если трибоструктура возобновляется на временном интервале  $\tau$ , то износ на каждом таком интервале можно рассматривать как независимую, однородную случайную величину. То есть, износ является суммой большого числа величин и, согласно центральной предельной теореме, при  $t \gg \tau$  износ  $I(t)$  имеет нормальное распределение, его можно представить в виде

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

где  $\langle i_t \rangle$  – среднее значение скорости износа;

$\sigma$  – среднее квадратичное отклонение скорости износа

Среднее время  $T_{cp}$  достижения износа  $I(t)$  также распределено по нормальному закону и представимо в виде:

$$T_{cp} = I(t) / \langle i_t \rangle \pm \sigma_{\tau} \eta (t/\tau)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\tau}$  – среднее квадратичное отклонение интервала  $\tau$ ;

$\eta$  – гауссовская величина с единичной дисперсией.

Если для узла трения задать максимально-допустимое значение износа, которое определяет состояние постепенного отказа, а также вероятность этого состояния, то используя формулу (2) и соответствующие квантили нормального распределения можно определить ресурс узла.

Интервал  $\tau$  в различных трибосистемах может достигать нескольких десятков часов. Это означает, что продолжительность испытаний определяется не только разрешающей способностью инструмента, но внутренней структурой самого процесса. Оптимальная продолжительность опыта  $t$  находится в диапазоне от трех до шести интервалов  $\tau$ . При оптимальном соотношении энергии и энтропии в трибологических системах реализуется стационарное состояние. Энтропия определяет подвижность элементов трибоструктуры, а свободная энергия – ее устойчивость. Периодически происходит сброс части вещества трибоструктуры в виде продуктов износа, непосредственное взаимодействие микроскопических участков твердых тел, взаимоперенос атомов металла, синтез конечных продуктов и пополнение трибоструктуры. Таким образом, на временном интервале  $\tau$  реализуется цикл, в течение которого возникает порция износа. При недостатке энтропии элементы трибоструктуры малоподвижны, происходит ее частичное разрушение, усиливается непосредственное взаимодействие твердых тел, увеличивается скорость износа. Недостаток энтропии при запуске автомобильных двигателей приводит к увеличению скорости износа цилиндров и колец до такой степени, что каждый запуск эквивалентен 200 - 300 км пробега, а запуск при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$  увеличивает скорость износа в 2 - 3 раза, по сравнению с запуском  $+20^{\circ}\text{C}$  [6].

При износных отказах скорость износа выполняет функцию интенсивности потока постепенных отказов. Определив, исходя из условий надежности и безопасности, предельно-допустимые значения износа и вероятность достижения этого значения, можно выбрать трибологическую систему, которая обеспечит требуемый ресурс узла трения. Термин «трибологическая система» определяет объект, включающий два контактирующих твердых тела и смазку – твердую, жидкую, газообразную или их смесь.

**Внезапный отказ** – редкое событие, поэтому при исследовании механизма и оценке интенсивности потока отказов важную роль играет всесторонняя информация об отказах, неисправностях и признаках состояния отказа. Синтез всей информации об отказах антифрикционных узлов за все время существования авиации показал, что внезапный момент возникновения состояния отказа, затем с разной вероятностью трибологическая система возвращается в стационарное состояние, либо развивается состояние

отказа, которое в дальнейшем рассматривается как «процесс отказа». Установлено также, что антифрикционные системы однородны относительно достаточно небольшого количества признаков возникновения процесса отказа. Показано, что все эти признаки свидетельствуют о разрушении трибологических структур, которое обратимо в состоянии износа и необратимо в состоянии отказа [7]. В реальных узлах трения развитие 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% компенсируется экипажем в воздухе. Синтез в информационном пространстве позволил создать в авиации эффективную систему диагностики и контроля, достичь вероятности катастрофы по техническим причинам для воздушного судна в целом не более  $10^{-7}$ , а аварии - не более  $10^{-7}$  на час налета. На воздушном судне имеется сотни узлов трения, отказ которого может привести к авиационному происшествию. Вероятность отказа одного узла трения близка к нулю, поэтому для определения этой характеристики нужен очень большой массив исследуемых объектов.

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  $e \approx 2,718$  [8]. Если вероятность отказа узла трения за час эксплуатации равна  $p$ , то вероятность того, что отказ не появится в течение  $n$  часов равна

$$1 - (1-p)^n = 1 - (1-p)^{-1/p(-np)}. \quad (3)$$

Если  $p \rightarrow 0$  то и  $-p \rightarrow 0$ , значит:

$$(1-p)^{-1/p} \rightarrow e. \quad (4)$$

Потому при достаточно малых  $p$ :

$$1 - (1-p)^n \approx 1 - e^{-np} = 1 - e^{-\alpha}; \quad \alpha = np. \quad (5)$$

Выражение (3) отлично от нуля или единицы в том случае, когда  $\alpha$  ограничена, то есть не стремится ни к 0, ни к  $\infty$ . Это означает, что число испытаний должно иметь порядок  $1/p$ , или  $p$  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:

$$P_m = \frac{\alpha^m}{m!} e^{-\alpha}. \quad (6)$$

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

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \quad (7)$$

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t). \quad (8)$$

По закону (7) 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 (7) переводит дискретную частоту возникновения отказов в однородном ансамбле большого количества 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  $\lambda$  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 антифрикционных узлов.

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

Трибологические системы открыты, они обмениваются с окружающим пространством энергией и веществом, в процессе трения механическая работа превращается в тепло. Процессы превращения механической работы в тепло и обратно – превращения тепла в работу, являются основными объектами исследования термодинамики. Поэтому, трибологические системы - это, прежде всего, неравновесные термодинамические системы. Процессы в таких системах необратимы, для них характерно производство энтропии, самоорганизация, стационарные состояния – аттракторы, устойчивость которых, нарушают только автокаталитические реакции. Самоорганизация возникает на эволюционном этапе приработки, когда трибологические системы спонтанно переходят из состояния, задаваемого технологией, в состояние, определяемое самим процессом. При этом, в трибологическом контакте формируется динамическое диссипативное состояние вещества, которое определили как «трибологическая структура». Однородность миллионов узлов трения относительно небольшого количества признаков свидетельствует об общем механизме возникновения внезапного отказа в антифрикционных системах. Моменты возникновения отказов распределены неравномерно, существуют временные интервалы с повышенной вероятностью возникновения отказа, к ним относятся: период приработки, этапы запуска при низких и высоких температурах, взлетные и форсированные режимы работы авиационных двигателей. Неравномерна интенсивность отказа, также, на временном интервале возобновления трибоструктуры  $\tau$ ; она повышена в моменты, когда из-за выброса продуктов износа трибоструктура имеет минимальный объем. При этом, выступающие участки шероховатости твердых тел вступают в непосредственный контакт с такими же участками контртела: происходит микросхватывание, когезионное отделение микрочастиц твердых тел. Появление металлических частиц в продуктах износа относится к основным признакам возникновения состояния отказа, увеличение размеров и количества таких частиц в процессе трения свидетельствует о повышении вероятности отказа. Например, в маслосистемах авиационных двигателей металлическим частицам размерами до 4 мкм. соответствуют пренебрежительно малые вероятности отказа; при увеличении количества и размера частицах от 4 до 15 мкм. двигатель ставят на подконтрольную эксплуатацию; если размер частиц становится более 15 мкм. и их количество растет двигатель снимают с эксплуатации и отправляют на капитальный ремонт, так как значимой становится вероятность отказа. Момент возникновения и развития состояния отказа сопровождается также и другими признаками: изменениями в акустическом и вибрационном спектре, флуктуациями силы трения, ростом температуры, изменением состояния поверхностей трения. Для неравновесных необратимых процессов свойственно существование иерархии внутренних пространственно-временных масштабов. Применительно к внезапным отказам существует два таких масштаба: первый, измеряется в тысячах часов, он связан с моментом возникновения процесса отказа; второй, измеряется в десятках часов, он определяется временем развития состояния процесса отказа: от момента возникновения до полной потери работоспособности. В совокупности два этих, развивающихся во времени, состояния определены как «процесс отказа».

Для каждой антифрикционной системы на двухмерном пространстве скоростей и нагрузок существует область устойчивых стационарных состояний. Основным результатом теории неравновесных процессов заключается в том, что устойчивости стационарных состояний угрожают только автокаталитические реакции, в которых продукт реакции участвует в воспроизводстве самого себя [9]. Устойчивость стационарных состояний в каждой точке области обеспечивает конкуренция свободной энергии  $F$  и энтропийного потенциала  $TS$ . Стремление свободной энергии к минимуму консолидирует частицы в трибологической структуре, а энтропийная составляющая определяет их подвижность. При постоянной температуре экстенсивная величина, энтропия, пропорциональна объему трибоструктуры и вместе с объемом она флуктуирует около среднего значения с периодом, равным  $\tau$  (6). То есть, на фоне общей энтропии, которая возникает при образовании тепла и растет при теплопередаче, существует энтропия, связанная с веществом трибоструктуры, которая может, как расти, так и уменьшаться. Среднее значение является точкой перегиба процесса, в которой вторая производная по времени меняет знак, то есть, выполняется условие устойчивости; знак второй производной всегда противоположен знаку отклонения процесса от среднего значения, что обеспечивает устойчивость стационарных состояний.

Развитие отказа всегда связано с разрушением трибоструктуры, при износе это разрушение частичное и обратимое, а в случае внезапного отказа - полное и необратимое. Повышение вероятности отказа при нагрузках, соответствующих границе области стационарных состояний, связано с нарушением устойчивого динамического равновесия между свободной энергией и энтропией в трибоструктуре. Рост энтропии приводит к увеличению подвижности элементов диссипативной структуры и снижению ее несущей способности. Происходит увеличение размера и количества участков твердых тел, непосредственно контактирующих с контртелом, что активизирует процесс когезионного отделения микроскопических частиц от поверхностей, рост их количества и размера. При достижении критических размеров частицы создают перенапряжение в контакте и вызывают отделение подобных частиц. Процесс развивается по автокаталитическому механизму, приводит к необратимому разрушению диссипативной структуры, аномально высокому уровню трения, износа, заклиниванию или пожару. В реальных узлах трения процессы отказа зарождаются при случайном попадании частиц твердых тел в контакт, что может привести к

возбуждению автокаталитической реакции и, соответственно, процесса отказа. Повышена вероятность отказа на пересечении области эксплуатационных аномальных состояний  $\Delta$ . Для антифрикционных узлов авиационных двигателей участок  $\Delta$  соответствует взлетным и форсированным режимам, когда скорости и нагрузки максимальны. Если для узла трения вероятность состояния  $\Delta$  в эксплуатации равна  $p(\Delta)$ , а вероятность возникновения процесса отказа  $E$  трибосистемы на  $\Delta$  равна  $p(E/\Delta)$ , то средняя плотность отказов  $p(E)$  по всему эксплуатационному пространству равна  $p(E) = p(\Delta)p(E/\Delta)$ . Умножив  $p(E)$  на время эксплуатации  $t$ , можно определить значение вероятности отказа за время от 0 до  $t$ . Плотность  $p(E)$  отображает априорные знания о процессах отказа, она равномерно распределена во времени, то есть, имеет максимальную информационную энтропию. Апостериорная информация позволяет локализовать процесс отказа и улучшить качество прогноза при наличии признаков, а также, уменьшить вероятность отказа при их отсутствии. Уменьшение неопределенностей в результате диагностирования, можно принять за меру количества получаемой информации, то есть, информация обратна неопределенности. Информация относительно отказа  $E$ , содержащаяся в признаке  $F$ , сводится к изменению вероятности  $E$  от ее априорного значения  $p(E)$  к ее апостериорному значению  $p(E/F)$ . Количество информации, содержащееся в событии  $F$  относительно возникновения события  $E$ , определяется в теории информации как:

$$I(E, F) = \log\{p(E/F)/P(E)\}. \quad (9)$$

Основание логарифма в этом выражении определяет единицу измерения информации. При основании 2 единицу информации относительно  $E$  получают, если  $p(E)$  увеличивается в 2 раза; при основании 10 единица информации соответствует увеличению  $p(E)$  в десять раз. В том случае, когда диагностирование производится по двум признакам одновременно, выполняется свойство аддитивности количества информации:

$$I(E; F_1 F_2) = I(E; F_1) + I(E; F_2 / F_1). \quad (10)$$

Однородность относительно признаков отказа позволяет использовать в экспертных целях чрезвычайно широкую информационную базу и получать достоверные оценки вероятностей для очень редких событий. Использование всего предыдущего опыта, методов субъективной логики в сочетании с современными средствами технической диагностики и Байесовским расчетом позволяет на ранней стадии определить возникновение процесса отказа, оценить вероятность отказа и предотвратить его развитие.

Если выход трибосистемы на какой-то режим с вероятностью  $P\{E_1\}$  вызывает процесс отказа  $E_1$ , а с вероятностью  $P\{E_0\}$  - его не вызывает, то диагностический признак  $F$  с вероятностью  $P\{F/E_1\}$  определяет процесс отказа, а с вероятностью  $P\{F/E_0\}$  - дает ошибочный диагноз. Вероятность процесса отказа  $P\{E_1/F\}$ , при возникновении признака  $F$ , определяется формулой Байеса:

$$P\{E_1/F\} = \frac{P\{E_1\}P\{F/E_1\}}{P\{F/E_1\}P\{E_1\} + P\{F/E_0\}P\{E_0\}} \quad (11)$$

Вероятность необнаружения процесса отказа определяется как

$$P\{E_1/0\} = \frac{P\{E_1\}P\{0/E_1\}}{P\{0/E_1\}P\{E_1\} + P\{0/E_0\}P\{E_0\}} \quad (12)$$

Пусть методом экспертных оценок установлено, что признак  $F$  с вероятностью  $P\{F/E_1\} = 0,95$  определяет процесс отказа  $E_1$ , а с вероятностью  $P\{F/E_0\} = 0,05$  - дает ошибочный диагноз. Тогда для различных граничных состояний формула Байеса дает вероятности, представленные в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	$P\{E_1\}$	$P\{E_1/F\}$	$P\{E_1/0\}$
1	0,9	0,994	0,32
2	0,75	0,98	0,136
3	0,5	0,95	0,05
4	0,1	0,68	$5,3 \cdot 10^{-3}$
5	0,01	0,16	$5,3 \cdot 10^{-4}$
6	0,001	0,02	$5,3 \cdot 10^{-5}$

Точность прогноза многократно увеличивается при использовании нескольких диагностических признаков одновременно.

Для большинства антифрикционных систем область однородных стационарных состояний расширяется в процессе приработки; максимально допустимые нагрузки можно существенно увеличить, уменьшая энтропию трибоструктуры путем интенсивного теплоотвода. Недостаток энтропии в трибологических структурах уменьшает подвижность ее элементов, что приводит к разрыву трибоструктур, повышению вероятности развития автокаталитической реакции и отказа. В этом случае, для достижения оптимального соотношения между энергией и энтропией в трибоструктуре, осуществляют подогрев трибосистем от внешних источников или производят прогрев, работая какое-то время на режимах малого газа.

### Заключение

Трибологические системы открыты, они обмениваются с окружающим пространством энергией, веществом и информацией, их состояния неравновесны. Процессы в таких системах необратимы, для них характерны: производство энтропии, самоорганизация, существование устойчивых стационарных состояний, автокаталитических процессов и иерархии внутренних пространственно-временных масштабов. Самоорганизация проявляется в спонтанном формировании в контакте трибологических структур диссипативного типа, благодаря которым формируются устойчивые стационарные состояния.

Интенсивность отказов в таких системах представляет собой сумму потоков постепенных и внезапных отказов. Механизм постепенных отказов связан с частичным и обратимым разрушением трибологических структур и достижением предельно-допустимого уровня износа, такие отказы распределены по нормальному закону, время достижения такого износа с заданной вероятностью определяет ресурс узла трения. Внезапные отказы имеют два внутренних пространственно-временных интервала, их возникновение – это редкое событие, интервал между этими событиями измеряется в тысячах часов. После возникновения процесс отказа развивается по автокаталитическому механизму сравнительно быстро, приводит к необратимому разрушению трибоструктуры и заканчивается полной потерей работоспособности узла трения. Поэтому, обнаружение процесса отказа на ранней стадии и предотвращение опасных последствий следует отнести к основным задачам трибологии.

### Литература

1. Величко Ю. К., Коронин В. Г. Теория надежности // МГА КИИГА, К. – 1971. – 120 с.
2. Кульгавый Э.А. Трибосистемы в случайных средах // Проблемы трибологии. – № 3. – 2004. – С. 8-12.
3. Кульгавый Э. А. Время, пространство и вероятность в трибологии антифрикционных систем // Проблемы трения и износа. Вып. 47. – 2007. – С. 5-23.
4. Пригожин И. От существующего к возникающему // М.: Наука, Физматгиз. – 1985 – 328 с.
5. Кеба И. В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей // М.: Транспорт. – 1968. – 248 с.
6. Кузьменко А. Г, Бабак О. П. Износ узлов трения двигателей при граничной смазке(Обзор) // Проблемы трибологии. – 2007. – № 3. –С. 61-93.
7. Кульгавый Э. А. Триботехнические характеристики и их применение // Проблемы трибологии. – № 3. – 2003. – С. 51-61.
8. Зельдович Я. Б, Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики // М.: Наука, Физматгиз.– 1979. –592 с.

Надійшла 09.12.2010