

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СЛОЖНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР НА ТРАНСПОРТЕ

Е.А. КОПЫТОВ, В.П. ЛАБЕНДИК

*Институт транспорта и связи,
ул. Ломоносова 1, Рига, LV-1019, Латвия, e-mail: kopitov@tsi.lv*

Рассматриваются перспективы развития систем принятия решений (СПР) в автоматизированных системах диагностирования авиационной техники нового поколения. Показывается возможность использования при разработке СПР современных научных теорий, в том числе: термодинамики, теории катастроф, теории информации и систем искусственного интеллекта.

Ключевые слова: диагностирования авиационной техники, теория катастроф, теории информация, системы искусственного интеллекта.

1. Введение

Проблема надежности технических систем, состоящих из малых неравноценных подсистем элементов, не только не теряет свою актуальность, но все более обостряется при увеличении размеров и сложности транспортных средств и интенсивности транспортных потоков. Одной из важнейших задач транспортных предприятий является поддержание надлежащего уровня безопасности на транспорте путем непрерывного и все более глубокого контроля технического состояния сложных объектов и их элементов.

В мировой практике сложились два принципиально разных подхода к решению данной задачи:

- *испытание конструкций* – проведение большого числа интенсивных испытаний потенциально ненадежных элементов вплоть до их разрушения; сложность такого подхода заключается в необходимости обеспечения автономности испытаний опытного образца и продукции серийного производства с некоторым разбросом параметров;
- *диагностирование потенциальных дефектов по поведению рабочего тела* (воздуха и газа в проточной части двигателей, жидкостей в гидросистемах) методами параметрической и функциональной диагностики, осуществляемой способами неразрушающего контроля; такая диагностика должна быть объективной, характеризоваться большой глубиной поиска и носить интегральный характер.

Именно на скрытых дефектах в процессе эксплуатации транспортных средств развиваются деграционные процессы, приводящие к нестабильности параметров и характеристик и отказам техники. **Деграция** – медленный, но всегда неизбежный путь к гибели объекта: необратимому, невозстанавливаемому отказу, сопровождаемому утратой потребительских свойств. И для того, чтобы такой отказ не произошел, например, во время полета летательного аппарата (ЛА), необходимо применение системного анализа выживаемости отдельного объекта путем статистической оценки изменения состояния конкретного элемента по сравнению с работой парка подобных объектов авиатехники.

Системный подход позволяет масштабно увидеть проблему, определяет общность процессов, протекающих в общих условиях эксплуатации, дает их универсальное описание и позволяет строить прогноз на основе внешних и внутренних проявлений поведения объектов.

2. Структура системы принятия решения

Расследования летных происшествий последнего времени на тяжелых самолетах (аэробусах) показывают, что их значительная часть происходит по вине экипажа, который в условиях дефицита времени оказывается не в состоянии адекватно оценить ситуацию и принять

правильное решение даже при наличии достаточной информации. Более того, большой объем поступающей информации может только усугубить ситуацию - человек не успевает ее "переварить". Это и есть так называемый "человеческий фактор", поэтому для помощи экипажу необходимо применять **автоматизированные системы принятия решений (СПР)** нового поколения.

Среди высокоэффективных СПР на транспорте следует выделить системы слежения за единичными космическими объектами, которые включают два непрерывно взаимодействующих уровня (бортовой и наземный), однако такие комплексы достаточно дороги ввиду отсутствия парка однотипных (серийных) аппаратов.

Полет пассажирских ЛА, в отличие от космических объектов, в случае атмосферных аномалий бывает непредсказуем, поэтому для ЛА требуется более высокая степень организации системы обеспечения безопасности полетов в особых условиях. Предлагаемая авторами комплексная наземно-бортовая система принятия решений (СПР) о состоянии авиадвигателей в полете в критических условиях включает 3 уровня. Схема структурного взаимодействия уровней данной СПР показана на Рисунке 1.

1-й уровень – бортовая система контроля состояния двигателя (БСКД) по предельным значениям замеряемых параметров. На современных ЛА БСКД работает в режиме обработки информации в реальном времени (on-line), при этом получаемая информация записывается и хранится в бортовом магнитном накопителе; в предлагаемой СПР она транслируется непосредственно на 2-й уровень – в пункт наземного слежения.

2-й уровень – наземная часть АСД, обрабатывающая в режиме реального времени информацию данного полета и сравнивающая эти величины с данными предыдущих полетов (оценка тренда параметров).

3-й уровень – база данных (БД) системы, содержащая информацию по парку эксплуатируемых двигателей (БДПД), которая используется для оценки связи критических отклонений параметров с опасными неисправностями. Эта оценка производится путем сравнения данных о работе диагностируемого двигателя со статистическими данными, собранными по парку однотипных авиадвигателей. Отметим, что кроме информации о работе двигателей в наземной базе знаний (БЗ) экспертной системы (ЭС) будут накапливаться сведения о ситуациях, при которых произошли отказы, а также о принятых экипажами решениях. Необходимо подчеркнуть, что на борту нет технической возможности хранить подобную информацию, да и потребоваться она может только в особых случаях.

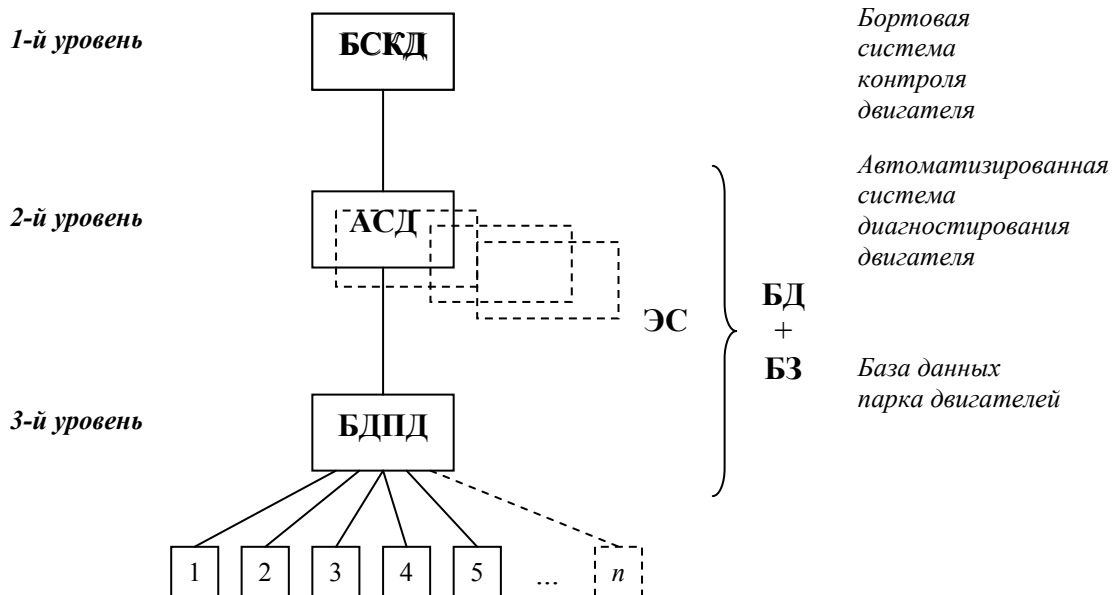


Рисунок 1. Структурная схема СПР

Предложенная трехуровневая СПР позволяет выполнять исследование причин отказа элементов авиатехники во время полета, а не позже (и притом значительно), как это делается в

традиционных наземных АСД – после расшифровки информации из “черных ящиков”. При этом имеют место случаи, когда “черный ящик” найти не удается или часть информации оказывается утерянной из-за его повреждений.

Поскольку система слежения за состоянием авиатехники в течение всего полета является достаточно дорогой, авторами предлагается совместная работа трех уровней СПР в системе on-line только в особых (критических или нештатных) режимах полета ЛА. Остановимся на этом более подробно. Основная цель разработки СПР – выявление (диагноз) проявления опасных (с точки зрения возможности продолжения полета) дефектов и неисправностей, прогноз их развития за время полета и выдача экспертных рекомендаций экипажу по принятию решений. Для этого в бортовой ЭВМ должны быть правильно установлены допуски на изменения измеряемых параметров. Нами предлагается делать эти допуски двойными, и при попадании какого-то из измеряемых параметров в первый поддиапазон объявлять особый режим слежения и ставить систему автоматически на передачу информации непосредственно на землю и на поступление рекомендаций от СПР (должно быть предусмотрено и ручное подключение к нижним уровням СПР).

В целом отличие предлагаемого подхода построения АСД заключается в логической структуре СПР (времени совместного функционирования, объеме и направлениях потоков информации разных уровней). При этом соответственно должны быть более строгие требования к отбору, обработке и передаче информации с уровня на уровень, что является сложной научно-технической проблемой и требует проведения соответствующих исследований. Ниже рассмотрены принципы математической обработки информации (после соответствующей статистической обработки исходной измеряемой информации) и возможности использования перспективных научных теорий при разработке методического обеспечения и алгоритмов функционирования СПР.

3. Реализация принципов современных научных теорий в диагностических системах

Рассмотрим некоторые новые научные направления, которые могут помочь оптимизировать методическое и программное обеспечение перспективных систем диагностирования транспортных средств на примере авиационных двигателей. Диагностика – прикладное направление техники и науки, использующее достижения разных наук с целью обеспечения заданного уровня надежности контролируемого объекта. Азы теории надежности закладывались при развитии наиболее сложной техники, главным образом авиационной и ракетной.

Даже самая богатая статистическая информация, полученная на основе большого числа измерений, может быть недостаточна для качественного исследования объекта, если она не упорядочена, т.е. не установлены явные и неявные зависимости между параметрами с помощью физических математических моделей (ММ), в том числе и статистических групповых, в частности для установления диапазонов разбросов параметров в серии. Таким образом, с позиций теории информации любая измерительная процедура может рассматриваться как сокращение области неопределенности знаний об объекте. При этом оказывается, что одно и то же сообщение, содержащее информацию об объекте, может дать разное количество информации разным потребителям (приемникам) сообщения в зависимости от их степени начального и конечного незнания (или знания) об объекте. Вот потому так важно в бортовой ЭВМ для анализа нестандартных ситуаций при отклонениях параметров подключать наземные БД и БЗ 2-го и 3-го уровней СПР в режиме прямой связи.

В технических объектах, как и в живой природе, существует общая тенденция в поддержании своего состояния путем информационно-энергетического обмена с внешней средой на первой стадии жизненного цикла и преобладание тенденций роста энтропии объекта на второй стадии с включением разнообразных механизмов отказов (постепенных и внезапных). Отличия в параметрическом поведении отдельного объекта (диагностическая информация) от парка (серии) в целом указывает на наличие или появление каких-то серьезных дефектов. Их распознавание можно проводить с использованием рожденной в XX веке **теория катастроф** [1], являющейся синтезом теории особенностей гладких отображений и теории бифуркаций динамических систем. С использованием этой теории могут быть определены границы параметрической области потенциально ненадежных режимов, которые предпочтительно не допускать в эксплуатации. Например, для компрессоров авиадвигателей такими недопустимыми режимами являются области неустойчивой работы (помпаж), как типичные явления бифуркации, приводящие к двум

возможным последствиям: выключению двигателя или возникновению резонансных колебаний лопаток вплоть до их обрыва и разрушения двигателя.

Термодинамический подход возможно использовать для оценки взаимодействий макроскопических свойств веществ с процессами на микроуровне. Результаты наблюдений за процессами старения универсальны и фундаментальны.

Для интересующей нас проблемы одним из главных законов является второе начало термодинамики, объясняющее сущность естественных самопроизвольных процессов в природе и технике. Еще в XIX веке Карно, Клаузиусом и Больцманом была установлена их фундаментальная асимметрия – однонаправленность. Запасенная энергия необратимо диссипирует, упорядоченная структура деградирует в неупорядоченную, изначальный порядок преобразуется в хаос. Этот процесс сопровождается ростом энтропии (меры беспорядка системы).

Предложенное Клаузиусом выражение энтропии для тепловых процессов является размерной величиной (энергия в джоулях, деленная на температуру в градусах Кельвина) [2], что затрудняет ее сравнительное использование в технике и информатике. Брюллоэн предложил информацию также выражать в единицах энтропии [3]. Авторы предлагают дополнительно делить энтропию на изобарную теплоемкость идеального рабочего тела – тогда энтропия становится относительной и безразмерной, а закон возрастания энтропии при теплообмене тел в закрытой системе можно записать в виде:

$$\Delta \bar{S} = (g_1 q_2 / h_2 - g_1 q_1 / h_1) > 0, \quad (1)$$

где $Q = g_1 q_1 = g_2 q_2$ – количество передаваемой теплоты в системе; $g_1 = \frac{M_1}{M_1 + M_2}$ – массовая

доля 1-го тела; $g_2 = \frac{M_2}{M_1 + M_2}$ – массовая доля 2-го тела; h_1 и h_2 – энтальпии “горячего” и

“холодного” тел ($h_1 > h_2$).

Такая запись второго закона термодинамики объясняет сущность необратимых самопроизвольных процессов и связанного с ними увеличения энтропии, как изменение долей располагаемой энергии тел в системе, что отличается от традиционного толкования закона.

Любая система естественно движется к своему наиболее вероятному состоянию. Таким состоянием (аттрактором - точкой притяжения) с вероятностью, равной единице, является полная утрата работоспособности (отказ – смерть объекта) при прекращении энергетических потоков в нем. Но процесс старения начинается с появления скрытых дефектов, изменяющих структуру системы, в первую очередь в “слабых” элементах, и в качестве критерия изменчивости предлагается принимать при энергообмене взаимодействующих элементов увеличение относительной (безразмерной) энтропии:

$$\delta \bar{S} = g_2 \cdot \frac{\Delta E_2}{E_2} + g_1 \cdot \frac{\Delta E_1}{E_1} = g_2 \cdot \delta E_2 + g_1 \cdot \delta E_1 > 0, \quad (2)$$

где E_1 и E_2 - располагаемые (исходные) значения энергии состояния локальных элементов системы ($E_1 > E_2$), а $g_2/g_1 = \frac{\Delta E_1}{\Delta E_2}$, т.е. отношение долевых изменений энергий состояния

элементов системы (по модулю) пропорционально их массовым долям.

Закономерности изменения суммы при изменении числителей и последующем сложении дробей применимы не только к явлениям теплообмена, но и к любым системам с естественным обменом какого-то количества субстанции (энергии, массы, импульса и т.п.). Задача диагностики состоит в том, чтобы из всех закономерностей работы элементов системы выявлять появление новых связей и закономерностей, вызванных деградацией системы. Необратимые изменения можно обнаружить и идентифицировать с помощью современных научных теорий. Например, второй закон термодинамики следует рассматривать как частный случай второго закона энергодинамики:

Энергия самопроизвольно с большей вероятностью переходит в направлении от большего потенциала к меньшему потенциалу (первый закон термодинамики также является частным выражением общего закона сохранения и превращения энергии).

Следствие второго закона – увеличение относительной энтропии – можно рассматривать как обобщенное математическое выражение философского закона перехода количества в качество:

Локальная передача одного и того же количества энергии (субстанции) от высокоэнергетического (с большим потенциалом) объекта к низкоэнергетическому (с меньшим потенциалом) объекту вызывает в последнем более сильные качественные изменения, а, значит, происходят качественные (относительные структурные) изменения и в системе в целом.

Контроль локальных потоков в элементах открытой системы необходим и важен потому, что при некотором нарушении сплошности среды (утечки, трещины) возможны случаи таких перераспределений потоков, что суммарное изменение энтропии системы останется неизменным. Тогда для анализа изменений в структуре системы следует применять аппарат **теории информации** [3].

Рассмотрим появление новых связей на примере работы компрессора авиационного двигателя. При его износе и дефектах выявлено направление сдвига характеристики компрессора (линии рабочих режимов) без ее разворота [4]. Вместо характеристики $(\pi_k^* \text{ и } \eta_k^*) = f_1(\bar{n}_{np}; G_{Bnp})$ при дефектах она изменяется к виду: $(\pi_k^* + \Delta\pi_k^*; \eta_k^* - \Delta\eta_k^*) = f_2(\bar{n}_{np}; G_{Bnp} - \Delta\bar{G}_{Bnp})$.

Такая модель вводит дополнительные степени свободы перемещения режимной точки на характеристике при развитии дефектов, и именно эти параметры сдвига предложено считать критериями появления дефектов.

Приведение к режиму работы в стандартных атмосферных условиях (неизменная приведенная частота вращения ротора $\bar{n}_{np} = \text{const}$) должно установить диагноз дефекта (и степень его развития) в виде связи изменения одного из параметров эффективности (к.п.д.) с изменением второго режимного параметра – производительности компрессора по расходу (удобнее – в относительном виде $\delta A = \Delta A/A$), т.е.

$$\delta\bar{\eta}_k^* = f_3(\delta\bar{G}_B), \quad (3)$$

Но поскольку величины этих критериев непосредственно в двигателе не измеряются, их отклонения можно выявить (вычислить) по сумме отклонений других, замеряемых в двигателе параметров по уравнению регрессии с помощью так называемой диагностической матрицы (ДМ) [4]:

$$\begin{aligned} \delta\bar{G}_B &= a_1\delta\pi_k^* + a_2\delta T_k^* + a_3\delta T_T^* + \dots, \\ \delta\bar{\eta}_k^* &= b_1\pi_k^* + b_2\delta T_k^* + b_3\delta T_T^* + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь a_i и b_i - коэффициенты влияния (весовые коэффициенты) отклонений замеряемых параметров на отклонения определяемых параметров.

При изменении режима работы без дефектов (обратимый процесс – $\Delta S = 0$) наблюдаются отклонения измеряемых параметров ($\delta G_B > 0; \delta n > 0$), но нет отклонений правильно выбранных

локальных критериев, т.е. $\delta\bar{G}_B = \delta\bar{\eta}_k^* = 0$.

Деградационный процесс сложного изделия, имеющего потенциальные дефекты, может быть представлен векторным полем (см. Рисунок 2) в пространстве диагностических параметров, соответственно, каждая точка пространства определяет состояние изделия, а вектор в этой точке – направление и скорость деградационного процесса.

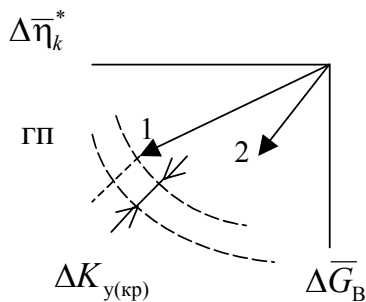


Рисунок 2. Векторы сдвига характеристики компрессора при износе и дефектах

На границе помпажа поведение компрессора становится непредсказуемым. С позиции теории катастроф, его называется скачкообразное изменение выходного параметра при плавном изменении управляющего параметра. В сущности, это понятие тождественно понятию внезапного отказа в теории надежности.

Подобным образом можно проанализировать работу и характеристики других узлов и систем авиационных двигателей. Естественно, разные элементы двигателя имеют свои критерии дефектов, что затрудняет выбор наиболее "слабого звена". Единый подход к оценке деградации двигателя как системы может быть осуществлен при вычислении изменений относительной энтропии в каждом узле (в том числе и сравнении их трендов) и их суммировании (энтропия является аддитивной величиной). Задавая одинаковое допустимое изменение энтропии для всех элементов системы (по результатам наблюдения за самой ее "слабой" частью), возможно иметь в эксплуатации сложную конструкцию с равной надежностью ее элементов, установив при этом научно обоснованные сроки замены отдельных модулей (с одновременным выбором оптимального числа заменяемых в эксплуатации модулей).

При рассмотрении взаимосвязей элементов в системе просматривается подобие уравнений (4) с выражением изменения относительной энтропии (1) и общим математическим выражением закона перехода количества в качество (2), как функциональным описанием и оценкой относительных величин накоплений необратимых изменений в структуре системы. В работе [5] показана аналогия этих выражений с описанием работы искусственного нейрона, однослойной сети нейронов (персептрона) и в целом нейронной сети – перспективной системы программирования с элементами **искусственного интеллекта** [6]. Это, с одной стороны, говорит о том, что поиск новых связей и закономерной в разных отраслях науки интуитивно организуется по единой логике, схожей с логикой мышления головного мозга; с другой стороны, это позволит успешно внедрять в диагностику авиадвигателей без существенной переделки методического обеспечения СПР аппарат искусственных нейронных сетей. В частности, в работе [5] предложен способ обучения нейронных сетей, входящих в состав программного обеспечения бортовой ЭВМ, с использованием диагностических матриц.

Таковы видимые взаимосвязи, которые позволяют осмыслить и решать проблемы деградационных процессов вообще и в авиационных двигателях в частности. При этом использование идей теории информации и систем искусственного интеллекта позволит минимизировать диагностическую параметрическую модель, базируясь на концепции единства поведения в диагностируемой совокупности, чувствительной к отклонениям от этого единства; термодинамика и теория авиадвигателей диктуют выбор параметров, характеризующих диссипацию энергии на дефектах структуры; теория катастроф предполагает знание пределов изменения диагностических и управляющих параметров, объединенных выявляемыми экспериментально зависимостями.

Как отмечено в работе [7], “знание немногих общих принципов освобождает от необходимости знания многих частных фактов”. Единство развития многих явлений в мире и логики их познания делает целесообразным рассматривать вышеупомянутые теории не как междисциплинарные, а в рамках единой науки – **инфо-энергодинамики**. Область ее применения – *от хаоса до явлений синергетики в диссипативных структурах* (как известно, в хаосе может возникнуть и самоорганизация).

О подобии энергетических и информационных потоков Клод Шеннон писал: “основная идея теории информации состоит в том, что с информацией можно обращаться почти так же, как с такими физическими величинами, как масса и энергия” [8]. Но энергия является характеристикой движения (мерой подвижности системы, способности к изменениям и превращениям), а информация характеризует структуру (в том числе и энергетическую) и связи в системе. Мерой количества информации об объекте является разность значений априорной и апостериорной энтропии – разность начальной и конечной (оставшейся) неопределенности знаний об объекте. В то же время изменение энтропии характеризует уровень энергетических затрат при работе системы, т.е. степень ее совершенства.

4. Выводы и рекомендации

Для повышения надежности эксплуатации ЛА авторами предложен усовершенствованный принцип обработки получаемой в АСД полетной информации путем выделения в работе системы особых режимов обработки этой информации. В случае нахождения отклонений измеряемых параметров в “опасном” диапазоне автоматически включается в действие комплексная наземно-

бортовая СПР о состоянии двигателя в полете в “нештатных” (критических) ситуациях полета ЛА. Данная СПР позволяет выполнять исследование причин отказа элементов авиатехники во время полета и обеспечивает с помощью бортовой ЭВМ объективность и оперативность принятия решений экипажем в “нештатных” ситуациях. Ввиду ограниченности возможностей бортовой ЭВМ она должна иметь доступ к информации, хранящейся в базе данных и базе знаний наземных уровней СПР, при этом информационный обмен между уровнями СПР в “нештатных” ситуациях должен обеспечиваться непрерывно в режиме реального времени.

При разработке перспективных систем диагностирования транспортных средств предлагается использовать современные научные достижения термодинамики, теории катастроф, теории информации и систем искусственного интеллекта.

Литература

- [1] Арнольд В. (1990) *Теория катастроф*. Наука, Москва.
- [2] Трайбус М. (1970) *Термостатика и термодинамика*. Энергия, Москва.
- [3] Бриллюэн Л. (1960) *Наука и теория информации*. Физматгиз, Москва
- [4] Кузнецов Н.С., Лабендик В.П. (1993) Особенности формирования диагностических матриц для контроля состояния проточной части авиационных ГТД. *Изв. ВУЗов “Авиационная техника”*, № 3, КАИ, Казань, 89 – 93.
- [5] Копытов Е., Лабендик В. Кабелев Н. (2001) Особенности диагностических систем с элементами искусственного интеллекта. *Computer Modelling & New Technologies* **5**, No.1, 119-123.
- [6] Zurada J.M. (1992) *Introduction to Artificial Neural Systems*. West Publishing C, St.Paul.
- [7] Малков Я.В. (1996) Диагностика деградационных процессов в полупроводниковых структурах с позиции междисциплинарных теорий. *Зарубежная радиоэлектроника*, № 5, Москва
- [8] Шеннон К. (1963) Работы по теории информации и кибернетике. ИЛ, Москва

Received on the 21st of December 2002