

УДК 629.7.08

РАЗРАБОТКА ФОРМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАСЛЯНОЙ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ЦЕЛЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ

© 2013 А.Н.Коптев, А.А.Гульбис

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

В данной статье рассмотрена формальная математическая модель масляной системы летательных аппаратов с учетом изменения состояния рабочей жидкости.

Ключевые слова: математическая модель, масляная система, рабочая жидкость, загрязнение.

Важная роль в проблеме повышения надежности газотурбинных двигателей (ГТД) принадлежит методам контроля технического состояния, позволяющим обнаруживать неисправности элементов на ранних стадиях их развития. Применение этих методов позволяет своевременно выполнять работы по предотвращению опасных отказов двигателей и обеспечивает возможность наиболее полного использования заложенных в их конструкции ресурсных возможностей.

Одним из подобных методов, используемых в рамках технологий упреждающего обслуживания, может являться анализ масла, как рабочего тела масляной системы для оценки технического состояния двигателя летательного аппарата. Под масляной системой летательного аппарата с общих позиций будем понимать ансамбль взаимодействующих частей сложных технических устройств, узлов опор, подвески и т.д., состоящих из набора компонентов этих частей и среды, для которых при этом взаимодействии характерны процессы изнашивания, определяя.

Ансамбль состоит из последовательности вложенных одна в другую взаимодействующих субъединиц (узлов) или может быть разложен или разделен на такие субъединицы.

Каждое множество взаимодействующих компонент (образующих отдельный иерархический уровень) допускает свое характерное описание на языке пространства состояний с переменными и параметрами, принадлежащими данному конкретному уровню. Взаимодействующие переменные (и/или параметры) на более высоком иерархическом уровне являются «коллективными свойствами» (статистическими моментами или свертками) динамики, происходящей на нижнем уровне. Следовательно,

Коптев Анатолий Никитович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники. E-mail: eat@ssau.ru

Гульбис Антон Алексеевич, ассистент кафедры эксплуатации авиационной техники. E-mail: gulbis.anton@mail.ru

переход на более высокий уровень обычно сопровождается значительным уменьшением числа степеней свободы. Более высокий уровень получает «снизу» селективную информацию и в свою очередь управляет динамикой, на более низком уровне с помощью упреждающей связи. Сложность любой системы обусловлена числом ее компонент и способом их взаимосвязи. Такая сложность относится к аппаратурной реализации системы. С другой стороны, богатство функционального репертуара системы определяет сложность ее состояний [1].

Рассмотрим постановку задачи в обобщенном виде. Предположим, что дана система X , включающая множество узлов трения, находящаяся в масляной системе Y . Система X определена как ансамбль взаимодействующих единиц, которые создают очень сложное поведение исследуемой системы Y . Среда флуктуирует в следующем смысле: один или несколько ее параметров, позволяющих взаимодействовать на энергетическое взаимодействие узлов системы, изменяются во времени. (Например, если каждый из узлов трения изменяет структуру поверхностного слоя и, как следствие, появление микрочастиц материала узлов, принимаемые масляной средой Y , то соответствующим параметром служит показатель загрязненности масла.)

Необходимо на основе известных динамических законов объяснить коммуникативную связь, происходящую между системой X и средой Y , то есть не только энергетический, но и информационный обмен между ними.

Прежде всего, необходимо пояснить, что имеется в виду, когда говорим об установлении коммуникативной связи между системами X и Y . То есть решение проблемы загрязнения из X в Y из момента τ в момент времени $\tau + \Delta\tau$ сводится к вариационному принципу, представляющему собой не что иное, как попытку установить компромисс между двумя противоречащими требованиями: скоростью загрязнения и надежностью

или степенью безошибочного воспроизведения абстрактных последовательности частиц загрязнения, поступающих от X к Y . В такой формулировке отсутствует динамика протекающих процессов, то есть, если бы «точное» воспроизведение загрязнения было единственной целью разрабатываемой теории загрязнений, то система очистки загрязнения масляной системы была бы идеальным воплощением такого процесса, то есть система очистки масла улучшает систему Y , что в свою очередь упрощает распознавание образа состояния масляной системы Y .

Но наиболее важное предназначение процесса связи состояний не только в копировании процесса загрязнения, а в моделировании: по существу речь идет о моделировании одной физической системы другой с очевидной целью предсказания и управления первой системой. Допустим, что физическая система Y моделирует физическую систему X , если система Y в рамках системы технического обслуживания способна построить из принятого ей временного ряда, связанного с частицами загрязнения конечной длины алгоритм минимальной длины сжатых описаний систем X . Эти алгоритмы, если ввести их в качестве входных данных (программ) в некоторую ЭВМ, должны позволить ей выделить на выходе поведение системы X во времени. Таким образом, моделированием является построение сценариев «если-то», которые должны показывать состояние системы X .

Для того чтобы система Y могла воспроизводить, или моделировать, систему X (или наоборот), требуется ряд существенных условий.

Прежде всего система должна быть иерархической, то есть обладать по крайней мере, уровнем (H) аппаратной реализации (энергетически структурным) и уровнем (S) программного обеспечения — символьным (наделенным способностью опознанию, т. е. когнитивным), функциональным. Информация в форме дискретного временного ряда поступает с S -уровня системы Y (S_2) на H -уровень системы Y (H_1), где между принятым временным рядом и внутренней динамикой системы Y на уровне H происходит ряд кросс-корреляций. В результате таких сверток возникает некоторое коллективное свойство, обладающее гораздо меньшим числом степеней свободы, чем S_2 или H_1 . Это коллективное свойство передается на уровень S_1 и образует там одно (сложное) состояние.

Таким образом, связь между двумя системами Y и X осуществляется как эволюция во времени системы двух связанных нелинейных интегральных уравнений

$$\begin{aligned} S_1 &= H_1 \otimes S_2, \\ S_2 &= H_2 \otimes S_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где каждая пара соответствует одному статистическому моменту. Процесс для каждой пары уравнений (рис. 1) сводится к непрерывной итерации S_1 и S_2 .

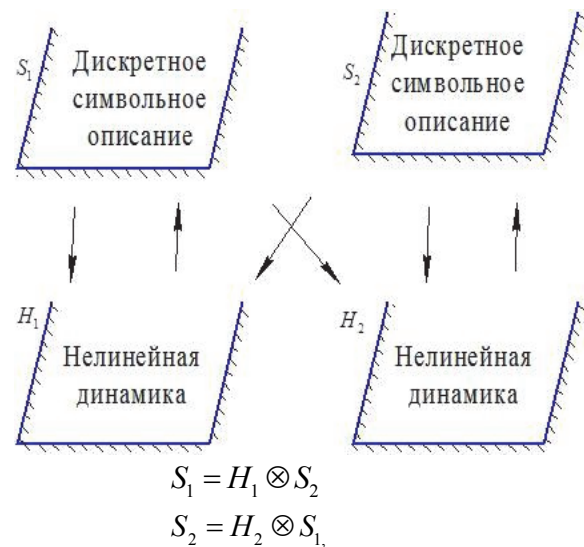


Рис. 1. Схема двух иерархических систем со связями

Рассмотрим систему, как ансамбль взаимодействующих единиц (например, источников загрязнения), число которых не обязательно велико (трех взаимодействующих компонентов может оказаться достаточно для создания очень сложного поведения исследуемой системы, представленной на рис. 2.

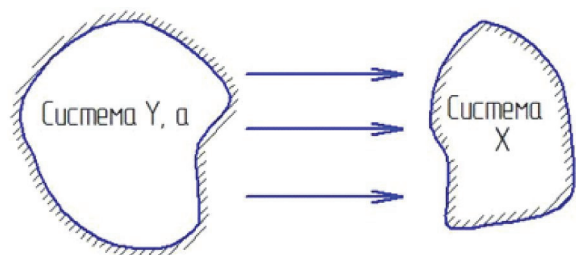


Рис. 2. Система «объект смазки – система смазки»

Известно, что системы со многими степенями свободы с необходимостью стохастические. В свою очередь, стохастические системы (макроскопические системы, динамика которых определяется взаимодействием большого числа микроскопических частей) де-факто иерархические в том смысле, что допускают дополнительное описание (по крайней мере) на двух различных уровнях: (1) на микроскопическом уровне, на котором очень большое число (порядка числа Авогадро) частиц вступают во взаимодействие друг с другом на основе гамильтоновой (обратимой) динамики, и (2) на макроскопическом, феноменоло-

гическом уровне, на котором для многих (но не для всех) практических целей система может быть описана-небольшим числом макропеременных (таких, как объем, давление, температура); эти макропеременные возникают как коллективные свойства динамики, происходящей на микроскопическом уровне, или как моменты функции плотности вероятности, – заменяющей микроскопическую динамику.

Здесь, согласно [1] уместно рассмотреть в более или менее явном виде, как происходят процессы усреднения, посредством которых происходит подъем с более низкого (микроскопического) уровня на более высокий (макроскопический) уровень. Рассматриваемую систему в пространстве состояний представим в виде N -мерного вектора x , конец которого описывает непрерывную кривую – траекторию – и в заданный момент времени t находится в заданной точке, или в заданном состоянии. Пусть $P(x,t)$ – вероятность найти систему в точке x в момент времени t . Требуется найти, как эта функция плотности вероятности эволюционирует со временем. Вероятность $P(x,t)$ возрастает из-за переходов из других точек x' и убывает из-за переходов, исходящих из точки (состояния) x , т.е. $dP(x;t)/dt = \text{«скорость прихода»} - \text{«скорость ухода»} = I - I'$ [2].

Так как член I учитывает все переходы из начальных точек $x' \rightarrow x$ он представляет собой сумму по всем начальным точкам x' , умноженную на вероятность совершить за единичное время переход $x' \rightarrow x$. Таким образом,

$$I = \sum_{x'} W(x, x') P(x'; t), \quad (2)$$

где $W(x, x')$ – вероятность совершить переход $x' \rightarrow x$ за единичное время.

Для «входящих» переходов (I') справедливо соотношение

$$I' = P(x; t) \sum_{x' \neq x} W(x, x'), \quad (3)$$

где $W(x, x')$ – вероятность совершить переход $x' \rightarrow x$ за единичное время.

Таким образом, уравнение, описывающее эволюцию вероятности $P(x;t)$, имеет вид

$$\frac{dP(x;t)}{dt} I = \sum_{x'} W(x, x') P(x'; t) - P(x; t) \sum_{x' \neq x} W(x', x), \quad (4)$$

Рассмотрим уравнение (4) с точки зрения того, как с помощью этого уравнения перейти от микроскопического описания к макроскопическому. Умножая обе части уравнения (4) на x и интегрируя или суммируя по соответствующему интервалу x , получаем динамическое уравнение, левая часть которого описывает скорость изменения значения медианы $\langle x \rangle$ во времени, а именно:

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle = f_1 \{ \langle x \rangle, \langle x^2 \rangle, \dots \}, \quad (5)$$

где f_1 , вообще говоря, нелинейный полином.

Описанный выше процесс усреднения приводит к появлению в правой части уравнения не только медианы $\langle x \rangle$, но и старших моментов вероятности $P(x, t)$. Если бы функция f_1 была линейна, то уравнение (5) имело бы вид $d \langle x \rangle / dt = f_1(\langle x \rangle)$.

Предложенный выше подход характерен для химических реакций, протекающих, как правило в среде Y под действием факторов, сформированных системой X (например, под действием температуры).

Однако, для решения задача загрязнения, которая в большей части используется для оценки годности среды Y к эксплуатации, рассматриваются гипотезы, как комбинации определенных непродизванных элементов для построений конфигураций и изображений, и которые являются образующими. Множество образующих являются основой построения образов процессов, представляющих в рамках точного формализма объекты исследований. Образующие, с общих позиций, представляют собой элементы образов, и являются носителями информации о нем [2].

Множество всех образующих A состоит из непересекающихся классов образующих A^α , $A^\alpha \subset A$, где α – общий индекс, индекс класса образующих,

$$A = \bigcup_{\alpha} A^\alpha, \quad (6)$$

Интерпретация этого разбиения состоит в том, что образующие, сходные качественно, будут относиться к одному классу.

Задав образующие, для построения конкретного образа необходимо введение определенных правил, ограничивающих способы их соединения между собой. Эти правила приводят к типичным регулярностям образов и представляют их комбинаторную структуру.

Получаемые в результате регулярные конфигурации являются абстрактными конструкциями, не обязательно наблюдаемыми во всех деталях. В какой степени регулярные конфигурации могут быть идентифицированы наблюдателем – зависит от системы наблюдения. Результаты наблюдения, соответствующие некоторому множеству регулярных конфигураций, называются изображением.

Изображение соответствует результатам наблюдения при идеальных условиях, если на наблюдения не оказывают влияния ограничения, свойственные используемой аппаратуре, и несовершенство модели. Теория образов, не учитывающая поведение образов в реальных условиях,

будет иметь очень ограниченные приложения. Необходимо, следовательно, обеспечить реалистичность теории с тем, чтобы она могла оперировать реальными образами. Другими словами, интерес для рассмотрения в рамках изучаемых процессов представляет собой процесс преобразования «чистых» образов в реальные с помощью некоторого механизма деформации.

Каждому подобному (потенциально возможному) соединению соответствует показатель связи, обозначаемый обычно символом β с соответствующим нижним индексом.

Множество связей всякой образующей a , соответствующим образом перенумерованное, образует структуру связей образующей. Структура связей не определяет значения показателей, поставленных в соответствие отдельным связям.

В дополнение к свойствам образующих необходимо также идентификатор или имя для того, чтобы иметь возможность различать используемые образующие.

В некоторых случаях может потребоваться, чтобы некоторая образующая входила в одну и ту же конфигурацию более одного раза. В таком случае берутся идентичные копии этой образующей, которые различаются при помощи идентифицирующих меток, вводимых в признак в качестве составляющих. Из контекста будет ясно, когда это делается.

Образующие принимаются за атомы, неделимые объекты, однако, подобно тому, как атомы обладают внутренней структурой и могут расщепляться на элементарные частицы, образующие в свою очередь иногда допускают разбиение на более мелкие единицы. Однако, согласно [2] иногда будет вполне естественно объекты, являющиеся на некотором уровне формального описания изображениями, считать образующими в формализме более высокого уровня.

В качестве более общего многомерного аналога вводятся в рассмотрение универсальные операторы. Всякая образующая есть оператор. Всякая образующая есть оператор с ν (переменными) входами x_1, x_2, \dots, x_ν и μ (переменными) выходами y_1, y_2, \dots, y_μ . Область значений всякого x_i есть некоторое пространство X_i , область значений всякого y_i — некоторое пространство Y_i .

В случае операторов со случайными переменными введем предположение, что в качестве источников образующих будем использовать Марковский вероятностный источник для представления изменения состояния рабочей жидкости (РЖ), в частности масла.

Для научного обоснования состояния РЖ синтезируем статическую гипотезу, описывающую процессы в среде «источник - образующих - масло - смесь» в терминах теории образов. Для

этого необходимо выбрать множество образующих A , определяющих процессы в этой среде.

В рамках принятого графического формализма зададимся соединениями типа дерева, случаем, когда арность конфигурации не ограничена. Выходная арность любой образующей равна единице, но входная арность может быть равна произвольному неотрицательному целому числу. На множестве образующих может быть введена древовидная топология, при которой выходная связь некоторой образующей (возможно) соединена нереверсивной стрелкой с одной из входных связей другой образующей. Это означает, что $\omega_{out}(c)$ всегда равна единице, в то время как $\omega_{in}(c)$ может быть произвольной и неограниченной [2].

Для графического отображения процесса изменения состояния масляной системы по параметру загрязненности РЖ, оперируя теорией образов, построим изображение изменения состояния РЖ. Для этого необходимо задаться неделимыми элементами изображения — образующими. За образующие примем:

- изменение физико-химических свойств;
- фильтрация примесей в системе;
- суммарное количества загрязнения;
- показатель фильтрации фильтра 1;
- показатель фильтрации фильтра n ;
- загрязнение, вносимое опорами двигателя;
- загрязнение, смолы;
- прочее загрязнение.

Так образующая $g1$ представляет собой состояние масла, изменяющееся в процессе эксплуатации по параметрам загрязненности и физико-химическим свойства. Для данной образующей входными связями будут являться области значений вышеупомянутых параметров. Изменение параметра загрязненности масла представим в виде двух образующих: $g4$ — внесение загрязнения в систему, $g3$ — фильтрация загрязнения в системе. Область определения $g3$ в свою очередь будет определяться областями значений трех образующих, представляющих источники загрязнения в отдельности, как то: $g7$ — опоры двигателя, $g8$ — процесс смолообразования, $g9$ — прочее загрязнение.

Область значений образующей $g3$ отражает процесс фильтрации загрязнения фильтрами, установленными в системе. Область определения данной образующей будет зависеть от параметров фильтрации и степени загрязнения фильтров системы. Для рассматриваемого изображения допустим, что в системе присутствует два фильтра: тонкой и грубой очистки, которые и будут являться образующими $g5$ и $g6$.

Образующая $g10$ — изменение физико-химических свойств РЖ, декомпозируемое на измене-

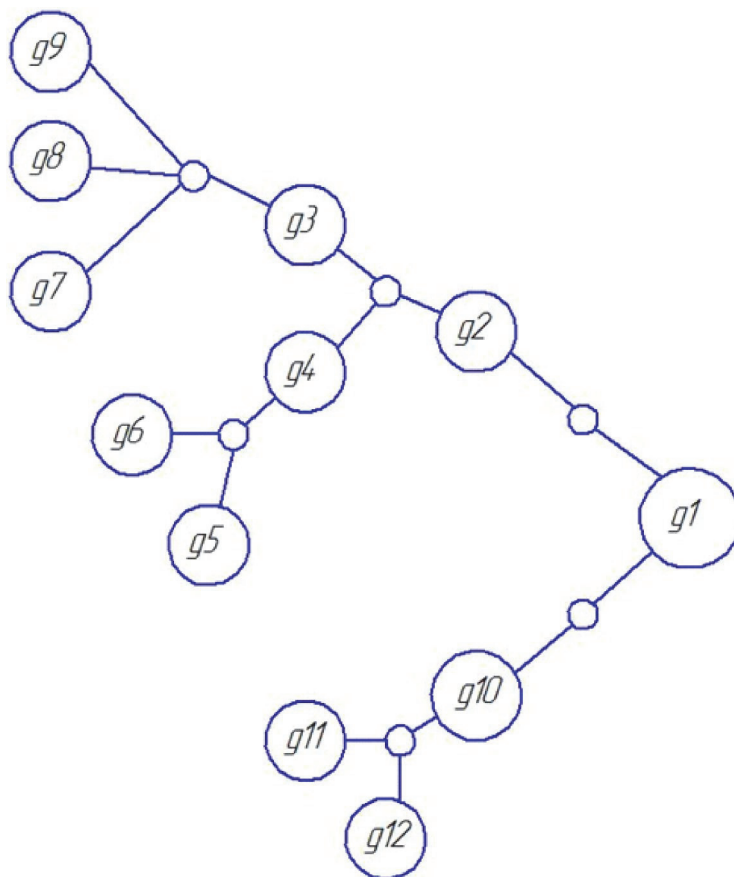


Рис. 3. Формальная конфигурация изменения состояния масляной системы

ние вязкости g_{11} и кислотности g_{12} .

Таким образом, предложенный аппарат позволяет представить динамику состояния масляной системы летательного аппарата в виде изображения, опираясь на теорию образов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Венцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Радио и связь 1983. 416 с.
2. Гренандер У. Лекции по теории образов. Т.1. М.: Мир, 1979. 382 с.

FORMAL MATHEMATIC MODEL OF OIL SYSTEM CONDITION FOR FUNCTIONAL DIAGNOSTICS

© 2013 A.N. Koptev, A.A. Gulbis

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

This article describes formal mathematic model of the aircraft oil system according to change of oil properties.
Key words: mathematic model, oil supply system, oil, contamination.