УДК 629.7.08

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ЭТАПЕ ПРИЁМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

© 2014 А. М. Гареев, Ю.П. Злобина, И.А. Попельнюк

Самарский государственный аэрокосмический университет
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 04.09.2014

В статье рассмотрена математическая модель изменения состояния сложной технической системы с учетом изменения параметров рабочей среды.

Ключевые слова: *математическая модель, гидравлическая система, рабочая жидкость, загрязнение*

Одним из перспективных направлений по совершенствованию системы послепродажного обслуживания сложных технических систем (СТС) является внедрение технологий автоматизированного контроля и оценки состояния диагностируемого объекта на этапе приемо-сдаточных испытаний, основанных на сборе и обработке информации о текущем техническом состоянии в реальном масштабе времени и позволяющих оценить динамику приработки контактирующих механизмов и своевременно предупредить их деградацию. Для эффективного внедрения этой технологии необходимо иметь соответствующие методы, средства диагностирования и контроля состояния СТС и технологии их реализации, позволяющие получать необходимую информацию в реальном масштабе времени. Одним из подобных методов может являться анализ рабочей жидкости (РЖ) как рабочего тела СТС.

Любую СТС можно описать как комплекс взаимодействующих узлов. Каждое множество взаимодействующих узлов, образующих отдельный иерархический уровень, допускает свое характерное описание на языке пространства состояний с переменными параметрами, принадлежащими данному конкретному уровню. Взаимодействующие параметры на более высоком иерархическом уровне представляют собой результирующие моменты динамики процессов, происходящих на нижнем уровне. Более высокий уровень получает от нижнего уровня селективную информацию и в свою очередь управляет динамикой, на более низком уровне с помощью упреждающей связи [1].

Предположим, что дана система *X*, включающая множество узлов трения, находящаяся в СТС *Y*. Система *X* определена как комплекс взаимодействующих единиц, которые придают сложное поведение исследуемой системе *Y* в результате изменения во времени одного или нескольких параметров. Например, изменение концентрации механических примесей в РЖ. Допустим, что физическая система *Y* моделирует физическую систему *X*, если система *Y* в рамках системы технического обслуживания (СТО) способна построить из принятого ей временного ряда, связанного с частицами загрязнения конечной длины, алгоритм минимальной длины сжатых описаний систем *X*. Эти алгоритмы описывают 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* аппаратурной 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 II (S_2) на *H*-уровень системы Y (H_1), где между принятым временным рядом и внутренней

Гареев Альберт Минеасхатович, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела сопровождения научных исследований. E-mail: gareyev@ssau.ru
Злобина Юлия Петровна, студентка
Попельнюк Илья Александрович, студент

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

$$S_1 = H_1 \otimes S_{2,}, \; S_2 = H_2 \otimes S_{1,} \qquad (1)$$

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

Рассмотрим систему как комплекс взаимодействующих единиц (например, источников внесения частиц загрязнения), число которых не обязательно велико (трех взаимодействующих компонентов может оказаться достаточно для создания очень сложного поведения исследуемой системы). Известно, что системы со многими степенями свободы 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 частиц вступают во взаимодействие друг с другом на основе гамильтоновой динамики, и 2) на макроскопическом, феноменологическом уровне, на котором для многих практических целей система может быть описана небольшим числом макропеременных, таких, как объем, давление, температура, вязкость. 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. $dP(x;t)\ /dt$ = «скорость прихода» — «скорость ухода»$=I-I'$ [2]. Так как член I учитывает все переходы из начальных точек $x' \to x$, он представляет собой сумму по всем начальным точкам x', умноженную на вероятность совершить за единичное время переход $x' \to x$. Таким образом,

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

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

Для «входящих» переходов (I') справедливо соотношение

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

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

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

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

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:

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

где f_1 - 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 $\frac{d\langle x \rangle}{d} = f_1(\langle x \rangle)$.

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 задачи изучения изменения концентрации механических примесей, которая в большей части используется для оценки годности среды *Y* к эксплуатации, рассматриваются гипотезы, как комбинации определенных непроизводных 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

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

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. Следовательно необходимо обеспечить реалистичность теории с тем, чтобы она могла оперировать реальными образами. Другими словами, интерес для рассмотрения в рамках изучаемых процессов представляет собой процесс преобразования «идеальных» образов в реальные с помощью некоторого механизма деформации. Каждому подобному 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 необходим 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 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. 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 $x_1, x_2, ..., x_{\nu}$ и μ (переменными) выходами $y_1, y_2, ..., x_{\mu}$. 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 РЖ.

Для научного обоснования состояния РЖ сформулируем гипотезу, описывающую процессы в среде «источник образующих – РЖ» 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 ω_{out} (с) всегда равна единице, в то время как ω_{in} (с) может быть произвольной и неограниченной [3].

Для графического отображения процесса изменения состояния РЖ по параметру изменения концентрации механических примесей, 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 плунжерными парами;
- загрязнение, смолы;
- прочее загрязнение.

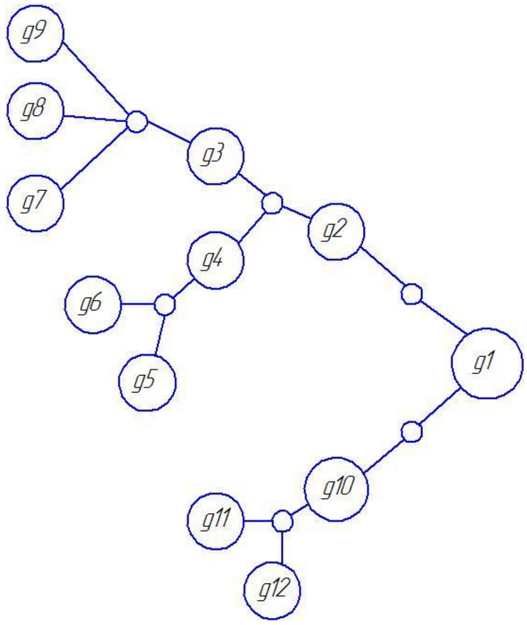

Рис. 1. Формальная конфигурация изменения состояния ЖС

Так, образующая g_1 представляет собой состояние РЖ, изменяющееся в процессе эксплуатации по параметрам загрязненности и физико-химическим свойствам. Для данной образующей входными связями будут являться области значений вышеупомянутых параметров. Изменение параметра загрязненности масла представим в виде двух образующих: g_4 – внесение загрязнения в систему, g_3 – фильтрация загрязнения в системе. Область определения g_3 в свою очередь будет определяться областями значений трех образующих, представляющих источники загрязнения в отдельности, как то: g_7 – плунжерные пары, g_8 – процесс смолообразования, g_9 – прочее загрязнение.

Область значений образующей g_3 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 буду являться образующими g_5 и g_6. Образующая g_{10} – изменение физико-химических свойств РЖ, декомпозируемое на изменение вязкости g_{11} и кислотности g_{12}.

Диагностируемый при обслуживании объект может быть представлен как некоторая среда признаков, характеризующих этот объект и представляющий собой прямое произведение пространств признаков A^{ν} (где ν - суммарная интенсивность генерации частиц загрязнений элементами ЖС λ_{Nc}). Для признака типа *ν* на каждого признак A^{ν} задана алгебра множеств a^{ν}, которая показывает полноту информации, содержащуюся в сенсором входном сигнале *Y*, при этом каждый полученный вектор о состоянии конфигурации уплотняется для специалиста *P* на основе a^{ν} - измеримого множества и полученных подвекторов для каждой образующей $u=u(g_j)$ в течение времени $t=\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i$. $a^{\nu}(g)$, поступают в аналогово-цифровой преобразователь от датчиков встроенного контроля, расположенных в расходных баках ЖС. Далее сигнал попадает в объединение признаков φ_j^{ν}, принадлежащих алгебре множеств a^{ν}, затем передается в виде сенсорных подвекторов $u^{\lambda_{Nc}}$, которые уплотняются кратностью 2 и поступают в сеть (основной процессор) N [2].

Контролируемые параметры (концентрация загрязнения) диагностируемого объекта (РЖ) преобразуются с помощью первичных преобразователей (датчиков встроенного контроля (ДВК)) в электрический сигнал, который после усиления и формирования поступает в электронный блок на обработку и затем выдается на регистратор или используется в качестве управляющего в замкнутой автоматической системе регулирования и управления. Было установлено, что самым чувствительным при диагностировании концентрации загрязнения РЖ в СТС в реальном масштабе времени является фотоэлектрический метод с применением фотоэлектрического датчика встроенного контроля механических примесей в жидкости.

Информация о счетной концентрации механических примесей по размерным группам и дисперсном составе частиц механических примесей формируется в ДВК и поступает в устройство ввода-вывода в виде случайной последовательности колоколообразных импульсов, амплитуда Ω которых связана квадратичной зависимостью с размером (диаметром) частиц d:

$$\Omega = k \cdot d^2, \qquad (7)$$

где k – коэффициент градуировки датчика.

Устройство ввода-вывода осуществляет анализ сформированной последовательности импульсов и выдачу результатов в цифровом или аналоговом виде на жидкокристаллическом дисплее и результаты измерения параметров частиц предъявляются наблюдателю-специалисту p. Кроме того, осуществляется запись результатов в файл.

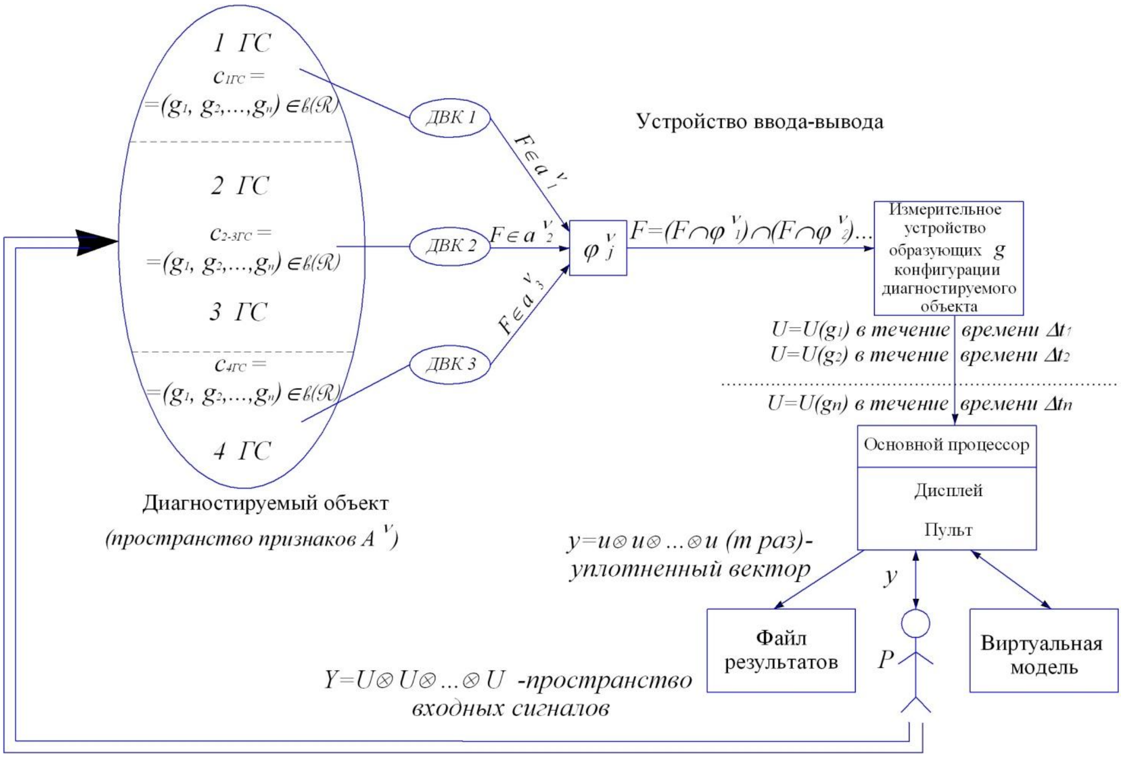

Рис. 2. Архитектурная схема диагностирования РЖ СТС

Для признака каждого типа v на A^v будет задана некоторая алгебра множеств a^v, индуцирующая на A алгебру-произведение:

$$a = a^1 \times a^2 \times a^3 \ldots. \qquad (8)$$

Алгебра множеств имеет следующую интерпретацию: она показывает, насколько подробна информация, содержащаяся в сенсорном входном сигнале. Если он очень информативен, т. е. p располагает мощной аппаратурой, то алгебра множеств является точной в техническом смысле слова, и наоборот.

Среди множеств, принадлежащих алгебре a^v, выделим непустые множества, не содержащие собственных подмножеств; естественно, число подобных множеств конечно. Обозначим их через φ_1^v, $\varphi_2^v, \varphi_3^v \ldots$ Причем, согласно [3], множества φ_j^v не пересекаются и перекрывают алгебру a^v в том смысле, что всякое множество F ∈ a^v можно представить как объединение множеств φ_j^ν. В [2] доказано, что эти множества φ_j^ν стягивают a^ν. Действительно, множество A^ν в целом представляет собой объединение всех множеств φ_j^ν, поскольку в противном случае

$$k = A^\nu \cap \left(\varphi_1^\nu \cup \varphi_2^\nu \cup \varphi_3^\nu \ldots\right)^c \neq \varnothing; \qquad (9)$$

a^ν-измеримое множество k не может, однако, не допускать разбиения на меньшие a^ν-измеримые множества, так как в этом случае оно оказалось бы равным некоторому множеству φ_j^ν. С другой стороны, его нельзя представить в виде объединения $\varphi_1^\nu \cup \varphi_2^\nu \cup \varphi_3^\nu \ldots$, поскольку в этом случае

$$k = \varphi_1^\nu \cup \varphi_2^\nu \cup \ldots \left(\cap \left(\varphi_1^\nu\right)^c \cap \left(\varphi_2^\nu\right)^c \ldots\right) = \varnothing. \qquad (10)$$

Следовательно, $k = \varphi$, и поэтому

$$A^\nu = \varphi_1^\nu \cup \varphi_2^\nu \cup \ldots \qquad (11)$$

Тогда для любого a^ν-измеримого множества F, принадлежащего A^ν, получаем

$$F = \left(A^\nu \cap F\right) = \left(F \cap \varphi_1^\nu\right) \cap \left(F \cap \varphi_2^\nu\right) \cap \ldots \qquad (12)$$

Кроме того, имеет место либо $\varphi_j^\nu \subseteq F$, либо $\varphi_j^\nu \cap F = \varphi$, поскольку множества φ_j^ν не поддаются разбиению. Это означает, что члены, входящие в объединение, либо равны некоторому множеству φ_j^ν, либо представляют собой пустые множества.

Сенсорный вектор для конкретной образующей $u = u(g)$, описанный выше, воздействует на сеть N системы диагностического управления состоянием ЖС в течение определенного периода времени. Сначала g_1 представляется в виде $u(g_1)$ и подается в течение некоторого времени на сеть N, затем g_2 представляется в виде $u(g_2)$ и подается на N, и т. д. В дополнение к данному алгоритму будем допускать некоторое сканирование конфигурации, когда p пытается оценить состояние конфигурации как единое целое. Точнее, это означает, что конфигурация, у которой n > 1, предстает перед лицом, принимающем решение p, как нечто наподобие набора интенсивности генерации частиц загрязнения. Вектор u как функция времени будет в таком случае некоторой периодической функцией, например, с периодом Δt ,так что

$u = u(g_1)$ в течение времени Δt_1,

$u = u(g_2)$ в течение времени Δt_2,

……………………………………………

$u = u(g_n)$ в течение времени Δt_n,

$t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \ldots + \Delta t_n$,

а затем следуют периодические повторения. Скорость сканирования по конфигурации C ограничена лишь заданным промежутком времени, которое определяется стратегией получения информации о состоянии ЖС. Когда p оценивает состояние образующих g_ν, входящих в конфигурацию, каждая из них обрабатывается независимо от остальных. Во всех представлениях $u(g_1)$, $u(g_2)$, ... будет использоваться одно значение u_0, т. е. для конфигурации в целом кодирование когерентно. Другими словами, это означает, что, хотя для образующих, входящих в одну и ту же конфигурацию, кодирование когерентно, оно становится некогерентным для конфигураций, сменяющих друг друга по мере течения времени. Но, согласно теории, изложенной в [3], период измерений не обладает мощностью, достаточной для передачи всей информации, необходимой p для изучения ξ. Поскольку линейность предполагает наложение входных сигналов и исключает результаты взаимного влияния различных сенсорных координат, откажемся на время от u_0, положив u_0=1.

Таким образом, решим данную проблему при помощи уплотнения (мультиплексирования) сенсорного вектора и введения входного поля у сети. Для заданного сенсорного вектора $u = u(g)$ сформируем уплотненный вариант (порядок уплотнения, или кратность т)

$$y = u \otimes u \otimes \ldots \otimes u \ (m \text{ раз}), \qquad (13)$$

где y принимает значения в пространстве входных сигналов

$$Y = U \otimes U \otimes \ldots \otimes U. \qquad (14)$$

Оператор уплотнения $\otimes$ имеет следующий смысл. Если задан некоторый вектор $\upsilon=(\upsilon_i)$, то его уплотненным с кратностью m вариантом является m-мерный массив с элементами $\upsilon_{i_1}\upsilon_{i_2}\ldots\upsilon_{i_m}$ - результат перемножения компонент. Кратность m отнюдь не столь велика, как исходные размерности U и U^ν. В качестве обобщения этого случая можно рассмотреть ситуацию, когда кратность изменяется в системе от 1 до некоторого максимума. Если, в частности, информационный носитель системы обладает высокой избыточностью, то целесообразно уплотнять лишь некоторую часть каждого сенсорного подпространства.

Выводы: полученная модель положена в основу разработки методологии анализа и управления состоянием РЖ в рамках реализации упреждающего обслуживания авиационной техники [4].

Данная статья написана по результатам выполнения научно-исследовательской работы по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-5999.2014.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Гареев, А.М.* Моделирование процесса контроля чистоты рабочей жидкости // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. 2010. №4. С. 117-124.
2. *Гренандер, У.* Лекции по теории образов, том 1 – М.: Изд-во «Мир»,1979. 382 с.
3. *Гареев, А.М.* Упреждающее обслуживание гидравлических систем летательных аппаратов / А.М. Гареев, С.Н. Тиц. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2010. 112 с.
4. *Gareev, A.* Modeling of fluid condition of aircraft hydraulic system / 28-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. – Australia, Brisbane, 2012. Pp. 121-126.

IMPROVING THE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF ASSESSMENT THE TECHNICAL STATE OF AIRCRAFT LIQUID SYSTEMS DURING THE ACCEPTANCE TESTS

© 2014 A.M. Gareyev, Y.P. Zlobina, I.A. Popelnyuk

Samara State Aerospace University

The mathematical model of changes in complex technical systems deflated by the parameters of the working medium is reviewed in article.

Key words: *mathematical model, hydraulic system, working fluid, pollution*

Albert Gareev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Research Management Department. E-mail: gareyev@ssau.ru
Yuliya Zlobina, Student
Iliya Popelnyuk, Student