

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ ЧИСТОТЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

© 2010 А. М. Гареев

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

Рассмотрены принципы реализации упреждающих технологий технического обслуживания воздушных судов. Сформулированы основные аксиомы задачи контроля состояния гидравлической системы по параметрам рабочей жидкости. Описана модель контроля загрязнения рабочей жидкости.

*Гидравлическая система, рабочая жидкость, контроль технического состояния, упреждающее обслуживание, чистота рабочей жидкости, автоматизированный измерительный комплекс.*

Всё возрастающие требования к безопасности и регулярности полётов воздушных судов (ВС) приводят к усложнению бортовых комплексов оборудования (БКО), в частности, одной из жизненно важных его частей – гидравлических систем (ГС). В результате этого растёт и трудоёмкость технического обслуживания ГС. Решение данной проблемы возможно с помощью совершенствования системы технического обслуживания (СТО).

Одним из перспективных направлений по совершенствованию СТО ВС является внедрение технологий упреждающего обслуживания, основанных на сборе и обработке информации о текущем техническом состоянии и позволяющих предупредить опасную деградацию системы.

Упреждающее обслуживание — это деятельность по своевременному выявлению и устранению первоначальных симптомов отказа. Оно основано на отслеживании тенденции деградации работы БКО с целью получения функциональных симптомов, возникающих на ранних стадиях предотказного состояния.

Для того чтобы упреждающее обслуживание было эффективным, необходимо иметь соответствующие методы, средства диагностирования и контроля состояния бортовых систем и технологии их реализации, позволяющие получать нужную информацию в «реальном» мас-

штабе времени. В частности, это касается ГС, которая питает энергией и в значительной степени определяет надёжность функционирования всех жизненно важных функциональных систем и подсистем управления, механизации и изменения геометрии крыла, уборки и выпуска шасси, торможения колёс, поворота передней опоры ВС, а также блоков питания ГС.

В рамках решения поставленной проблемы представлена модель системы диагностического контроля БКО ВС, которая характеризует состояние ГС в процессе эксплуатации по параметрам рабочей жидкости (РЖ). Предложенный подход основан на наблюдениях за уровнем загрязнённости РЖ посредством датчиков встроенного контроля (ДВК).

СТО является динамической структурой  $P$ , включающей в себя персонал инженерно-авиационной службы, БКО ВС, аппаратные и программно-аппаратные измерительные системы и взаимодействия между ними. В течение периода эксплуатации ВС в результате реализации измерительных функций СТО получает из реальной среды  $\xi$  (среда ГС) сенсорные сигналы в виде измеренных параметров ГС, обработка которых позволяет построить некоторый вектор, определяющий состояние РЖ в виде образа. Предполагается, что идеальная структура образа состояния РЖ, с которой имеет де-

ло специалист  $p$  ( $p \in P$ ), входящий в состав СТО и принимающий решение, известна. По мере течения времени в процессе эксплуатации специалист  $p$ , используя аппаратные и программно-аппаратные средства и сложные взаимодействия, входящие в сеть СТО, выявляет образ реального состояния РЖ.

Введём ряд начальных допущений в аксиоматической постановке. Наиболее важными аксиомами будут те, которые характеризуют среду, порождающую сенсорные входные сигналы, существенно структурированные, в рамках теории образцов [2]. Основное внимание сосредоточим на общих принципах вывода модели состояния РЖ в некоторой структурированной среде  $\zeta$  [4].

Допущение о высокой степени структурированности среды  $\zeta$  относится к числу основополагающих. Данную среду  $\zeta$  условно можно представить в виде «микро- и макромира», с которыми контактирует специалист  $p$ . Регулярность «макромира» заключается в том, что современная ГС является регулярной структурой физических объектов (насосов, фильтров, гидравлических аккумуляторов, баков, обратных клапанов, теплообменников, подпорных клапанов), в совокупности представляющих собой «мёртвую» сеть, расположение и назначение которых однозначно определяется структурно-функциональной схемой. «Микромир» среды будет состоять из «параметрических единиц» РЖ, принадлежащих «живому» пространству ГС и представляющих собой образующие  $g$ . Таким образом, все элементы среды  $\zeta$  имеют постоянные связи и подчиняются определённым законам функционирования. Согласно [2], образующей  $g$  соответствует вектор признаков  $a(g)$ , принимающий значения в некотором пространстве признаков. Параметры РЖ (образующие  $g$  «микромира»  $G$ ) можно классифицировать по ряду признаков [3]:

- загрязнённость жидкости механическими частицами;

- внутренние и внешние утечки жидкости;
- кислотность жидкости;
- температура жидкости;
- вязкость жидкости и др.

Наиболее информативным из перечисленных типов образующих является образующая загрязнённости рабочей жидкости [4]. Функция признаков  $a(g)$  называется полной, если она разделяет образующие. Другими словами, если для двух образующих  $g$  и  $g'$  выполняется равенство  $a(g) = a(g')$ , то выполняется равенство  $g = g'$ . В нашем случае функция признаков будет полной, и поэтому можно идентифицировать образующие с помощью их векторов признаков. Это означает, что арность  $\omega(g)$  так же, как показатели связи и индексы класса образующих, можно рассматривать как функции от вектора признаков.

Тип признака может иметь различные физические интерпретации [5]. В нашем случае будет объёмный тип, указывающий множество, покрываемое  $g$  со стандартным расположением и ориентацией.

Введём ряд аксиом для оценки состояния рассматриваемой среды.

**Аксиома 1.** Полное пространство признаков среды  $\zeta$  с БКО ГС, в которой действует  $p$ , представляет собой прямое произведение

$$A = A^1 \times A^2 \times A^3 \dots$$

пространств признаков  $A$ , каждое из которых состоит из конечномерных подвекторов  $(a_i, i = 1, 2, \dots)$ , где  $a_i$  - измеримое множество состояний РЖ.

Для представления инвариантностей и постоянных взаимосвязей, существующих в БКО ГС, в которой действует  $p$ , введём отображения «микромира»  $G$  — преобразования подобия  $S$ . Они отражают то обстоятельство, что и системы БКО, и комбинации их состояний существуют независимо от систем координат, используемых в пространстве признаков. В данном случае координаты представляют собой не просто некоторые координаты в

опорном физическом трёхмерном пространстве, но также и системы отсчета, используемые для представления.

Чтобы придать рассуждениям конкретный характер, будем считать преобразования подобия  $S$  группой или соответствующей подгруппой переносов в физическое пространство. Следует заметить, что можно вводить преобразования и других видов, например, перемещения (или некоторую их подгруппу) или равномерные изменения масштаба (или некоторую их подгруппу). Если в структуре образа в явном виде присутствует время, то преобразования подобия  $S$  могут также включать время, что позволит организовать процесс измерения состояний РЖ.

Для преобразования подобия  $S$  введём следующую аксиому.

**Аксиома 2.** *Группа преобразований подобия  $S$  является конечной, сохраняет инвариантность индекса класса образующих  $a(g)$ :*

$$a(sg) = a(g), \forall s \text{ и } g.$$

Третья аксиома характеризует среду  $\xi$  ГС и её составляющие.

**Аксиома 3.** *Рассмотрим все регулярные конфигурации  $c_i = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ . Под потенциальной средой  $\xi$  будем понимать среду, состоящую исключительно из этих конфигураций, построенных на основании множества регулярных правил  $b(R)$ .*

Эти правила лишь ограничивают возможные конфигурации множеством  $b(R)$ , но не говорят о том, какова вероятность появления в процессе эксплуатации той или иной конфигурации. Для уточнения этой ситуации требуется некоторая мера  $Q$  в пространстве конфигураций, позволяющая судить об их регулярности. Введём меру  $Q$  следующей аксиомой.

**Аксиома 4.** *Статистическая среда задаётся как*

$$\xi = (b(R), Q),$$

где  $Q$  — некоторая вероятностная мера, заданная на множестве  $b(R)$  допустимых конфигураций.

Вид распределения вероятностной меры  $Q$  на множестве  $b(R)$  определяет то, как  $p$  будет изучать свою среду  $\xi$ . Так,  $p$

будет встречать только те конфигурации, которые принадлежат носителю  $Q$ .

Естественно, будем считать, что с течением времени регулярность  $R$  не изменяется. Это означает, что потенциальная среда  $\xi = b(R)$  не обнаруживает никаких тенденций, свойственных длительным периодам у временных рядов.

Если  $p$  встречается с различными конфигурациями, то  $Q$  определяет частоту появления возможных конфигураций. Последовательные конфигурации можно рассматривать как некоторый случайный процесс  $c(t)$ , принимающий значения из  $b(R)$  и характеризующийся кусочно-постоянными реализациями. Значения  $c(t)$  тождественно независимо распределены в соответствии с  $Q$  при фиксированных значениях  $t$ , принадлежащих различным интервалам, на каждом из которых  $c(t)$  постоянен.  $Q$  является их безусловным (одномерным) распределением. Вес, присвоенный некоторому определенному  $c \in b(R)$ , будет тогда зависеть от того, как долго он может оставаться постоянным в процессе изучения.

Если некоторая конфигурация  $c = (g_1, g_2, \dots, g_n)$  остаётся фиксированной в течение некоторого промежутка времени  $(t, t+\Delta t)$ , то она представляет статическую среду, причём, если отрезок  $\Delta t$  мал, краткосрочную. Подобные конфигурации будут следовать одна за другой.

**Аксиома 5.** *Функция конфигурации  $c(t)$  является кусочно-постоянной на временных интервалах переменной длины  $\Delta t$ .*

Наблюдательные возможности  $p$  будут выражены через отношение идентификации  $R$ .

**Аксиома 6.** *Две регулярные конфигурации  $c$  и  $c'$ , принадлежащие  $b(R)$ , идентифицируются по модулю  $R$ , если  $\#(c) = \#(c')$ , когда существует нумерация их соответствующих образующих такая, что  $g_i = g'_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, \#(c)$ , и когда их внешние связи одинаковы при использовании одинаковой нумерации.*

Тогда  $b(R)/R$  образует алгебру изображений [2], и можно сформировать об-

разы, которые  $p$  наблюдает в идеальных условиях.

Далее, согласно разработанной модели [4] оценки состояния РЖ, введём ряд *высказываний* относительно  $\xi$ , которые будут строиться на основе последовательного использования комбинаций признаков. *Высказываниями*  $C$ , определяемыми с помощью измеримого множества  $a^v$ , будем называть всякую *дизъюнкцию* ( $\forall$ ) признаков

$$C = C(g) = \bigvee_{(v,i) \in F} a_i(g),$$

где  $F$  – некоторое множество пар  $(v,i)$ .

Таким образом, дизъюнкцию высказываний о состоянии РЖ ГС можно выразить следующим образом: исходя из модели изменения состояний РЖ, определяемых измерительными множествами  $a^v$ , жидкость может находиться или в «первоначальном» (2 – 4 класс чистоты РЖ)  $x_0$ , или в «нормальном» (5 – 8 класс чистоты РЖ)  $x_1$ , или в «предотказном» (9 – 11 класс чистоты РЖ)  $x_2$  состояниях, или в состоянии (12 и выше класс чистоты РЖ)  $x_3$ , вызывающем отказ ГС. Эти высказывания являются однородными в том отношении, что в них используются признаки только одного типа.

Обратимся к нашей конфигурации

$$c = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}, c \in b(R),$$

регулярной в смысле  $R$ . Согласно аксиоме 1 вектор её признака состоит из подвекторов  $a(g_n)$ . Вектор  $a(g_n)$  будет представлен в виде сенсорного вектора  $u(g_n)$ , элементы которого принадлежат пространству  $U$  — *сенсорному пространству* [2, 5]. Будем считать, что признаки каждого типа обрабатываются независимо с помощью процедуры, изображённой на рис.1, где представлена модель контроля специалистами  $p \in P$  состояния объекта технического обслуживания.

Диагностируемый при обслуживании объект в соответствии с аксиомой 1 может быть представлен как некоторая среда признаков, характеризующих этот объект и представляющих собой прямое произведение про-

странств признаков  $A$  (где  $A$  – суммарная интенсивность генерации частиц загрязнений элементами ГС  $N_c$ ). Для признака типа  $v$  будет задана алгебра множеств  $a$ , которая показывает полноту информации, содержащуюся в сенсором входном сигнале  $Y$ . При этом каждый полученный вектор о состоянии конфигурации уплотняется для специалиста  $p$  на основе измеримого множества  $a$  и полученных подвекторов для каждой образующей  $u = u(g_j)$  в течение времени  $t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ . Фик-

сируемые  $a^v(g)$  поступают в аналогово-цифровой преобразователь от датчиков встроенного контроля, расположенных в расходных баках ГС. Далее сигнал попадает в объединение признаков  $j$ , принадлежащих алгебре множеств  $a^v$ , затем передается в виде сенсорных подвекторов  $u^v$ , которые уплотняются кратностью 2 и поступают в сеть (основной процессор)  $N$ .

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

Информация о счётной концентрации механических примесей по размерным группам и дисперсном составе частиц механических примесей формируется в датчике встроенного контроля (ДВК) и поступает в устройство ввода-вывода в виде случайной последовательности ко-

локолообразных импульсов, амплитуда  $\Omega$  которых связана квадратичной зависимостью с размером (диаметром) частиц  $d$ :

$$\Omega = k \cdot d^2,$$

где  $k$  – коэффициент градуировки датчика.

Устройство ввода-вывода осуществляет анализ сформированной последова-

тельности импульсов и выдачу результатов в цифровом или аналоговом виде, и результаты измерения параметров частиц предъявляются наблюдателю-специалисту  $p$ . Кроме того, осуществляется запись результатов в файл.

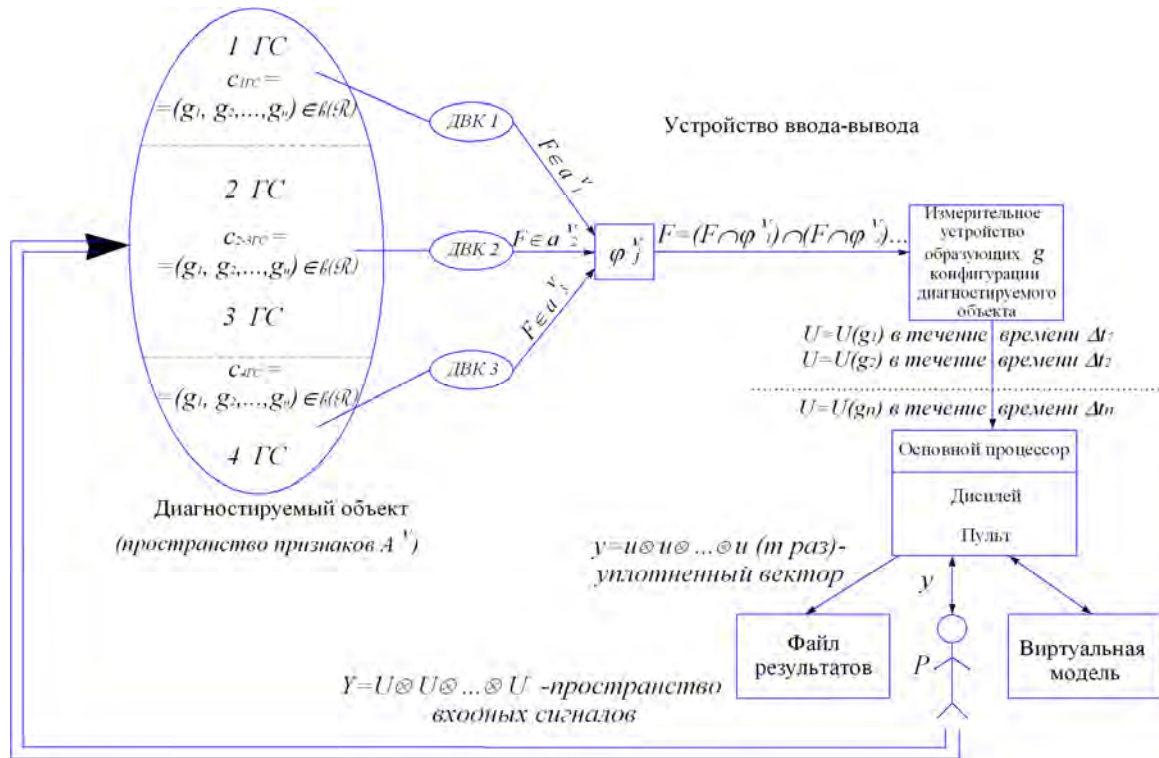


Рис. 1. Модель контроля состояния РЖ ГС самолета Ан-124-100

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

$$a = a^1 \times a^2 \times a^3 \dots$$

Алгебра множеств имеет следующую интерпретацию: она показывает, насколько подробно 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.

Сенсорный вектор для конкретной образующей  $u = u(g)$ , описанный выше, воздействует на сеть системы диагностического управления состоянием ГС в течение определенного периода времени. Сначала  $g_1$  представляется в виде  $u(g_1)$  и

подаётся в течение некоторого времени на сеть, затем  $g_2$  представляется в виде  $u(g_2)$  и подаётся на сеть, и т. д. В дополнение к данному алгоритму будем допускать некоторое сканирование конфигурации, когда  $p$  пытается оценивать состояние конфигурации как единое целое.

Точнее, это означает, что конфигурация, у которой  $n > 1$ , предстаёт перед лицом  $p$ , принимающим решение, как нечто наподобие набора интенсивности генерации частиц загрязнения. Вектор  $u$  как функция времени будет в таком случае некоторой периодической функцией, например, с периодом  $\Delta t$ , так что

$$\begin{aligned} u &= u(g_1) \text{ в течение времени } \Delta t_1, \\ u &= u(g_2) \text{ в течение времени } \Delta t_2, \\ &\dots \dots \dots \\ u &= u(g_n) \text{ в течение времени } \Delta t_n, \end{aligned}$$

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

а затем следуют периодические повторения. Скорость сканирования по конфигурации  $S$  ограничена лишь заданным промежутком времени, которое определяется стратегией получения информации о состоянии ГС. Когда  $p$  оценивает состояние образующих  $g$ , входящих в конфигурацию, каждая из них обрабатывается независимо от остальных. Во всех представлениях  $u(g_1), u(g_2), \dots$  будет использоваться одно и то же значение сенсорного вектора идеальной конфигурации образующих [4], 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 наработке ГС.

Но согласно теории, изложенной в [5], период измерений не обладает мощностью, достаточной для передачи всей информации, необходимой  $p$  для изучения  $\xi$ . Тогда данную проблему можно будет решить при помощи уплотнения (мультиплексирования) сенсорного вектора и введения входного поля сети. Для этого нам потребуется следующая аксиома.

**Аксиома 7.** Для заданного сенсорного вектора  $u = u(g)$  сформируем уплотненный вариант (порядок уплотнения, или кратность  $m$ )

$$y = u \otimes u \otimes \dots \otimes u \text{ (} m \text{ раз)},$$

где  $y$  принимает значения в пространстве входных сигналов

$$Y = U \otimes U \otimes \dots \otimes U.$$

Оператор уплотнения  $\otimes$  имеет следующий смысл. Если задан некоторый вектор  $u = (u_i)$ , то его уплотненным с кратностью  $m$  вариантом является  $m$ -мерный массив с элементами  $u_{i_1} u_{i_2} \dots u_{i_m}$  — результат перемножения компонент. Кратность  $m$  отнюдь не столь велика, как исходные размерности  $U$  и  $U$ .

В качестве обобщения этого случая можно рассмотреть ситуацию, когда кратность изменяется в системе от 1 до некоторого максимума. Если, в частно-

сти, информационный носитель системы обладает высокой избыточностью, то целесообразно уплотнять лишь некоторую часть каждого сенсорного подпространства.

Рассмотренные аксиомы служат основой для математического описания модели контроля состояния ГС по параметрам РЖ, представленной на рис.1.

Разработанная модель диагностики и оценки чистоты РЖ была успешно реализована и исследована в лабораторных условиях с помощью средств современных технологий National Instruments на базе авиакомпании «Волга-Днепр».

Выбор технологий National Instruments как средства реализации данной модели был обусловлен простотой и эффективностью её использования в программной среде LabVIEW. В качестве ДВК был выбран фотоэлектрический датчик типа «ПОТОК» [6], разработанный в лаборатории ОНИЛ-16 "Радиоэлектронные методы и устройства диагностики систем летательных аппаратов" СГАУ под руководством профессора Логвинова Л.М. В качестве устройства ввода-вывода была выбрана платформа «CompactDAQ», обеспечивающая гибкое законченное аппаратное решение для разработки различных систем сбора и управления сигналами по шине USB на базе программного комплекса LabVIEW.

В результате работ была обеспечена возможность мониторинга процесса деградации работы агрегатов ГС в период эксплуатации ВС и предупреждения возникновения их отказов посредством выявления функциональных симптомов, возникающих на ранних стадиях отказа.

Данная статья написана по результатам проведения поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

#### Библиографический список

1. Столл, Роберт. Р. Множества. Логика. Аксиоматические теории [Текст]: Р.

Р. Столл / пер. с англ. Ю. А. Гастева и И. Х. Шмаина; под ред. Ю. А. Шихановича.– М.: Просвещение, 1968.– 232 с.

2. **Гренандер, Ульф.** Лекции по теории образов [Текст]: в 3 т. / У. Гренандер. **Т. 1:** Синтез образов – М.: Мир, 1979.– 382 с.

3. Fitch E.C. Fluid Contamination Control //Technology transfer Series #4, Oklahome, FFS, INC. 1988. – 433 pp.

4. **Гареев, Альберт Минеасхатович.** Упреждающее обслуживание гидравлических систем летательных аппаратов[Текст]: А.М. Гареев, С.Н. Тиц. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2010. – 112 с.

5. **Гренандер, Ульф.** Лекции по теории образов [Текст]: в 3 т. / У. Гренандер. **Т. 2:** Анализ образов – М.: Мир, 1981.– 447 с.

6. **Логвинов, Леонид Митрофанович.** Техническая диагностика жидкостных систем технологического оборудования по параметрам рабочей жидкости [Текст]: Л.М. Логвинов. – М.: ЦНТИ "Поиск", 1992.– 91с.

## References

1. Stoll, R. Sets. Logics. Axiomatic theory. – Moscow: Publishing house “Prosveschenie”, 1968 – 232 pp.

2. Grenander, U. Lectures on image theory // Vol. 1 – Moscow: Publishing house “Mir”, 1979 – 382 pp.

3. Fitch E.C. Fluid Contamination Control // Technology transfer Series #4, Oklahoma, FFS, INC. 1988. – 433 pp.

4. Gareyev, A. M., Tiz S. N. Proactive maintenance of aircraft hydraulic systems. – Samara: Publishing house of Samara Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2010 – 112 pp.

5. Grenander, U. Lectures on image theory // Vol. 2 – Moscow: Publishing house “Mir”, 1981 – 447 pp.

6. Logvinov, L. M. Technical diagnostics of production equipment fluid systems by the fluid parameters [Text] / L. M. Logvinov. – Moscow: “Poisk” of the Central Science and Technology Institute, 1992. – 91 pp.

## SIMULATION OF FLUID CONTAMINATION CONTROL PROCESS

© 2010 A. M. Gareyev

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

Principles of realization of proactive technologies of aircraft maintenance are reviewed in the article. The basic axioms of the task of controlling the hydraulic system condition by fluid parameters are formulated. A model of fluid contamination control is described.

*Hydraulic system, fluid, technical condition control, proactive maintenance, fluid contamination, automatic measurement complex.*

### Информация об авторах

**Гареев Альберт Минеасхатович**, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: оперативный контроль технического состояния авиационной техники; неразрушающие методы контроля. E-mail: [gareyev@ssau.ru](mailto:gareyev@ssau.ru).

**Gareyev Albert Mineaskhatovitch**, candidate of technical sciences, associate professor, department of aircraft system maintenance. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: expeditious control of aircraft system technical condition, non-destructive methods of control. E-mail: [gareyev@ssau.ru](mailto:gareyev@ssau.ru).