

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

© 2008 А. М. Гареев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Предложена модель изменения состояния рабочей жидкости в гидравлической системе воздушного судна на протяжении межремонтного ресурса. Модель разработана на основе теории марковских процессов и предназначена для определения состояния чистоты рабочей жидкости с применением упреждающих технологий обслуживания в целях увеличения срока службы компонентов гидравлической системы воздушного судна.

*Гидравлическая система, рабочая жидкость, модель состояния, контроль технического состояния, упреждающее обслуживание, чистота рабочей жидкости*

Упреждающее обслуживание – это деятельность по обнаружению и коррекции источников отклонений параметров, в частности, чистоты рабочей жидкости (РЖ), которые приводят к отказу компонентов гидравлической системы (ГС) воздушных судов (ВС).

Долговечность компонентов ГС может быть значительно увеличена поддержанием параметров чистоты РЖ в соответствии с программой упреждающего обслуживания, которая требует оценки вероятности  $P$  состояния чистоты РЖ при известных параметрах интенсивности изменения этих состояний  $I_{ij}$ .

Как показала практика эксплуатации ВС, надёжность ГС в существенной степени определяется постоянством параметров РЖ (вязкостью, кислотностью, диэлектрической проницаемостью и др.), в том числе и чистотой жидкости [1, 2, 3, 4]. Анализ отказов и нарушений работы ГС показывает, что более 20 % из них связано с недопустимым загрязнением РЖ. Согласно отечественному и зарубежному опыту [4, 5], повышенная загрязнённость РЖ приводит к снижению долговечности агрегатов в 1,5 – 3 раза и более.

Исследования показали, что проблема обеспечения надёжности и долговечности ГС в настоящее время существенно связана с проблемой оперативного контроля чистоты жидкости в условиях эксплуатации ВС, которая может быть решена посредством ре-

ализации упреждающих технологий обслуживания ГС. Установлено, что средние показатели производственной экономии, достигнутые благодаря применению упреждающего подхода, составляют:

- сокращение расходов на обслуживание: 25-30 %,
- уменьшение времени простоя: 35 – 45%,
- увеличение производительности: 20 – 25 %.

Известно [3, 4], что наиболее информативным и удобно обрабатываемым параметром, характеризующим состояние элементов ГС, является загрязнённость РЖ в виде количества частиц загрязнения  $N_c$ :

$$N_c = N_0 + N_{gi} + N_{BH}, \quad (1)$$

где  $N_0$  – первоначальное количество частиц загрязнения в жидкости;  $N_{gi}$  – количество частиц загрязнений, вносимых в систему в результате приработки, нормального и абразивного износа  $g_i$  компонента системы;  $N_{BH}$  – количество частиц загрязнений, поступающих через уплотнения штоков силовых цилиндров системы управления и шасси ВС.

Процесс загрязнения РЖ при функционировании ГС может быть интерпретирован как образ роста, который возникает в рамках пространственно-временного представления согласно теории распознавания образов [6]. Данный процесс стохастически определяется факторами внутренней организации объектов ГС и взаимодействия их с РЖ.

Количество и размер частиц, выделяемых соприкасающейся парой, представляет ценную информацию о техническом состоянии компонентов ГС, на основании которой можно получить необходимые сведения о процессе загрязнения.

Первоначально, согласно требованиям ГОСТа 17216–2001, чистота РЖ в таре перед заправкой ГС ВС соответствует 5 классу. Но при эксплуатации ВС чистота РЖ в основных точках ГС изменяется (таблица 1).

Методы обнаружения и коррекции отклонений параметров РЖ и распознавания её характеристик важны для предупреждения отказов ГС. Ключевым фактором программы упреждающего обслуживания является знание вероятности состояния жидкости при известных законах интенсивности её загрязнения.

Экспериментально установлено, что каждый элемент ГС в отдельности имеет определённую интенсивность  $I$  генерации частиц загрязнений в РЖ, зависящую от времени наработки ГС. Генерация частиц загрязнения нерегулярна и носит случайный характер. Интенсивность  $I$  (плотность) потока загрязнения в зависимости от времени наработки отдельно взятых агрегатов и всей ГС подчиняется пуассоновскому закону распределения (в силу предельных теорем для суммарного и редееющего потоков [7]), а вероятность изменения загрязнения во времени определяется следующим соотношением:

$$P_n(t) = \frac{(I \cdot t)^n}{n!} e^{-I \cdot t}, \quad (2)$$

где  $I = \frac{1}{T_{cp}}$  – интенсивность потока загрязнения (параметр потока);  $T_{cp}$  – средняя длина промежутка времени между поступлениями загрязнений.

Для того, чтобы добиться стабильности функционирования ГС, зависящей от чистоты РЖ, загрязнения в ней должны быть выявлены и идентифицированы, проанализированы и измерены и сдержаны на уровне ниже критического допустимого предела для компонентов ГС.

Рассмотрим следующую постановку задачи моделирования оценки состояния загрязнения РЖ. Пусть дана некоторая ГС  $S$ , которая с течением времени меняет своё состояние. Состояние ГС в любой момент времени можно охарактеризовать численными значениями концентрации загрязнения, которые назовём фазовыми координатами ГС. При этом состояние ГС представим в виде точки  $x_j$  с координатами в фазовом пространстве  $e$  (рис. 1). Тогда изменению состояния жидкости ГС в процессе эксплуатации ВС будет соответствовать некоторая траектория точки  $x_j$  в фазовом пространстве  $e$ . Кривую, получаемую как траекторию движения этой точки в фазовом пространстве, будем описывать функцией  $S = f(N; t)$ .

Введём случайную величину концентрации загрязнения жидкости  $N_i \in e$ , соответствующую номеру состояния  $x_j$ , в котором находится ГС в момент времени  $t_j$ . Обозначим через  $E_{t_j}$  событие, состоящее в том, что

Таблица. 1. Уровень загрязнения РЖ в основных точках ГС

№ п.п.	Участок гидравлической системы	Класс чистоты жидкости
1	Бак – на выходе	7 – 9
2	После насоса – в линии дренажа – в линии нагнетания	9 – 11 7 – 9
3	После фильтра нагнетания	4 – 5
4	После потребителей (подсистем) – шасси – механизации – управления	7 – 10 7 – 9 6 – 8

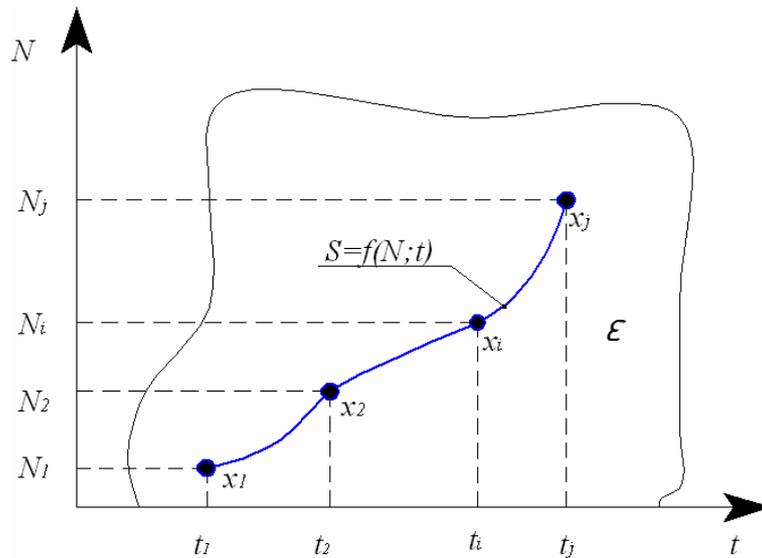


Рис. 1. Изменение состояния загрязнения рабочей жидкости ГС

в момент времени  $t_j$  система находится в состоянии  $x_j$ .

Обозначим условную вероятность того, что в момент времени  $t_j = t_i + t$  уровень загрязнённости РЖ будет в состоянии  $x_j$ , если в момент времени  $t_i$  он был в состоянии  $x_i$  через  $P_{i,j}(t_i, t)$ .

В [3] установлено, что чистота РЖ за весь период эксплуатации меняется в диапазоне от 2 до 13 класса. Согласно исследованиям [2, 4, 5] условно разделим указанный диапазон классов чистоты РЖ по четырём основным типам состояний ГС: первоначальное (исходное), нормальное, предотказное и отказ. Данное разделение представим в виде таблицы 2.

Тогда модель изменения состояния РЖ будет включать в себя четыре основных состояния (рис. 2):

- 1)  $x_0$  – первоначальное состояние (исходное), соответствующее чистоте РЖ в заводской таре перед заправкой ГС;
- 2)  $x_1$  – нормальное состояние, соответствующее чистоте РЖ, обеспечивающей приемлемый уровень надёжности ГС;
- 3)  $x_2$  – предотказное состояние, соответствующее интенсивному увеличению уровня загрязнения РЖ;
- 4)  $x_3$  – состояние, вызывающее отказ узла или агрегата ГС.

Переход РЖ из одного состояния в другое происходит под воздействием пуассоновского потока частиц загрязнений с интенсивностью  $I_{ij}$  или  $I_{j,i}$ .

Составим уравнения, определяющие вероятности  $P_0(t)$ ,  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$  и  $P_3(t)$  того, что РЖ в любой момент времени  $t$  будет находиться в состоянии  $x_0$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ . Рассмотрим момент времени  $t$  и соответственно дадим ему приращение  $Dt$ . В этом случае вероятность  $P_0(t + Dt)$  есть вероятность того, что в момент времени  $(t + Dt)$  жидкость находится в первоначальном состоянии  $x_0$ . Это событие может иметь четыре исхода:

А – жидкость в момент времени  $t$  была в первоначальном состоянии  $x_0$  и за время  $Dt$  из него не вышла;

В – жидкость в момент времени  $t$  была в нормальном состоянии  $x_1$  и за время  $Dt$  перешла в первоначальное состояние  $x_0$ ;

С – жидкость в момент времени  $t$  была в предотказном состоянии  $x_2$  и за время  $Dt$  перешла в первоначальное состояние  $x_0$ ;

Д – жидкость в момент времени  $t$  была в состоянии отказа  $x_3$  и за время  $Dt$  перешла в первоначальное состояние  $x_0$ .

В силу ординарности пуассоновских потоков событий вероятность осуществления нескольких переходов за время  $Dt$  представляет собой величину высшего порядка малости по сравнению с  $Dt$  ( $0(Dt)$ ).

Найдём вероятность события А:

Таблица 2. Состояния рабочей жидкости ГС ВС

Тип состояния рабочей жидкости	Класс чистоты по ГОСТу 17216–2001	В соответствии с ГОСТом 17216–2001						
		Число частиц загрязнений в объёме жидкости 100±5см <sup>3</sup> , при размере частиц, мкм						Масса загрязнений, % не более
		5 – 10	10 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 200	Волокна	
Первоначальное (исходное)	5	500	250	25	4	1	-	-
	6	1000	500	50	6	2	1	0,0002
Нормальное	7	2000	1000	100	12	4	2	0,0002
	8	4000	2000	200	25	6	3	0,0004
Предотказное	9	8000	4000	400	50	12	4	0,0006
	10	16000	8000	800	100	25	5	0,0008
Отказ	11	31500	16000	1600	200	50	10	0,0016
	12	63000	31500	3150	400	100	20	0,0032

$$P(A) = P_0(t) \cdot e^{-\int_t^{t+\Delta t} (I_{0,1}(t) + I_{0,2}(t) + I_{0,3}(t)) dt} \quad (3)$$

Считая величину  $Dt$  малой, а  $I_{0,1}(t)$ ,  $I_{0,2}(t)$  и  $I_{0,3}(t)$  непрерывными функциями, получим

$$P(A) = P_0(t) \cdot (1 - I_{0,1}(t)\Delta t - I_{0,2}(t)\Delta t - I_{0,3}(t)\Delta t + 0(Dt)) \quad (4)$$

где  $0(Dt)$  – величина высшего порядка малости по сравнению с  $Dt$ .

Событие  $B$  будет иметь место, если РЖ в момент времени  $t$  будет в нормальном состоянии  $x_1$  и в потоке событий с интенсивностью  $I_{1,0}(t)$  за время  $Dt$  наступит хотя бы одно событие, а в потоках событий с интенсивностями  $I_{0,1}(t)$ ,  $I_{0,2}(t)$  и  $I_{0,3}(t)$  за это же время  $Dt$  не наступит ни одного события. Считая функцию  $I_{1,0}(t)$  непрерывной, получим

$$P(B) = P_1(t) \cdot \left( 1 - e^{-\int_t^{t+\Delta t} I_{1,0}(t) dt} \right) \cdot e^{-\int_t^{t+\Delta t} (I_{0,1}(t) + I_{0,2}(t) + I_{0,3}(t)) dt} \quad (5)$$

Аналогичным образом, рассмотрев события  $C$  и  $D$ , получим

$$P(C) = P_2(t) \cdot \left( 1 - e^{-\int_t^{t+\Delta t} \lambda_{2,0}(t) dt} \right) \cdot e^{-\int_t^{t+\Delta t} (\lambda_{0,1}(t) + \lambda_{0,2}(t) + \lambda_{0,3}(t)) dt}; \quad (6)$$

$$P(D) = P_3(t) \cdot \left( 1 - e^{-\int_t^{t+\Delta t} \lambda_{3,0}(t) dt} \right) \cdot e^{-\int_t^{t+\Delta t} (\lambda_{0,1}(t) + \lambda_{0,2}(t) + \lambda_{0,3}(t)) dt} \quad (7)$$

Применяя теорему сложения вероятностей, будем иметь

$$P_0(t + Dt) = P_0(t) \cdot (1 - I_{0,1}(t)Dt - I_{0,2}(t)Dt - I_{0,3}(t)Dt) + I_{1,0}(t)Dt \cdot P_1(t) + I_{2,0}(t)Dt \cdot P_2(t) + I_{3,0}(t)Dt \cdot P_3(t) + 0(Dt) \quad (8)$$

где  $0(Dt)$  представляет собой сумму всех членов, порядок малости которых выше  $Dt$ .

Проведя преобразования в выражении (1), получим

$$\frac{P_0(t + Dt) - P_0(t)}{Dt} = -(I_{0,1}(t) + I_{0,2}(t) + I_{0,3}(t))P_0(t) + I_{1,0}(t)P_1(t) + I_{2,0}(t)P_2(t) + I_{3,0}(t)P_3(t) + \frac{0(Dt)}{Dt} \quad (9)$$

Переходя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , найдём уравнение

$$\lim_{Dt \rightarrow 0} \frac{P_0(t + Dt) - P_0(t)}{Dt} = -(I_{0,1}(t) + I_{0,2}(t) + I_{0,3}(t))P_0(t) + I_{1,0}(t)P_1(t) + I_{2,0}(t)P_2(t) + I_{3,0}(t)P_3(t) \quad (10)$$

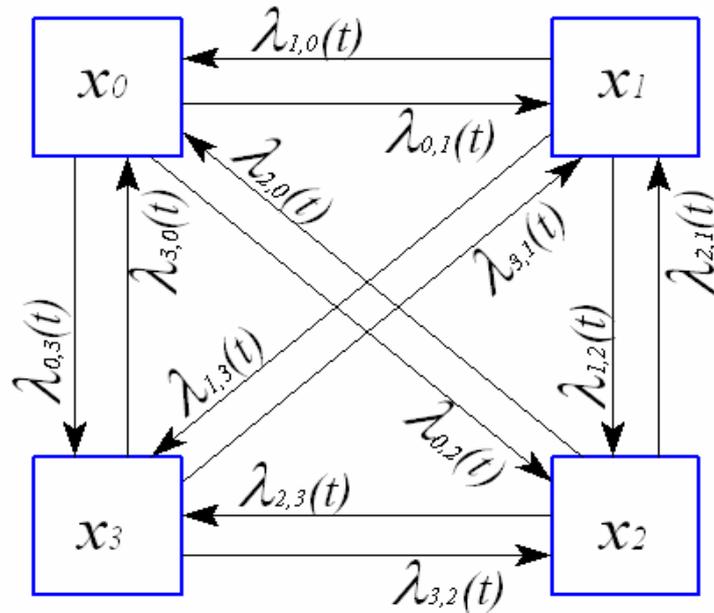


Рис. 2. Модель изменения состояния загрязнения рабочей жидкости ГС

Так как предел левой части есть производная функции  $P_0(t)$ , то окончательно дифференциальное уравнение для  $P_0(t)$  примет вид:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -(I_{0,1}(t) + I_{0,2}(t) + I_{0,3}(t))P_0(t) + I_{1,0}(t)P_1(t) + I_{2,0}(t)P_2(t) + I_{3,0}(t)P_3(t). \tag{11}$$

Следует обратить внимание на то, что при выводе этого дифференциального уравнения использовались оба свойства пуассоновского потока событий: ординарность и отсутствие последействия.

Очевидно, пользуясь аналогичными рассуждениями и учитывая для каждого состояния все возможные переходы, можно получить систему обыкновенных линейных дифференциальных уравнений. Исходя из опыта эксплуатации ГС ВС, установлены следующие закономерности изменения состояния РЖ.

1. Уровень загрязнения жидкости изменяется постепенно в течение длительного периода времени. Поэтому можно утверждать, что в большинстве случаев вероятности переходов состояний с интенсивностями  $I_{0,2}(t)$ ,  $I_{1,3}(t)$  и  $I_{0,3}(t)$  будут стремиться к нулю,

т.е. данные переходы можно не рассматривать.

2. Уровень загрязнения жидкости под воздействием фильтров согласно исследованиям [3] может изменяться в «лучшую сторону» только в пределах двух соседних состояний, определённых в таблице 2, т. е. переходы состояний с интенсивностями  $I_{2,0}(t)$  и  $I_{3,1}(t)$  в первом приближении можно не рассматривать.

3. Жидкость из состояния  $x_3$ , приводящего к отказу агрегатов и ГС в целом, с большой долей вероятности не перейдет в первоначальное состояние  $x_0$ .

Поэтому, учитывая данные закономерности, можно записать окончательный вариант системы дифференциальных уравнений, описывающих модель изменения состояния РЖ:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -(I_{0,1}(t))P_0(t) + I_{1,0}(t)P_1(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(I_{1,0}(t) + I_{1,2}(t))P_1(t) + I_{0,1}(t)P_0(t) + I_{2,1}(t)P_2(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= -(I_{2,1}(t) + I_{2,3}(t))P_2(t) + I_{1,2}(t)P_1(t) + I_{3,2}(t)P_3(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= -I_{3,2}(t)P_3(t) + I_{2,3}(t)P_2(t). \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

Для интегрирования системы (12) введём начальные условия:  $P_0(0), P_1(0), P_2(0)$  и  $P_3(0)$ , на которые наложим естественные ограничения:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq P_k(0) \leq 1; \\ \sum_{k=1}^n P_k(0) = 1. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Необходимо заметить, что согласно исследованиям закона загрязнения РЖ при нормальных условиях эксплуатации ГС было установлено, что процесс увеличения концентрации загрязнения по времени протекает достаточно медленно. Поэтому до некоторого момента времени  $t_n$  можно утверждать, что с большой долей вероятности процесс будет считаться стационарным ( $Dt = 0$ ) и может быть описан теорией процесса гибели, когда значение любой вероятности  $P_{k+1}$  можно выразить через все предшествующие [7]:

$$P_{k+1} = \frac{I_k}{I_{k+1}} P_k = P_0 \prod_{n=0}^k \frac{I_n}{I_{n+1}}, \quad (14)$$

где  $n$  – число переходов состояний.

Определение момента времени  $t_n$  является задачей, которую можно решить с применением датчиков встроенного контроля в рамках стратегии упреждающего обслуживания в реальном масштабе времени.

Найдём общее решение системы дифференциальных уравнений (12).

Введём вероятности (набор) переходов  $P_{ij}$  РЖ из состояния  $i$  в состояние  $j$  ( $P_{ij}$  называется переходными вероятностями).

Для стационарного процесса

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = 0 \Rightarrow P_i = \text{const} \text{ при } t \rightarrow \infty.$$

Тогда система дифференциальных уравнений (12) с учётом (13) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} P_{0,1} \cdot P_0 &= P_{1,0} \cdot P_1; \\ (P_{1,0} + P_{1,2})P_1 &= P_{0,1} \cdot P_0 + P_{2,1} \cdot P_2; \\ (P_{2,1} + P_{2,3})P_2 &= P_{1,2} \cdot P_1 + P_{3,2} \cdot P_3; \\ P_{3,2} \cdot P_3(t) &= P_{2,3} \cdot P_2; \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

В этом случае  $P_{ij}(t) = 1 - e^{-I_{ij}t} \approx I_{ij} \Delta t$ ,

где  $I_{ij}$  – плотность вероятности перехода.

Отсюда  $I_{ij} = \frac{P_{ij}}{\Delta t}$ . При  $\Delta t \rightarrow 0 \Rightarrow P_{ij} = I_{ij}$ .

На основе статистических данных можно определить вероятности нахождения РЖ

в  $k$ -ом состоянии:  $P_k = \frac{n_k}{n_\Sigma}$ . Здесь  $n_k$  – количество попаданий РЖ в  $k$ -е состояние за интервал времени  $Dt$ ,  $n_\Sigma$  – общее количество переходов состояний РЖ за время  $Dt$ .

Решение системы уравнений (15) получено на использовании формул (13), (14) при известных плотностях  $I_{ij}$  вероятностей переходов.

Величина вероятностей переходов  $I_{ij}$  и  $I_{ji}$  имеют простой физический смысл:  $I$  – это обратная величина среднего времени пребывания РЖ в данном состоянии. Значения  $I$  определяются на основе статистических данных эксплуатации ВС за определённый период времени.

Полученные вероятности состояний РЖ положены в основу программы упреждающего обслуживания ГС.

### Библиографический список

1. Алексеева, Т. В. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т. В. Алексеева, В. Д. Бабанская, Т. М. Башта / Под ред. Башта Т. М. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
2. Башта, Т. М. Надежность гидравлических систем воздушных судов. / Т. М. Башта. – М.: Транспорт, 1986. – 280 с.
3. Тимиркеев, Р.Г. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов. / Р. Г. Тимиркеев, В. М. Сапожников. – М.: Машиностроение, 1986. – 152 с.
4. Fitch E.C. Fluid contamination control // Technology transfer Series #4, Oklahome, FFS, INC. 1988. - 433p.
5. Никитин, Г.А. Влияние загрязнённости жидкости на надёжность работы гидросистем летательных аппаратов. / Г. А. Ники-

тин, С. В. Чирков. – М.: Транспорт, 1969. – 184 с.

6. Гренандер, У. Лекции по теории об-разов. / У. Гренандер. – М.: Издательство

«Мир», 1979. – 382 с.

7. Овчаров, Л. А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. / Л. А. Овчаров. – М.: Машиностроение, 1969. – 324 с.

### References

1. Alexeyeva, T. V., Babanskaya, V. D., Bashta, T. M. Technical diagnostics of hydraulic drives / Edited by T. M. Bashta. – Moscow: Machinostroyeniye (Machine building), 1989 – 264 pp.

2. Bashta, T. M. Reliability of aircraft hydraulic systems. – Moscow: Transport, 1986. – 280 pp.

3. Timirkeyev, R. G., Sapozhnikov, V. M. Industrial purity and fine filtration of aircraft working fluids. – Moscow: Machinostroyeniye (Machine building), 1986 – 152 pp.

4. Fitch E. C. Fluid contamination control // Technology transfer Series #4, Oklahome, FFS, INC. 1988. – 433 p.

5. Nikitin, G. A., Tchirkov, S. V. Impact of fluid contamination of the reliability of aircraft hydraulic system operation. – Moscow: Transport, 1969 – 184 pp.

6. Grenander, U. Lectures on image theory. – Moscow: Publishing house “Mir”, 1979 – 382 pp.

7. Ovtcharov, L. A. Applied tasks of mass service theory. – Moscow: Machinostroyeniye, 1969 – 324 pp.

## MODELLING CHANGES OF CONDITION OF AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEM WORKING FLUID

© 2008 A. M. Gareyev

Samara State Aerospace University

The paper presents a model of working fluid condition changes in an aircraft hydraulic system during the overhaul period. The model is developed on the basis of Marcov process theory and intended to define the working fluid purity using lead maintenance technologies in an effort to increase life expectancy of aircraft hydraulic system components.

*Hydraulic system, working fluid, model of condition, technical condition control, lead maintenance, working fluid purity*

### Информация об авторе

**Гареев Альберт Минеасхатович**, ассистент кафедры эксплуатации авиационной техники Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов: оперативный контроль технического состояния авиационной техники; неразрушающие методы контроля.

**Gareyev, Albert Mineaskhatovitch**, assistant of aircraft system maintenance, Samara State Aerospace University. Area of research: expeditious control of aircraft system technical condition, non-destructive methods of control.