

вания и удаления электронных учебников, добавления, редактирования и удаления тестовых заданий к существующим электронным учебникам.

• **Мастер настройки системы.** Он необходим системному администратору для настройки правильной работы системы, а также для редактирования и удаления различной служебной информации.

• **Агент статистических данных.** Предоставляет пользователям различную статистическую информацию в зависимости от их уровня доступа.

• **Визуализатор** — агент, предоставляющий пользователям информацию в соответствии с шаблонами вывода.

Перечисленные выше агенты распределены по функциям, которые они выполняют. В процессе выполнения своих функций агенты взаимодействуют друг с другом (рис. 4).

Информационная среда обучения проходит комплексное тестирование и доступна по адресу <http://www.ufamedia.ru/red>, ее наполнение и модернизация продолжаются.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная мультиагентная система контент-менеджмента может применяться как для создания, наполнения и модернизации локальной информационной обучающей среды, так и для управления реальными учебными процессами.

Мультиагентный подход, положенный в основу разработанной системы, приводит к кардинальным изменениям в самой организации локальной информационной обучающей среды, в которой разделенные функциональная и содержательная части уступают место единой системе контент-менеджмента, обрабатывающей все информационные потоки. Ожидаемый результат — высокая эффективность, гибкость и надежность такой информационной обучающей среды.

УДК 621.454

Н. В. КОНДРАТЬЕВА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННЫХ ГТД ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Рассматривается проблема оптимизации параметров ускоренных испытаний из условия обеспечения максимальной технико-экономической эффективности ГТД. Параметры испытаний оптимизируются с применением имитационной модели жизненного цикла ГТД. Основное внимание уделено особенностям моделирования эксплуатации. Приведены результаты сравнения эффективности различных способов моделирования эксплуатации. *Ускоренные испытания; эксплуатация; жизненный цикл; технико-экономическая эффективность; имитационное моделирование; оптимизация*

Ресурсные испытания технических изделий, включая ускоренные (периодические, технологические и др.), используемые для проверки их надежности, являются неотъемлемой частью всех этапов жизненного цикла (ЖЦ) технических изделий, в том числе ГТД. Очевидно, что от объема,

Перспективы дальнейшего развития подхода связываются также с объединением подобных мультиагентных систем для создания глобальной информационной обучающей среды.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает свою глубокую признательность проф. Ю.С.Кабальнову и доц. С.В.Тархову за помощь в постановке задачи, полезные конструктивные советы и консультации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тихомиров В. П.** Основные принципы построения СДО России // ДО. 1998. № 1. С. 4–9.
2. **Rzevski G. A.** Multi-agents logistics and E-commerce // MAGENTA White Paper. 1999. 14 p.
3. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Мультиагентные системы для моделирования процессов самоорганизации и кооперации // Proc. of XIII Int. Conf. on the Application of Artificial Intelligence in Engineering. Galway, Ireland, 1998. P. 91–96.
4. **Хорошевский В. Ф.** Методы и средства проектирования и реализации мультиагентных систем // Проблемы искусственного интеллекта: Матер. сем. М.: ИПУ РАН, 1999.

### ОБ АВТОРЕ



**Лотник Юрий Сергеевич**, аспирант каф. информатики УГАТУ. Дипл. инж. по программному обеспечению (УГАТУ, 2000). Работает над диссертацией о построении информационных обучающих сред.

Ученый сотрудник Института проблем механики РАН, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое моделирование и численные методы» Института проблем механики РАН, старший научный сотрудник Института проблем механики РАН, старший научный сотрудник Института проблем механики РАН.



полностью или частично ЖЦ рассматриваемого изделия. Например, для серийно выпускаемого ГТД возможна имитация этапов «производство-испытания-эксплуатация» и т. д.

Задача максимизации эффекта  $\Theta$  от поставляемых (эксплуатируемых) изделий решается оптимизацией объема  $N_{\text{и}}$ , режимов  $R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}})$  и длительности  $\tau_{\text{и}}$  испытаний:

$$\Theta = \max f[N_{\text{и}}, R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}}), \tau_{\text{и}}; C_{\Sigma}]; \quad (1)$$

$$R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}}) \in G_R, \quad \tau_{\text{и}k} \in G_{\tau},$$

где  $C_{\Sigma}$  — функционал, включающий параметры ЖЦ, сохраняющиеся неизменными при оптимизации испытаний;  $G_R, G_{\tau}$  — соответственно области реализации режимов и длительности испытаний.

Для решения задачи (1) необходимо конкретизировать вид функционала  $f$ . Для авиационного ГТД это может быть обеспечено следующим образом. Основное требование, предъявляемое к ускоренным испытаниям технических изделий, сводится к наиболее полному воспроизведению в испытаниях эксплуатационной повреждаемости изделия за возможно минимальное время:

$$\Theta \sim \max(K_y = \tau_{\text{э}}/\tau_{\text{и}}); \quad (2)$$

$$\Pi_{\text{и}}[P_0, R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}}), \tau_{\text{и}}] = \Pi_{\text{э}}[P_0, R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}), \tau_{\text{э}}]; \quad (3)$$

$$P_0 = \text{idem}; \quad R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}}), R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}) \in G_R,$$

где  $\Pi_{\text{и}}[P_0, R_{\text{и}}(\tau), \tau_{\text{и}}]$  — повреждаемость в испытаниях, определяемая вектором параметров начального состояния  $P_0$ , режимами  $R_{\text{и}}(\tau)$  и длительностью  $\tau_{\text{и}}$  испытаний;  $\Pi_{\text{э}}[P_0, R_{\text{э}}(\tau), \tau_{\text{э}}]$  — повреждаемость в эксплуатации, определяемая вектором  $P_0$ , режимами  $R_{\text{э}}(\tau)$  и длительностью  $\tau_{\text{э}}$  эксплуатации;  $K_y$  — коэффициент ускорения испытаний;  $G_R$  — область режимов нагружения, в которой сохраняется вид повреждаемости основных элементов узлов изделия, с учетом которых проводится расчетное определение условий проведения ускоренных испытаний.

Поскольку обеспечить условие (3) на практике сложно, то оптимизация проводится из условия [2]

$$\Theta \sim \begin{cases} \max K_y; \\ \delta\Pi = |\Pi_{\text{и}}[P_0, R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}}), \tau_{\text{и}}] - \Pi_{\text{э}}[P_0, R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}), \tau_{\text{э}}]|; \\ P_0 = \text{idem}; \quad R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}}), R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}) \in G_R, \end{cases} \quad (4)$$

или, объединяя показатели  $K_y$  и  $\delta\Pi$ , выбор параметров испытаний можно проводить из условия

$$\Phi_{\Sigma} = \max \sqrt{\alpha_1 \left( \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Pi_{\text{э}i\nu_i}[P_0, R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}), \tau_{\text{э}}]}{\Pi_{\text{и}i}[P_0, R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}}), \tau_{\text{и}}] - \Pi_{\text{э}i\nu_i}[P_0, R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}), \tau_{\text{э}}]} \right)^2 \right)^2 + \alpha_2 \left( \frac{\tau_{\text{э}}}{\tau_{\text{и}}} \right)^2};$$

$$\overline{\delta\Pi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| (\Pi_{\text{и}i} - \Pi_{\text{э}i\nu_i}) / \Pi_{\text{э}i\nu_i} \right| \leq \overline{\delta\Pi}^*;$$

$$R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}}), R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}) \in G_R; \quad \tau_{\text{и}}, \tau_{\text{э}} \in G_{\tau}; \quad \nu_i \in [1 \dots N_{\text{э}}], \quad (5)$$

где  $\Pi_{\text{и}i}$  и  $\Pi_{\text{э}i\nu_i}$  — повреждаемость  $i$ -го элемента двигателя в испытаниях и эксплуатации соответственно;  $\tau_{\text{и}}, \tau_{\text{э}}$  — длительность нагружения в испытаниях и эксплуатации;  $N_{\text{э}}$  — количество эксплуатируемых двигателей;  $\alpha_1, \alpha_2$  — весовые коэффициенты ( $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ) [3].

С учетом прибыли  $\text{Пр}$  от реализации партии двигателей функционал  $\Phi_{\Sigma}$  можно представить в виде свертки показателей  $\delta\Pi, K_y$  и  $\text{Пр}$ :

$$\Phi_{\Sigma} = \max \sqrt{\alpha_1 \left( \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Pi_{\text{э}i\nu_i}[P_0, R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}), \tau_{\text{э}}]}{\Pi_{\text{и}i}[P_0, R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}}), \tau_{\text{и}}] - \Pi_{\text{э}i\nu_i}[P_0, R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}), \tau_{\text{э}}]} \right)^2 \right)^2 + \alpha_2 \left( \frac{\tau_{\text{э}}}{\tau_{\text{и}}} \right)^2 + \alpha_3 \text{Пр}^2};$$

$$\overline{\delta\Pi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| (\Pi_{\text{и}i} - \Pi_{\text{э}i\nu_i}) / \Pi_{\text{э}i\nu_i} \right| \leq \overline{\delta\Pi}^*;$$

$$R_{\text{и}}(\tau_{\text{и}}), R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}) \in G_R; \quad \tau_{\text{и}}, \tau_{\text{э}} \in G_{\tau}; \quad \nu_i \in [1 \dots N_{\text{э}}]. \quad (6)$$

При оптимизации необходимо учитывать, что  $\Pi_{\text{э}i\nu_i}$  в формуле (6) может принимать различные значения, обусловленные стратегией эксплуатации, качеством изготавливаемых двигателей и т. д.

Принципиально возможны следующие способы моделирования  $\Pi_{\text{э}i\nu_i}$ .

Способ 1 ориентирован на выбор наиболее нагруженной  $\nu$ -й траектории эксплуатации, при которой средняя повреждаемость элементов двигателя является наибольшей:

$$[R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}), \tau_{\text{э}}]_{\nu} \sim \max_k \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{\Pi}_{\text{э}ik}[P_0, R_{\text{э}}(\tau_{\text{э}}), \tau_{\text{э}}]; \quad (7)$$

$$k = \overline{1, N_{\text{э}}}, \quad \nu \in [1 \dots N_{\text{э}}],$$

где  $n$  — число элементов ГТД, определяющих надежность и ресурс.

В данном способе не учитывается значимость элементов в плане обеспечения надежности и ресурса двигателя.

Способ 2, в отличие от способа 1, учитывает значимость элементов двигателя по последствиям отказов через коэффициенты значимости  $K_i$ :

$$[R(\tau_{\text{э}}), \tau_{\text{э}}]_{\nu} \sim \max_k \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i \Pi_{\text{э}ik}[P_0, R(\tau_{\text{э}}), \tau_{\text{э}}];$$

$$k = \overline{1, N_{\text{э}}}; \quad \nu \in [1 \dots N_{\text{э}}]. \quad (8)$$



Таблица  
Сравнительная эффективность различных способов моделирования эксплуатации  
( $\overline{\delta\Pi}^* = 0,001$ )

Показатели эффективности	Способы моделирования эксплуатации								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\tau_{и}, Ч \dots \dots \dots$	3272	3396	2857	4168	4002	4736	4090	3673	3003
Пр, млн руб. ....	16,48	16,51	16,49	16,49	16,38	16,44	-30,67	-30,16	16,63

Способ 3 основан на выборе для каждого элемента ГТД максимальной повреждаемости  $\Pi_{\Sigma ij \nu_i}$  из всех возможных эксплуатационных повреждаемостей:

$$[R(\tau_{\Sigma}, \tau_{\Sigma})]_{\nu_i} \sim \max_k \Pi_{\Sigma ik} [P_0, R(\tau_{\Sigma}, \tau_{\Sigma})]; \quad (9)$$

$$k = \overline{1, N_{\Sigma}}, \quad \nu \in [1 \dots N_{\Sigma}].$$

Данный способ обеспечивает гарантированную проверку надежности всех элементов в испытаниях, причем для ряда элементов оценка надежности будет проводиться «в запас».

Способ 4 предполагает формирование программы испытаний с сохранением структуры видов нагружения и условия (9).

Способ 5 предполагает формирование программы испытаний из условия минимизации «невязки» между повреждаемостью в испытаниях и повреждаемостями в эксплуатации, общее количество которых составляет  $N_{\Sigma}$ . Очевидно, что в данном случае поиск оптимального решения существенно усложняется.

Способ 6 предполагает, что в испытаниях сохраняется структура нагружения двигателя, соответствующая реальной эксплуатации двигателя.

Суммарная повреждаемость, накопленная в испытаниях элементом двигателя, определяется по формуле

$$\sum_{k=1}^{N_{\Sigma}} \int_0^{\tau_{ик}} R_{ик}(\tau_k) d\tau_k = \sum_{k=1}^{N_{\Sigma}} \int_0^{\tau_{ик}} R_{ик}(\tau_k) d\tau_k. \quad (10)$$

Способ 7, в отличие от способа 1, предполагает расчет повреждаемости по априорно заданному максимально нагруженному варианту применения двигателя в эксплуатации:

$$[R(\tau_{\Sigma}, \tau_{\Sigma})]_{\nu} \sim \max_{\xi} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Pi_{\Sigma i \xi} [P_0, R(\tau_{\Sigma}, \tau_{\Sigma})]; \quad (11)$$

$$\xi = \overline{1, N_{\text{вар}}}; \quad \nu \in [1 \dots N_{\text{вар}}],$$

где  $N_{\text{вар}}$  — количество вариантов применения двигателя в эксплуатации.

Способ 8 ориентирован на среднюю по вариантам повреждаемость элементов двигателя в эксплуатации:

$$[R_{\Sigma}(\tau_{\Sigma}, \tau_{\Sigma})]_{i \nu} \sim \frac{1}{N_{\text{вар}}} \sum_{\xi=1}^{N_{\text{вар}}} \Pi_{\Sigma i \xi} [P_0, R_{\Sigma}(\tau_{\Sigma}, \tau_{\Sigma})]_{i \nu};$$

$$\nu \in [1 \dots N_{\text{вар}}]. \quad (12)$$

Данный способ более объективно по сравнению со способом 7 отражает процесс реальной эксплуатации.

Способ 9 учитывает вероятность эксплуатации двигателей в каждом из  $N_{\text{вар}}$  вариантов применения:

$$[R(\tau_{\Sigma}, \tau_{\Sigma})]_{\nu} \sim \sum_{\xi=1}^{N_{\text{вар}}} P_{\xi} \Pi_{\Sigma i \xi} [P_0, R(\tau_{\Sigma}, \tau_{\Sigma})]_{\nu}; \quad (13)$$

$$\nu \in [1 \dots N_{\text{вар}}],$$

где  $P_{\xi}$  — вероятность эксплуатации двигателя в  $\xi$ -м варианте.

Сравнение эффективности рассмотренных способов моделирования эксплуатации при оптимизации ускоренных испытаний проводилось на примере ГТД, для которого основными являются следующие элементы:

- рабочая лопатка 1-й ступени турбины;
- радиально-упорный подшипник ротора;
- ведущая шестерня редуктора;
- подшипник вентилятора;
- обмотки генератора переменного тока.

Параметры испытаний оптимизировались по целевой функции (6) при условии  $\overline{\delta\Pi}^* = 0,001$ .

Партия двигателей эксплуатировалась по фиксированному ресурсу, рассеяние параметров вектора начального состояния не учитывалось ( $P_0 = \text{idem}$ ).

Сравнение эффективности проводилось по средней «невязке» повреждаемостей  $\overline{\delta\Pi}$ , коэффициенту ускорения  $K_y$  и прибыли Пр от эксплуатации партии ГТД.

Результаты сравнения, приведенные в таблице, показывают, что при  $\overline{\delta\Pi}^* = 0,001$  наименьшую длительность испытаний обеспечивает способ 3. По показателю прибыли способы 1–6, 9 примерно равнозначны (различие составляет  $\text{Пр} \approx 5,5\%$ ), а при моделировании способами 7 и 8  $\text{Пр} \ll 0$  ввиду отказа двигателя в испытаниях и необоснованной браковки партии ГТД.

Таким образом, 3-й способ моделирования эксплуатации как наиболее эффективный может быть рекомендован для практического применения.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gishvarov A., Kondratieva N. Technical and economic assessment of aircraft engines fatigue testing on base of simulation modeling // AIAA Paper 2001-3817. July 2001.
2. Гишваров А. С. Оптимизация ускоренных испытаний на надежность и ресурс авиационных двигателей и агрегатов // Вестник УГАТУ. 2001. № 1. С. 77–90.
3. Гишваров А. С., Кондратьева Н. В., Жернаков В. С. Оптимизация ресурсных испытаний силовой установки с применением имитационного моделирования жизненного цикла // Технологические проблемы развития машиностроения в Башкортостане: Сб. тр. Уфа: Гилем, 2001. С. 136–147.

## ОБ АВТОРЕ



Кондратьева Наталья Владимировна, аспирантка каф. авиационных двигателей УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УГАТУ, 1998). Готовит диссертацию в области испытаний, надежности и эффективности технических систем.

УДК 629.7.036

И. В. ПРИБ

## ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматриваются проблемы параметрической диагностики технического состояния двигателей летательных аппаратов с применением математических моделей рабочих процессов. Основное внимание уделено повышению достоверности оценки состояния в условиях неопределенности, возникающей вследствие ограниченности исходной информации. Приведены результаты сравнительного анализа эффективности существующих методов диагностики. *Диагностика технического состояния; математическая модель рабочих процессов; идентификация; оптимизация; неустановившиеся режимы работы*

Оценка технического состояния (ТС) двигателей в условиях эксплуатации проводится, как правило, по ограниченному объему информации, обусловленному малым количеством штатных контролируемых параметров. Это существенно ограничивает эффективность параметрических методов диагностики, основанных на идентификации термогазодинамических моделей двигателей [1]. Поэтому актуальным является проведение исследований по повышению эффективности данных методов диагностики.

В настоящее время известны несколько методов [1, 2], условно разделенных на методы А, Б, В, Г и Д.

**1. Метод диагностических матриц (метод А),** в котором матрицы отражают связь параметров состояния двигателя (КПД компрессора и турбины, площади характерных проходных сечений, коэффициенты потерь давления и т. п.) с признаками состояния (расход топлива, температура газов и т. д.) [4]:

$$[C] = [A]^{-1} * [B],$$

где  $[C]$  — диагностическая матрица;  $[A]$  — матрица коэффициентов влияния параметров на признаки состояния, оцениваемых по математической модели двигателя;  $[B]$  — матрица коэффициентов признаков состояния.

Оценка состояния двигателя в виде отклонений параметров  $\delta x_i$  от бездефектных значений проводится по формуле

$$\delta x_i = \sum_{j=1}^m c_{ij} \delta b_j; \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $\delta b_j$  — отклонение  $j$ -го контролируемого параметра;  $c_{ij}$  — коэффициент диагностической матрицы.

**2. Идентификация состояния решением системы нормальных уравнений (метод Б).** Оценка состояния двигателя проводится идентификацией его математической модели по целевой функции [1]

$$\Phi = \min \sum_{j=1}^m B_j \frac{1}{p_j^3(X)} [p_j^p(X) - p_j^3(X)]^2, \quad (2)$$

где  $B_j$  — коэффициент, учитывающий точность контроля  $P_j$  ( $B_j = T/\sigma$ ;  $T$  — константа;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра  $p_j^3$ );  $p_j^p$  — значение  $j$ -го параметра, рассчитанное по модели;  $p_j^3$  — значение  $j$ -го контролируемого параметра;  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  — вектор параметров состояния;  $m$  — число контролируемых параметров.

Идентификация проводится решением системы  $n$  нормальных уравнений