

УДК 629.7.036:539.4

**А.В. ОЛЕЙНИК¹, Д.Ф. СИМБИРСКИЙ¹, С.В. ЕПИФАНОВ¹,
Н.А. ШИМАНОВСКАЯ¹, А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ², В.В. ГРИЩЕНКО²**

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

²ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

КОНЦЕПЦИЯ И ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ВЫРАБОТКИ РЕСУРСОВ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Приводятся основные результаты совершенствования концепции мониторинга выработки ресурсов основных деталей газотурбинного двигателя. Рассмотрена используемая в ряде программных комплексов «Ресурс» Концепция мониторинга выработки ресурсов авиационных двигателей. Выявлены основные ее недостатки и сформулирован ряд дополнительных положений к общепринятой Концепции, а также приведены исследования особенностей их практической реализации. Показано, что при использовании расширенной Концепции погрешность мониторинга выработки ресурсов основных деталей двигателей может быть уменьшена с 45-50% до 10%.

Ключевые слова: авиационный двигатель, ресурс, мониторинг.

Введение

В настоящее время в Украине и России значения всех видов ресурсов авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) определяются следующей нормативной документацией: техническим заданием (ТЗ) на разработку двигателя, стратегией управления их ресурсами (СУР) и Положением ФГУП ЦИАМ им. П.И.Баранова по установлению и увеличению ресурсов и сроков службы АГТД.

В ТЗ обязательно указывается набор типовых полетных циклов (ТПЦ), каждый из которых со своим коэффициентом использования входит в обобщенный полетный цикл (ОПЦ) двигателя, вид СУР и соответствующие им величины следующих ресурсов в часах ОПЦ и их количестве, а именно:

1) полный (проектный) назначенный ресурс (НР) двигателя;

2) то же для основных деталей (ОД) двигателя;

3) ресурсы ОД или двигателя в целом до первого капитального ремонта и межремонтный.

В положении указывается, что для обеспечения полноты выработки ресурсов основных деталей, модулей и двигателя в целом в эксплуатации и при ресурсных испытаниях, как правило, должны использоваться автоматизированные средства подсчета выработки ресурса (счетчики, накопители информации) по эквивалентной повреждаемости деталей и др.

В связи с указанным выше АГТД оснащаются оперативными бортовыми или наземными автоматизированными системами мониторинга выработки

ресурсов (МВР) контролируемых деталей (КД) двигателя – критичных с позиций общей надежности и безопасности эксплуатации. Наиболее перспективными являются цифровые системы МВР, реализующие принцип эквивалентной повреждаемости, основанные на мониторинге температурного и напряженного состояний (ТС и НС) КД. Последний заключается в непрерывных расчетах этих состояний на всех без исключения установившихся и переходных режимах работы двигателя по значениям штатно регистрируемых его параметров. Наиболее известны системы МВР этого типа фирм Пратт-Уитни, Дженерал Электрик, НПО «Труд» и АО «Пермские моторы» (Россия), Национального авиационного университета (Киев) и другие. Аналогичные системы МВР создаются также для конвертируемых ГТД и ГТУ, используемых в наземных газотранспортных и энергетических установках, в автоматизированных системах учета выработки ресурса материала ответственных деталей АЭС и в ряде других случаев.

В последнее десятилетие появились совместные разработки НАКУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» (Харьков) и ГП «Ивченко-Прогресс» (Запорожье) [1 – 3]. Инициаторами которых были генеральный конструктор, доктор технических наук, академик НАН Украины Ф.М. Муравченко и его первый заместитель кандидат технических наук В.И. Колесников.

1. Концепция разработки известных систем МВР

В известных системах МВР ГТД реализуется ряд общепринятых концептуальных положений, а именно:

1.1. Системы МВР обычно создаются в составе автоматизированная система диагностики технического состояния двигателя, в которых выполняется первичная обработка и хранение значений штатно регистрируемых параметров.

1.2. НР КД и их выработка устанавливаются в часах ОПЦ двигателя, исходя, как правило, из заданного уровня прочностной надежности деталей по критериям длительной прочности (ДП) и малоциклового усталости (МЦУ).

1.3. В основу МВР КД положено сравнение их повреждений по ДП и МЦУ в произвольных i -х эксплуатационных циклах ПЦ _{i} с задаваемыми значениями повреждений в ОПЦ.

По результатам мониторинга ТС и НС в каждом i -том ПЦ _{i} для каждой КД рассчитываются суммарные за цикл повреждения Π_{Ni} по циклическим (МЦУ) и Π_{ti} по ДП, которые являются основными повреждающими факторами, определяющими ресурс КД и рассчитываемые в течение всего ПЦ _{i} соответственно по следующим формулам:

$$\Pi_{Ni} = \sum_{j=1}^k \frac{N_j}{N_{pj}}; \quad (1)$$

$$\Pi_{ti} = \sum_{l=1}^m \frac{t_l}{t_{pl}}, \quad (2)$$

где N_j и N_{pj} – количество реальных k -х циклов и подциклов ПЦ _{i} и их количество до разрушения соответственно; t_l и t_{pl} – продолжительность реальных установившихся режимов ПЦ _{i} и время до разрушения на этих режимах соответственно; k и m – количество циклов и установившихся режимов в ПЦ _{i} соответственно.

В соответствии с общепринятой отраслевой методикой эти значения повреждений используются для определения коэффициентов соответствия

$$\eta_{i\text{МЦУ}} = \frac{\Pi_{Ni}}{\Pi_{\text{НОПЦ}}} \quad \text{и} \quad \eta_{i\text{ДП}} = \frac{\Pi_{ti}}{\Pi_{t\text{ОПЦ}}}$$

i -го эксплуатационного цикла сравнительно с ОПЦ. Деталю были установлены НР в ОПЦ по МЦУ и в часах ОПЦ по ДП.

Тогда последовательно от цикла к циклу рассчитывая $\eta_{i\text{МЦУ}}$ и $\eta_{i\text{ДП}}$ для каждой КД можно вести накопительный учет ($i=1, 2, 3, \dots$) выработки их НР по МЦУ и ДП.

Так, после n ПЦ ($i=n$) выработанное количество ОПЦ $N_{\text{ВЫР МЦУ}}$ равно

$$N_{\text{ВЫР МЦУ}} = \sum_{i=1}^n \eta_{i\text{МЦУ}}, \quad (3)$$

а выработанный ресурс $t_{\text{ВЫР ДП}}$ по ДП

$$t_{\text{ВЫР ДП}} = \sum_{i=1}^n \eta_{i\text{ДП}} \cdot t_{\text{ОПЦ}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{ОПЦ}}$ – длительность ОПЦ.

1.4. При оценках повреждений в системах МВР используются те же модели долговечности материалов, что и при ресурсном проектировании и установлении ресурсов деталей.

1.5. Повреждения деталей рассчитываются по результатам автоматизированного мониторинга их ТС и НС, который заключается в последовательном использовании быстросчетных (мониторинговых) моделей проточной части двигателя, теплообмена на поверхностях КД и, в завершении, их ТС и НС.

1.6. Мониторинговые модели создаются на основе соответствующих моделей верхнего уровня. Они должны расходовать минимальные вычислительные ресурсы и, одновременно, обладать высокой точностью моделирования регистрируемых процессов.

2. Актуальные проблемы разработки систем МВР

Опыт эксплуатации известных систем МВР, а также результаты, полученные на кафедре конструкции авиадвигателей ХАИ в процессе исследований и практической реализации алгоритмов МВР ГТД [5-7], выявили ряд нерешенных проблем, которые, по нашему мнению, существенно снижали эффективность практического использования последних. Основной из них является недостаточная точность мониторинговых моделей ТС и НС деталей. Объективной причиной этого является то обстоятельство, что с одной стороны, эти модели должны быть достаточно простыми, чтобы работать в реальном времени, а, с другой стороны – сохранять достаточно высокую точность, которая характерна для имеющихся у Разработчика двигателя моделей высокого уровня – соответствующих алгоритмов и пакетов программ. Так, погрешности используемых в известных системах МВР упрощенных мониторинговых моделей ТС и НС могут достигать 15-30%. Причинами такого высокого уровня погрешностей, в основном, являются неучет ряда существенных факторов: температурных градиентов и вызываемых ими температурных напряжений в КД на переходных режимах, влияния температурного поля КД на теплофизические и упругие свойства их материалов, механических и температурных условий работы КД в поузловых сборках, геометрических нестационарностей и вызываемых ими нелинейностей моделей и др. Указанные порядки погрешностей ТС и НС КД могут, в свою очередь приводить к погрешностям в оценках выработанного ресурса КД по длительной прочности в 10-15 раз, а по малоциклового усталости – в десятки раз (при определении относительных повреждаемостей в конкретных реальных циклах) [5].

Кроме того, отсутствовала методология получения оценок точности мониторинга ТС и НС КД и зависящей от нее точности МВР двигателя в целом. С другой стороны, не была решена обратная задача – определения необходимой точности мониторинга ТС и НС, исходя из требуемой точности МВР двигателя.

Поэтому представлялось необходимым развить приведенную выше общепринятую Концепцию, уделив основное внимание решению проблемы повышения точности мониторинговых моделей ТС и НС КД.

В связи с этим был сформулирован ряд дополнительных положений к общепринятой Концепции, а также приведены исследования особенностей их практической реализации.

3. Направления и достигнутые результаты совершенствования Концепции

3.1. Перед началом разработки системы МВР, исходя из требований ее точности, должны быть выполнены оценки необходимой точности мониторинга ТС и НС детали. Исходная точность МВР устанавливается из условий полной и безопасной реализации потенциальных возможностей по ресурсу каждого индивидуального двигателя данного типа.

Результаты разработки соответствующих методик таких оценок и их практического использования при разработке систем МВР для ряда двигателей ГП «Ивченко-Прогресс» позволили сделать принципиально важный вывод о необходимости выполнения мониторинга ТС и НС в системах МВР деталей с максимально возможной точностью [5-7].

3.2. Для достижения максимально возможной точности мониторинга ТС и НС необходимо:

3.2.1. Разработку мониторинговых моделей предварять тщательными количественными исследованиями на моделях высокого уровня вкладов различных факторов температурного и механического нагружения в ТС и НС деталей, а также возможностей их суперпозиции.

3.2.2. Особое внимание должно уделяться рассмотрению условий, которые приводят модели высокого уровня к нелинейному или нестационарному виду, а также работе детали в конструкторской сборке (узле) двигателя.

3.2.3. Для мониторинговых моделей ТС и НС КД целесообразно привлечь разработанные в общей теории динамических систем методы структурно-параметрической идентификации моделей сложных технических объектов.

В работе [8] показано, что структурную идентификацию мониторинговых моделей ТС и НС КД на установившихся и переходных режимах работы двигателя целесообразно осуществлять путем аппроксимации исходных уравнений нестационарной

теплопроводности и термоупругости уравнениями динамики КД в пространстве их состояний. Предложен метод, благодаря которому идентификация ТС и НС в области критической точки детали преобразуется из операций с высокоуровневыми конечно-элементными моделями большой размерности в операции с небольшим количеством статических и динамических характеристик таких моделей.

3.3. Разработка комплекса мониторинговых моделей ТС и НС должна сопровождаться и завершаться оценками погрешностей конечных результатов мониторинга.

Для этих целей предложен метод, основанный на рассмотрении процесса идентификации ТС и НС как случая косвенных измерений, для которого уравнением измерений является комплекс мониторинговых моделей проточной части двигателя, граничных условий теплообмена, ТС и НС КД.

3.4. Алгоритмы системы МВР должны включать четко структурированные модули, соответствующие основным мониторинговым моделям. Модульная структура обеспечивает возможность исследования и анализа отдельных составляющих погрешности алгоритма. Такая структура необходима также для внесения изменений в алгоритмы по мере уточнения ОПЦ, увеличения назначенных ресурсов, развития методических основ контроля выработки ресурса и проектирования АД.

3.5. В алгоритмах МВР необходимо предусмотреть перспективы учета механизмов трещинообразования и контроля за ростом трещин, а также расширения номенклатуры повреждающих факторов и учета их совместного влияния на прочностную надежность КД. При этом очевидным условием реализации такой перспективы является первоначальное решение упомянутых вопросов на этапе ресурсного проектирования двигателей.

4. Опыт и результаты практической реализации предложенных систем МВР КД

4.1. Основные положения дополненной Концепции были реализованы в ряде программных комплексах (ПК) «Ресурс». В частности, это ПК «Ресурс-336» для газотурбинного привода газоперекачивающего агрегата на основе турбовального двигателя Д-336; ПК «Ресурс-18Т», предназначенного для мониторинга выработки и прогнозирования остатка НР двухконтурного ТРД Д-18Т самолета АН-124 («Руслан») и ПК «Ресурс-436» для двухконтурного АГТД Д-436Т1 самолета Ту-334-100 [4,6,7].

ПК может применяться в двух модификациях: для работы на борту в темпе реального времени и для наземной обработки полетной информации.

4.1.1. В состав КД обычно включались: лопатка вентилятора, диски компрессоров среднего и высокого давлений, диски турбин высокого давления и вентилятора, а также отдельные валы. Исходными данными для расчетов служили значения штатно регистрируемых параметров и сигналов двигателя.

ПК после каждого своего включения и выполнения цикла вычислений выдает следующую текущую информацию: накопленные повреждения КД по ДП и МЦУ, выработанный ресурс и остаток назначенного ресурса (в часах и количестве ОПЦ), а также любую информацию, имеющуюся в его базе данных.

4.1.2. Основой для разработки ПК послужил цикл специальных исследований особенностей ТС и НС каждой КД, выполненный на соответствующих моделях верхнего уровня.

Проведенный анализ показал необходимость при мониторинге ТС и НС рассматривать КД в составе соответствующих узлов (за исключением лопатки вентилятора). Это обстоятельство существенно усложняет мониторинговые модели ТС и НС КД.

4.2. При мониторинге НС КД на установившихся режимах вычисляются:

- компоненты тензора напряжений (далее напряжения) в критической точке КД от действия факторов механического нагружения;
- напряжения от действия факторов температурного нагружения;
- суммарные напряжения (с учетом концентрации напряжений);
- эквивалентное упругое напряжение;
- эквивалентное упругопластическое напряжение.

4.3. Большое внимание уделено алгоритмам мониторинга температурных напряжений в КД.

4.4. Был предложен комплекс оригинальных алгоритмов мониторинга ТС на установившихся режимах:

- а) температур t в критических точках контролируемых деталей;
- б) характерных температур для учета зависимости коэффициента теплопроводности материала $\lambda(t)$ от температуры;
- в) эквивалентных температур t_e для учета зависимости модуля упругости материала $E(t)$ от температуры при расчетах напряжений от факторов механического нагружения;

4.5. При мониторинге ТС и НС на переходных режимах были существенно развиты предложенные ранее алгоритмы [1,4] путем использования методов теории пространства состояний [6-8].

Была предложена методика [6,7] оценки погрешностей МВР, в которой основное внимание

уделялось отличию результатов ПК от результатов аналогичных расчетов по моделям верхнего уровня. Они зависят от погрешностей мониторинга ТС и НС. В качестве предельных значений были установлены следующие:

- ТС на установившихся режимах: 0,2...0,4%;
- ТС на переходных режимах: менее 2%;
- НС на установившихся режимах: менее 1%;
- НС на неустойчивых режимах: менее 2%.

Для оценок погрешностей МВР применялась методика [6, 7] на базе приведенных выше значений предельных погрешностей мониторинга ТС и НС.

Кроме того, использовались результаты оценок для типовых КД авиационного ГТД, полученные в [4] при аналогичных условиях. В частности, был выполнен детальный количественный учет всех систематических и случайных составляющих погрешностей МВР применительно к диску и рабочей лопатки ТВД двигателя.

В целом, в качестве приближенных общих оценок ПК «Ресурс» принято, что они не превышают 7-8% по МЦУ и 5% по ДП. В то же время, в работе [4,7] было показано, что при использовании общепринятых методов мониторинга ТС и НС КД указанные погрешности могут достигать 45-50%.

Заключение

Таким образом, выше предложены дополнения к общепринятой Концепции разработки систем МВР авиационных ГТД, в которой основное внимание уделено решению проблемы повышения точности мониторинга ТС и НС контролируемых деталей.

Приведены основные результаты реализации предложенной Концепции при разработке алгоритмов систем МВР газотурбинных двигателей ГП «Ивченко-Прогресс».

Литература

1. Система учета выработки ресурса турбовального привода газоперекачивающего агрегата / Д.Ф. Симбирский, А.В. Олейник, В.А. Филяев, С.В. Епифанов, Ф.М. Муравченко, А.В. Шереметьев, В.И. Колесников // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.* – Х.: ХАИ, 1998. – Вып. 5. – С. 343-347.
2. Комплекс программно-методических средств для учета выработки ресурса авиационного ГТД в системах диагностической обработки информации / Д.Ф. Симбирский, А.В. Олейник, В.А. Филяев, Ф.М. Муравченко, В.И. Колесников, А.В. Шереметьев, В.В. Грищенко // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.* – Х.: ХАИ, 2002. – Вып. 26. – С. 163-166.
3. Комплекс программно-методических средств для эксплуатационного мониторинга выработки

ресурса основных деталей авиационного двигателя Д-18Т / Д.Ф. Симбирский, А.В. Олейник, В.А. Филяев, В.И. Колесников, А.В. Шереметьев, В.В. Грищенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – № 7. – С. 96-101.

4. Филяев В.А. Мониторинг температурного и напряженного состояний деталей авиационных ГТД в системах учета выработки их ресурса: Дис... канд. техн. наук: 05.07.05 / В.А. Филяев. – Х., 2002. – 193 с.

5. Симбирский Д.Ф. Требования к точности мониторинга температурного и напряженного состояния детали ГТД в системах учета выработки их ресурса / Д.Ф. Симбирский, В.А. Филяев, А.В. Шереметьев // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць. Держ. аерокосм. ун-та. – Х.: ХАІ, 2002. – Вип. 34. – С. 130-132.*

6. Олейник А.В. Концепция и методы мониторинга выработки ресурса авиационных ГТД на основе идентификации динамики температурного и напряженного состояния основных деталей: Дис. ... докт. техн. наук: 05.07.05 / А.В. Олейник. – Х., 2006. – 241 с.

7. Шимановская Н.А. Формирование моделей температурного и напряженного состояния деталей для систем мониторинга выработки ресурсов двигателей многорежимных самолетов: Дис. ...канд. техн. наук: 05.05.03 / Н.А. Шимановская. – Х., 2008. – 238 с.

8. Олейник А.В. Эксплуатационный мониторинг температурного состояния детали газотурбинного двигателя как задача динамики конечно-элементной модели в пространстве состояния / А.В. Олейник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – №4/12. – С. 38-42.

Поступила в редакцию 2.06.2010

Рецензент: д-р тех. наук, проф. В.Н. Доценко, Национальный Аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

КОНЦЕПЦІЯ І ДОСВІД РОЗРОБКИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ВИРОБІТКУ РЕСУРСІВ АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

О.В. Олійник, Д.Ф. Симбірський, С.В. Єпіфанов, Н.А. Шимановська, О.В. Шеремет'єв, В.В. Грищенко

Наводяться основні результати вдосконалення концепції моніторингу виробітку ресурсів основних деталей газотурбінного двигуна. Розглянута використовувана у ряді програмних комплексів "Ресурс" Концепція моніторингу виробітку ресурсів авіаційних двигунів. Виявлені основні її недоліки і сформульований ряд додаткових положень до загальноприйнятої Концепції, а також приведені дослідження особливостей їх практичної реалізації. Показано, що при використанні розширеної Концепції погрішність моніторингу виробітку ресурсів основних деталей двигунів може бути зменшена з 45-50% до 10%.

Ключові слова: авіаційний двигун, ресурс, моніторинг.

CONCEPTION AND EXPERIENCE OF LIFETIME MONITORING SYSTEMS DEVELOPMENT OF AVIATION TURBO-ENGINES

A.V. Oleynik, D.F. Simbirskiy, S.V. Epifanov, N.A. Shimanovskaya, A.V. Sheremetev, V.V. Grishchenko

Basic results over of perfection of lifetime monitoring conception of turbo-engine basic details are brought. The used is considered in a number of programmatic complexes "Resource" Conception of aviation engines lifetime monitoring. Its basic defects are educed and the row of additional positions is formulated to the generally accepted Conception, and also researches over of features of their practical realization are brought. It is shown that at the use of the extended Conception the error of lifetime monitoring of engines basic details can be diminished with 45-50% to 10%.

Key words: aviation engine, lifetime, monitoring.

Олейник Алексей Васильевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Симбирский Дмитрий Федорович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Епифанов Сергей Валериевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Шимановская Наталья Анатольевна – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Шереметьев Александр Викторович – канд. техн. наук, начальник отдела прочности ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Грищенко Вадим Валерьевич – ведущий конструктор отдела прочности ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.