

УДК 629.7.036:539.4

**А.В. ОЛЕЙНИК<sup>1</sup>, Д.Ф. СИМБИРСКИЙ<sup>1</sup>, А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», Украина*

<sup>2</sup>*ГП «Ивченко-Прогресс», Украина*

## **КОНЦЕПЦИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ВЫРАБОТКИ РЕСУРСОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД**

Предложена Концепция разработки систем эксплуатационного мониторинга выработки ресурса авиационных ГТД, которая исходит из необходимости достижения максимальной точности мониторинга температурного и напряженного состояний контролируемых деталей. Приведены сведения о ее реализации для двухконтурных ГТД ГП "Ивченко - Прогресс".

**ресурс, мониторинг, контролируемая деталь, математическая модель, идентификация, температурное и напряженное состояние**

### **Введение**

В настоящее время авиационные ГТД оснащаются оперативными бортовыми или наземными цифровыми автоматизированными системами мониторинга выработки ресурсов (МВР) контролируемых деталей (КД) двигателя – критичных с позиций общей безопасности полетов. Наиболее перспективными являются системы МВР, основанные на мониторинге температурного и напряженного состояний (ТС и НС) КД. Последний заключается в непрерывных расчетах этих состояний на всех произвольных 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, а также совместные разработки Национального аэрокосмического университета «ХАИ» им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» (Харьков) и ГП «Ивченко-Прогресс» (Запорожье) [1 – 3]. Аналогичные системы МВР создаются также для 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.

### **1. Концепция разработки систем МВР ГТД**

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. Назначенные ресурсы деталей и их выработка устанавливаются в часах обобщенного полетного цикла (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 повреждаемостей по ДП и МЦУ в *i*-х полетных циклах ПЦі с задаваемыми значениями повреждаемостей в ОПЦ.

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

1.5. Повреждаемости 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 описания модели 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 [3-6], выявили ряд нерешенных проблем, которые, по нашему мнению, существенно снижают 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% [4 – 6]. 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 оче-

редь приводить к погрешностям в оценках выработанного ресурса КД по длительной прочности в 10 –15 раз, а по малоцикловой усталости – в десятки раз (при определении относительных повреждаемостей в конкретных реальных циклах) [7].

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

Поэтому представляется необходимым развить Концепцию, уделив основное внимание решению проблемы повышения точности мониторинговых моделей ТС и НС КД.

В связи с этим нами был сформулирован ряд дополнительных положений, а также приведены основные результаты, получаемые при их 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 [4 – 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 механиче-

ского 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. Практическая реализация дополненной Концепции**

4.1. Основные положения дополненной Концепции были реализованы в программном комплексе (ПК) «Ресурс-18Т» [3], предназначенного для мониторинга выработки и прогнозирования остатка назначенного ресурса двухконтурного ТРД Д-18Т по штатно регистрируемым параметрам в процессе его эксплуатации на самолете АН-124 («Руслан»). Кроме того, ПК использовался для экспресс-расчетов выработки ресурсов КД при различных предполагаемых вариантах полетных циклов, времен года и условий эксплуатации двигателя.

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 были включены: лопатка вентилятора, диски компрессоров среднего и высокого давлений, диски турбин высокого давления и вентилятора, а также отдельные валы. Исходными данными для расчетов служат 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 базе данных ПК.

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 усложнило поставленные задачи по сравнению с аналогичными, рассмотренными в работах [1, 2].

4.2. В основу алгоритмов мониторинга НС положены принципы:

- суперпозиции упругих напряжений, создаваемых разными факторами в одинаковых полях температур;
- пропорциональности напряжений и параметров нагружения в постоянном поле температур;
- подобия температурных полей на различных режимах;
- подобия перераспределения напряжений из-за зависимости модуля упругости  $E(t)$  от температуры в условиях подобия полей температур.

4.2.1. 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 (температурные напряжения);
- суммарные напряжения (с учетом концентрации напряжений);
- эквивалентное упругое напряжение;
- эквивалентное упругопластическое напряжение.

4.2.2. Большое внимание было уделено алгоритмам мониторинга температурных напряжений в КД, которые были выражены через некоторое безразмерное напряжение  $\dot{S}$ , являющееся функциями предложенных режимных параметров. Для КД со

значительной долей температурных напряжений (диски, валы и др.) был реализован алгоритм мониторинга, погрешность которого не превышала 1% (0,6 МПа в наших расчетах) во всем диапазоне режимов двигателя. Его разработка заключалась в проведении для каждой компоненты тензора температурных напряжений структурной идентификации алгоритма (определении наилучшего набора из трех режимных параметров) и последующей его параметрической идентификации (определении коэффициентов полиномиальных аппроксимаций режимных параметров).

4.2.3. Задачами мониторинга ТС на установившихся режимах деталей являлись вычисления:

- а) температур  $t$  в критических точках контролируемых деталей;
- б) характерных температур для учета зависимости коэффициента теплопроводности  $\lambda(t)$  от температуры;
- в) эквивалентных температур  $t_e$  для учета зависимости модуля упругости  $E(t)$  от температуры при расчетах напряжений от факторов механического нагружения;
- г) некоторых эффективных температур  $t_1$  и  $t_2$  для учета температурной зависимости модуля упругости  $E(t)$  и коэффициента температурного расширения  $\alpha(t)$  при расчетах температурных напряжений.

Был предложен комплекс оригинальных алгоритмов мониторинга ТС.

4.2.4. При мониторинге ТС и НС на переходных режимах были существенно развиты предложенные ранее алгоритмы [1,2] путем использования методов теории пространства состояний [8].

4.3. Оценка погрешностей МВР, под которыми понимаются отличия результатов ПК от результатов аналогичных расчетов по моделям верхнего уровня, предваряли оценки погрешностей мониторинга ТС и НС.

В качестве их предельных значений были установлены следующие:

- ТС на установившихся режимах: 0,2 ... 0,4%;

- ТС на неустановившихся режимах: менее 2,5%;
- НС на установившихся режимах: менее 1,5%;
- по НС на неустановившихся режимах: менее 3%.

Для оценок погрешностей МВР по МЦУ была применена методика [7] с использованием 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 для применительно диска и рабочей лопатки ТВД двигателя.

В целом, в качестве приближенных оценок погрешностей МВР с помощью ПК «Ресурс-18Т» было принято, что они не превышают 7 – 8% по МЦУ и 5% по ДП. В то же время, в работе [4] 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 и др. // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. 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 и др. // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. 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 и др. // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Х.: – 2003. – Вып. 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. – Х., 2002. – 193 с.

5. Крикунов Д.Ф. Математические модели для эксплуатационного мониторинга температурного состояния деталей ГТД в системах учета выработки ресурса. Дис... канд. техн. наук: 05.14.06 – Х., 2003. – 163 с.

6. Крикунов Д.В., Олейник А.В. Анализ эффективности методов решения задач мониторинга температурного состояния деталей ГТД // Авиационно-космическая техника та технологія. – Х.: ХАИ. – 2003. – Вып. 36/1. – С. 101 – 107.

7. Симбирский Д.Ф., Филяев В.А., Шереметьев А.В. Требования к точности мониторинга температурного и напряженного состояний деталей ГТД в системах учета выработки их ресурса // Авиационно-космическая техника і технологія. – Х.: ХАИ. – 2002. – Вып. 34. – С. 130 – 132.

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

*Поступила в редакцию 18.05.2005*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.