

УДК 629.7.036:539.4

Н.А. ШИМАНОВСКАЯ<sup>1</sup>, Д.Ф. СИМБИРСКИЙ<sup>1</sup>, И.Л. ГЛИКСОН<sup>2</sup>,  
С.И. ШАНЬКИН<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup>ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА  
ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ АИ-450-МС**

Приводятся основные результаты дальнейшего совершенствования алгоритмов мониторинга температурного и напряженного состояний основных деталей газотурбинного двигателя. Они реализованы в программном комплексе «Ресурс-АИ450МС», предназначенном для мониторинга выработки и прогнозирования остатка ресурса вспомогательного двигателя АИ-450-МС по штатно регистрируемым параметрам. Представлены основные этапы создания программного комплекса и рассмотрена его структура. Проведенные верификация и тестирование мониторинговых моделей позволяет сделать вывод о погрешности мониторинга выработки ресурса основных деталей менее 15%.

**Ключевые слова:** ресурс, мониторинг, контролируемая деталь, температурное и напряженное состояние.

**Введение**

В настоящее время ставятся задачи связанные с переходом на более прогрессивную стратегию эксплуатации с прогнозом надежности. Указанная проблема может быть решена только посредством разработки и внедрения новых эффективных средств диагностирования и прогнозирования технического состояния авиадвигателей.

Поэтому в состав ряда развитых автоматизированных систем диагностирования входит подсистема мониторинга (текущего подсчета) выработки назначенных ресурсов (МВР) набора контролируемых деталей (КД), реализующая принцип их эквивалентной повреждаемости в процессе эксплуатации [1].

В результате введения таких систем МВР более точно определяются моменты выработки назначенных ресурсов и устанавливаются межремонтные периоды, уменьшаются эксплуатационные расходы. Возрастает уверенность в работоспособности двигателя и повышается безопасность полета. МВР особо важен, если двигатели используются в различных географических регионах, с различными целями и, следовательно, с различными интенсивностями выработки своих ресурсов.

**Структура ПК «Ресурс-450МС»**

Рассмотрим основные этапы создания системы МВР, реализуемая в виде программного комплекса (ПК) «Ресурс-АИ450МС» для вспомогательного двигателя АИ-450-МС самолета Ан-148.

Данный ПК предназначен для:

- обеспечения специалистов по эксплуатации и установлению ресурса двигателей системой мониторинга выработки и прогнозирования оставшегося ресурса контролируемых деталей двигателя;
- выполнения экспресс-расчетов выработки ресурсов КД для различных предполагаемых вариантов его полетных циклов и условий эксплуатации.

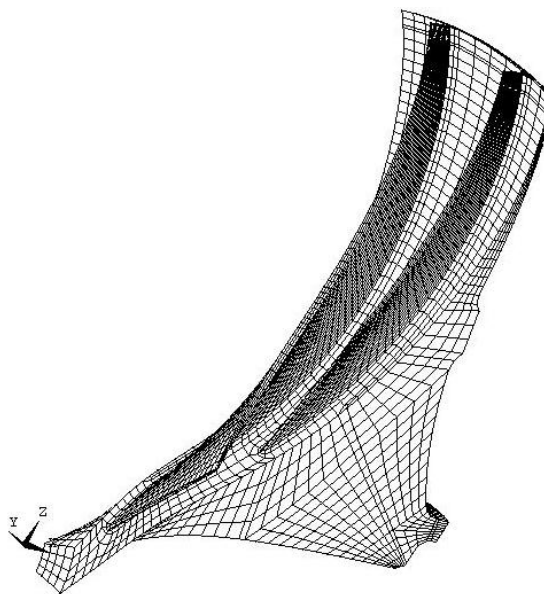


Рис. 1. Циклосимметричная модель служебного компрессора двигателя АИ-450-МС

Основополагающим этапом создания системы МВР является выбор контролируемых деталей и их критических точек. К контролируемым относятся

такие детали, разрушение которых ведет к неотвратимым последствиям: диски ЦБК газогенератора и служебного компрессора, корпус камеры сгорания, диски турбины газогенератора и свободной турбины, а также вал свободной турбины. Для каждой КД создавалась конечно-элементная модель для расчета температурного и напряженного состояний. Совместные исследования НАКУ «ХАИ» и ОАО «Мотор Сич» температурного и напряженного состояний (ТС и НС) КД с помощью конечно-элементным моделям позволили создать мониторинговые модели ТС и НС повышенной точности. Пример такой модели для служебного компрессора двигателя АИ-450-МС представлен на рис. 1. Модель – цикло-симметричная, что дает возможность экономии машинного времени без потери точности расчета. С помощью CFD расчетов получены изменения температур среды и коэффициентов теплоотдачи по всем поверхностям детали, что необходимо для расчета ее ТС. В качестве граничных условий расчета НС были приложены центробежные нагрузки и действующие давления. Используя расчеты ТС и НС по моделям высокого уровня в качестве исходной информации, были созданы мониторинговые модели ТС и НС на установившихся и переходных режимах для каждой КД [3, 4].

По результатам тестирования были установлены следующие значения погрешностей мониторинговых моделей ТС и НС: относительно моделей высокого уровня менее 3 °С по температуре и 1% по НС.

Это, по приближенным оценкам, позволяет определять коэффициенты  $\eta_{N_i} = P_{N_i} / P_{N_{опц}}$  и  $\eta_{\tau_i} = P_{\tau_i} / P_{\tau_{опц}}$  соответствия текущего *i*-го полетного цикла (ПЦ) и обобщенного полетного цикла (ОПЦ) двигателя по критериям малоциклового усталости ( $\eta_{N_i}$ ) и длительной прочности ( $\eta_{\tau_i}$ ) с погрешностями в пределах до 6-15% (здесь  $P_{N_i}$ ,  $P_{N_{опц}}$  и  $P_{\tau_i}$ ,  $P_{\tau_{опц}}$  – повреждаемости по малоциклового усталости (МЦУ) и длительной прочности (ДП) соответственно в *i*-м ПЦ и ОПЦ) [2].

Так как при известных значениях  $P_{\tau_{опц}}$  и  $P_{N_{опц}}$  рассчитанных по заданному ОПЦ, выработки назначенных ресурсов детали  $\tau_{выр}$  и  $N_{выр}$  в часах и количестве ОПЦ определяются по формулам:

$$\tau_{выр} = \sum_{i=1}^n \eta_{\tau_i} \cdot \tau_{опц} ; \quad (1)$$

$$N_{выр} = \sum_{i=1}^n \eta_{N_i} , \quad (2)$$

где *n* – количество выполненных ПЦ;  $\tau_{опц}$  – длительность ОПЦ.

Указанные мониторинговые модели ТС и НС КД и алгоритмы расчета выработанных ресурсов вошли в состав ПК «Ресурс-АИ450МС».

Опираясь на вышеизложенное, рассмотрим более детально структуру ПК «Ресурс-АИ450МС» (рис. 2). В блоке 1 осуществляется инициализация параметров, необходимых для работы алгоритма (параметры базовых режимов, ТС и НС деталей на базовых режимах, свойства материалов и др.). Данные считываются из файла *resalg.ini*, который должен храниться в папке инсталляции программного комплекса «Ресурс-АИ450МС».

На основании поступивших в алгоритм параметров двигателя в блоке 2 выполняются расчеты параметров проточной части: температура на выходе из служебного компрессора  $T_{ск}$ , температура за компрессором газогенератора  $T_k$ , температура торможения перед рабочим колесом турбины компрессора  $T_{г\text{ рк }тк}^*$ , температура торможения перед рабочим колесом свободной турбины  $T_{г\text{ рк }ст}^*$ , затем передаваемые в блок 3. В блоке 3 осуществляется преобразование единиц измерений.

Расчет параметров температурного нагружения, ТС всех КД производится в блоках 4-6. При этом используются алгоритмы мониторинга ТС деталей на установившихся и неустановившихся режимах, описанные в [3].

В блоках 7-11 производится расчет параметров силового нагружения (учет влияния центробежных, газодинамических, газостатических нагрузок, а также взаимного влияния деталей узла) и расчет НС КД. Используемые алгоритмы мониторинга НС на установившихся и неустановившихся режимах описаны в [4].

Алгоритмы расчета температурного и напряженного состояний на переходных режимах носят унифицированный характер, что позволяет использовать один и тот же программный код для расчета ТС и НС любой детали.

В каждом из блоков 7-11 в случае превышения напряжений соответствующих пределов текучести производится учет упругопластичности с помощью гиперболы Нейбера.

Используется метод “дождя” для выделения полуциклов нагружения (блок 12), а также численный метод решения нелинейного уравнения Мэнсона и параметрическая зависимость Ларсена-Миллера для получения числа циклов и времени до разрушения по каждой КД (блок 13). В блоке 14 содержится информация о повреждениях по критериям ДП и МЦУ каждой КД за ОПЦ.

Расчет относительных повреждений или коэффициентов соответствия текущего *i*-го ПЦ и ОПЦ двигателя по критериям ДП и МЦУ производится в 15 блоке. Используя формулы (1)с (2) рассчитывается выработанный ресурс каждой КД (блок 16).

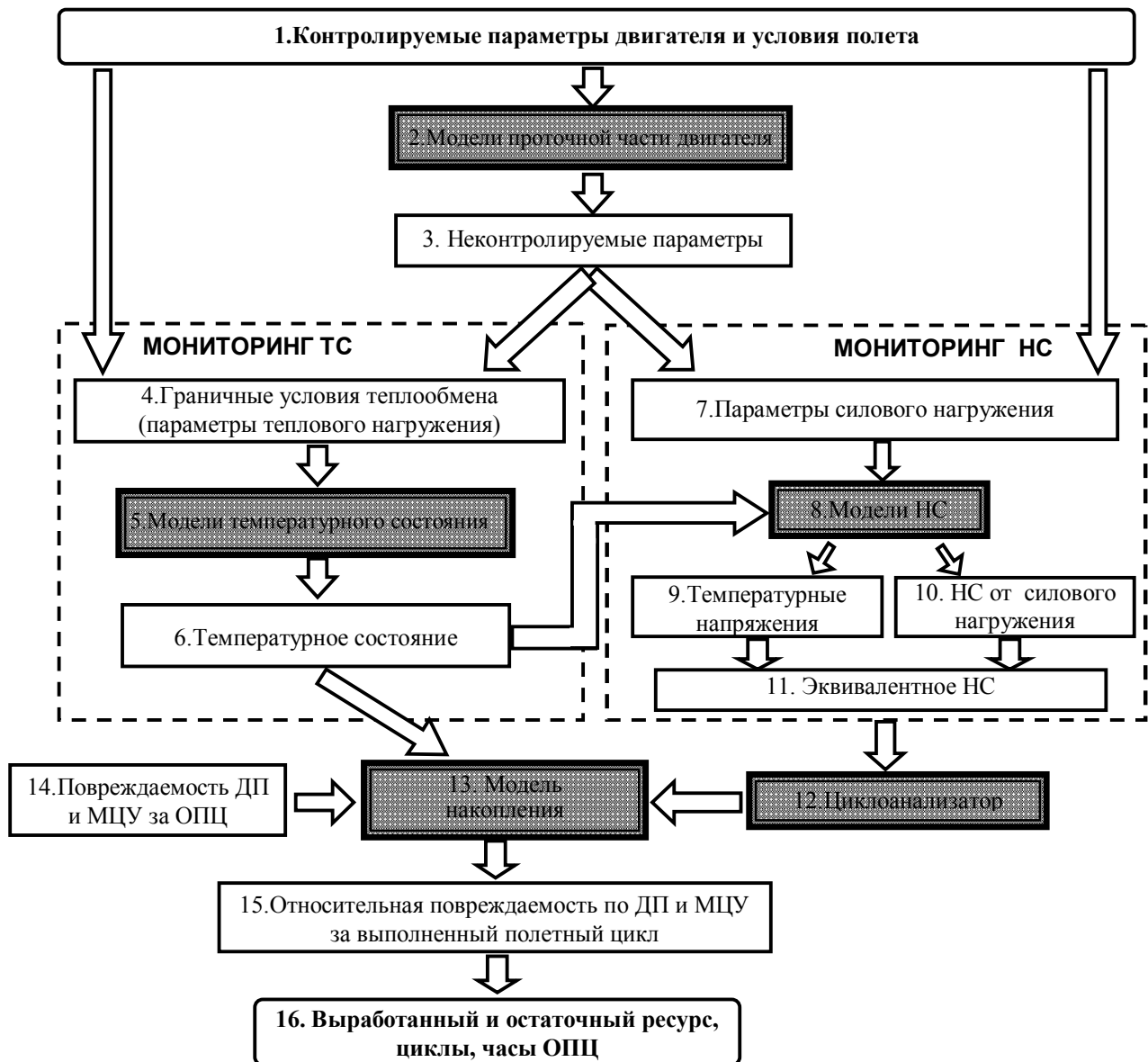


Рис. 2. Блок-схема мониторинга выработки ресурса

### Интерфейс ПК «Ресурс-АИ450МС»

На рис. 3 приведен пример экрана компьютера, демонстрирующий внешний вид интерфейса ПК «Ресурс-АИ450МС».

Плавающие панели содержат оперативную информацию об измеряемых и не измеряемых параметрах двигателя, температурном и напряженном состояниях контролируемых деталей, программе эксплуатации двигателя и др.

Предусмотрена возможность изменять местоположение как главного окна, так и плавающих панелей в зависимости от потребностей пользователей. Графическая визуализация результатов расчетов дает возможность пользователю вывести на экран изменение во времени любых параметров, хранящихся в базе данных ПК «Ресурс-АИ450МС».

### Тестирование и оценка погрешностей ПК

Тестирование ПК «Ресурс-АИ450МС» заключалось в выполнении следующих этапов:

- верификация информационного обмена при реализации алгоритмов мониторинга ТС и НДС;
- контроль правильности информационного обмена и представления конечных результатов мониторинга выработки ресурса.

Оценки погрешностей алгоритмов мониторинга выполнялись как в самостоятельных исследованиях, так и в процессе тестирования ПК. Под погрешностями мониторинга понимаются отличия его результатов от данных, полученных на моделях верхнего уровня.

Для проведения тестирования использовались следующие тесты:



Рис. 3. Состав главного окна ПК «Ресурс-АИ450МС»:

- 1 – рамка приложения; 2 – главное меню; 3 – панель инструментов; 4 – плавающее окно «параметры»;
- 5 – плавающее окно «режимы»; 6 – окно визуализации результатов в табличной и графическом видах;
- 7 – статусная строка

– тест «Стационарный режим» заключался в проведении расчетов ТС и НС на установившихся режимах.

– тест «Нормальный цикл» включает расчеты температурного и напряженного состояний на неустановившихся режимах в начальной части эксплуатационного цикла: 0 – Отбор на СКВ во время стоянки с одновременной загрузкой генератора 40 кВА (1 мин) – Отбор на ЗМД с одновременной загрузкой генератора (1 мин) – Отбор на СКВ при рулении.

Результаты для диска турбины газогенератора приведены на рис. 4.

– тест «Обобщенный полетный цикл» представляет собой расчет выработки ресурса в обобщенном полетном цикле.

– тест «Реальные полеты» заключался в обработке данных бортового регистратора при выполнении полета самолетов Ан-148–100.

Учитывая то, что выработка ресурса происходит, в основном, на высоких режимах, в качестве окончательных оценок погрешностей мониторинга ТС и НС были приняты значения:

- ТС на установившихся режимах: 0.2...0.4%;
- ТС на переходных режимах: менее 2.5%;

- НС на установившихся режимах: менее 1%;
- НС на переходных режимах: менее 2%.

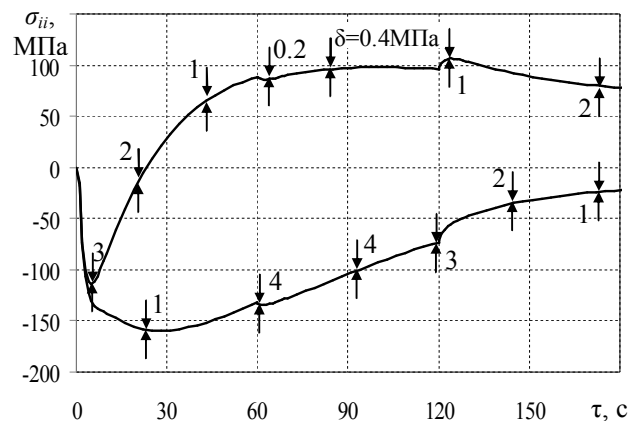


Рис. 4. Изменение температурных напряжений для диска турбины газогенератора (верхние кривые –  $\sigma_{xx}$ , нижние кривые –  $\sigma_{zz}$ )

Результаты тестирования подтвердили правильность информационного обмена во всех блоках алгоритма и представления результатов мониторинга ТС и НС.

На основании оценок погрешностей мониторинга ТС и НС по методике [2] относительная погрешность МВР КД может быть оценена величиной ~10%.

В целом, в качестве приближенных оценок погрешностей МВР КД с помощью ПК «Ресурс-АИ450МС», было получено, что погрешности по МЦУ не превышают 7-8%, что с учетом определенных запасов точности позволяет считать их находящимися в пределах до 15%.

Эти оценки были приняты в качестве предварительных. В дальнейшем предполагается их развитие и уточнение в процессе эксплуатационного внедрения ПК «Ресурс-АИ450МС» в ОАО «Мотор Сич».

### Литература

1. 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.

2. Олейник А.В. Оценка погрешностей мониторинга выработки ресурса авиационного газотурбинного двигателя / А.В. Олейник, Н.А. Шимановская // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 70-74.

3. 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.

4. Олейник А.В. Структурно-параметрическая идентификация мониторинговой модели динамики температурных напряжений в критической точке узла газотурбинного двигателя / А.В. Олейник, Н.А. Шимановская // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 9 (25). – С. 32-36.

Поступила в редакцию 20.05.2010

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

### ПРОГРАММНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГУ ВИРОБЛЕННЯ РЕСУРСУ ОСНОВНИХ ДЕТАЛЕЙ ДОПОМІЖНОГО ДВИГУНА АІ-450-МС

*Н.А. Шимановська, Д.Ф. Симбірський, І.Л. Гліксон, С.І. Шанькін*

Наводяться основні результати подальшого вдосконалення алгоритмів моніторингу температурного і напруженого станів основних деталей газотурбінного двигуна. Вони реалізовані в програмному комплексі «Ресурс-АІ450МС», призначеному для моніторингу виробітку і прогнозування залишку ресурсу допоміжного двигуна АІ-450-МС по штатно реєстрованих параметрах. Представлені основні етапи створення програмного комплексу і розглянута його структура. Проведена верифікація і тестування моніторингових моделей дозволяє зробити висновок про погрішність моніторингу виробітку ресурсу основних деталей менше 15%.

**Ключові слова:** ресурс, моніторинг, контрольована деталь, температурний і напружений стан.

### PROGRAMMATIC COMPLEX FOR AUXILIARY ENGINE AI-450-MS BASIC DETAILS LIFETIME MONITORING

*N.A. Shimanovskaya, D.F. Simbirskiy, I.L. Glikson, S.I. Shan'kin*

Further perfection basic results over of monitoring algorithms of thermal and stress condition of turbo-engine basic details are brought. They are realized in a programmatic complex «Lifetime-AI450MS», intended for making and prognostication remain of resource monitoring of auxiliary engine of AI 450 MS on the regularly registered parameters. The basic stages of programmatic complex creation are presented and its structure is considered. The conducted verification and testing of monitoring models allows to draw conclusion about the error of lifetime making monitoring of basic details less than 15%.

**Key words:** lifetime, monitoring, controlled detail, thermal and stress condition.

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

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

**Гліксон Игорь Леонидович** – начальник отдела прочности ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

**Шанькин Сергей Иванович** – главный конструктор ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.