

УДК 629.7.036:539.4

Н.А. ШИМАНОВСКАЯ¹, Д.Ф. СИМБИРСКИЙ¹, И.Л. ГЛИКСОН², С.И. ШАНЬКИН²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина*

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА АВИАЦИОННЫХ ГТД

Предложен упрощенный метод мониторинга выработки ресурсов основных деталей авиационных двигателей, предназначенный для учета выработки ресурса, в случае временной неработоспособности автоматизированного программного комплекса. Метод основан на использовании известного простейшего счетчика наработки и позволяет частично учесть влияние условий эксплуатации двигателя, в частности температуры на входе в двигатель, на количество выработанных типовых эксплуатационных циклов. На примере ряда основных деталей двигателя АИ-450-МС показано, что предложенный упрощенный метод мониторинга позволяет снизить уровень погрешностей известного простейшего счетчика наработки до двух раз.

Ключевые слова: ресурс, мониторинг, повреждаемость, счетчик ресурса.

Введение

В настоящее время для обеспечения безопасности полетов и необходимого уровня надежности при эксплуатации ГТД по техническому состоянию используют автоматизированные системы диагностирования. В состав ряда развитых из них входят подсистемы мониторинга (текущего подсчета) выработки назначенных ресурсов (МВР) набора контролируемых деталей. Современные средства МВР авиационных ГТД представляют собой цифровые системы расчетного определения выработанных ресурсов основных деталей исходя из уровня их эквивалентной повреждаемости по результатам регистрации параметров двигателя и внешних условий.

Наиболее совершенными являются системы МВР, основанные на экспериментально-расчетном методе косвенных измерений выработанного и остаточного ресурсов деталей двигателя по информации от штатных средств регистрации его параметров. При этом алгоритмы МВР представляют собой системы информационно связанных математических моделей, структурированных по типам влияющих на выработку ресурса процессов, и преобразующих измерительную информацию в оценки температурного и напряжено-деформированного состояния основных деталей и, далее, в величины их повреждения за полетный цикл и в ресурсные показатели [1]. Алгоритмы МВР, чаще всего, реализуют в виде цифрового программного комплекса (ПК), исходной информацией для которого служат регистрируемые системой диагностики параметры двигателя. Такой ПК для двигателя АИ-450-МС был разработан, ре-

ализован и ныне находится на стадии испытаний и внедрения в эксплуатацию [2].

Однако, в эксплуатационных условиях полетная информация, регистрируемая бортовым накопителем, по каким-либо причинам может оказаться временно недоступной вследствие временной неработоспособности программно-аппаратных средств, обеспечивающих ее считывание и обработку. Так, при отсутствии данных от хотя бы одного из необходимых параметров двигателя (например, из-за отказа датчика) ПК МВР становится временно неработоспособным.

Более упрощенными, но обладающими большой погрешностью определения выработанных ресурсов, являются счетчики наработки.

Счетчики наработки длительное время активно использовались при эксплуатации авиационных ГТД до появления описанных выше автоматизированных систем МВР по эквивалентной повреждаемости. В некоторых из них расчеты выработки ресурсов автоматизированы и выполняются с помощью ЭВМ, в большинстве упрощенных счетчиков наработки – с использованием простейших вычислительных средств («в ручную»).

Для большинства современных двигателей, в случае отказа упомянутого автоматизированного ПК предполагается использовать простейший счетчик наработки, который осуществляет учет выработанного ресурса по результатам контроля количества запусков и общего времени работы двигателя.

Таким образом, одним из несложных представляется описанный выше простейший счетчик наработки, который на основании информации о том,

что выполнен очередной полетный цикл, независимо от фактических полетных условий и особенностей нагружения деталей принимает, что ресурс выработан в количестве, соответствующем одному типовому эксплуатационному циклу (ТЭЦ). Однако такой подход может оказаться недопустимо неточным. Поэтому представляется целесообразным выделить факторы, оказывающие наибольшее влияние на погрешность МВР, и учесть их в описанном простейшем счетчике наработки повышенной точности.

Очевидно, что основные погрешности простейших счетчиков наработки вызываются следующими факторами.

1. Неучетом условий внешней среды на входе в двигатель.

2. Неучетом реального теплового и напряженного состояния контролируемых деталей за полетный цикл, что существенно отражается на результатах расчета их наработки.

Так как указанные факторы учитываются при расчетах в ПК МВР, то для сравнительных оценок возникающих погрешностей нами были выполнены соответствующие расчеты с помощью ПК «Ресурс-АИ450МС» [2] применительно к принятому ТЭЦ двигателя. Оказалось, что основная часть погрешностей простейшего счетчика наработки вызывается неучетом условий полета, прежде всего атмосферных, влияющих на процессы в проточной части двигателя, а через них на тепловое и напряженное состояние деталей.

Поэтому из-за важности и простоты реализации учета в простейшем счетчике наработки, в качестве основного объекта исследований была выбрана температура воздушного потока на входе в двигатель.

1. Результаты исследований

Приведем основные результаты оценки зависимости результатов расчета выработки ресурсов деталей по критерию МЦУ от температуры $T_{вх}$ воздуха на входе в двигатель и соответствующей погрешности простейшего счетчика наработки. Будем исходить из того, что основная доля выработки ресурса приходится на максимальный режим. Выработку ресурса (повреждаемость) на максимальном режиме при температуре на входе в двигатель $T_{вх}$ будем относить к выработке ресурса (повреждаемости) на таком же режиме при стандартной температуре $T_{ст}$. Это дает возможность характеризовать зависимость относительной выработки ресурса от температуры на входе безразмерным коэффициентом $\eta(T_{ст})$:

$$\eta(T_{вх}) = \frac{P_{\max}(T_{вх})}{P_{\max}(T_{ст})}, \quad (1)$$

где $P_{\max}(T_{вх})$ и $P_{\max}(T_{ст})$ – повреждение на макси-

мальном режиме при температуре воздуха $T_{вх}$ на входе в двигатель и при стандартной температуре воздуха $T_{ст}$ соответственно.

Повреждение от малоциклового усталости будем оценивать с помощью формулы Мэнсона [3]:

$$\Delta \varepsilon = \left[\ln \frac{1}{1 - \psi(t)} \right]^{0,6} N_p^{-0,6} + \frac{3,5(\sigma_B(t) - \sigma_m)}{E(t)} N_p^{-0,12}, \quad (2)$$

где $\Delta \varepsilon$ – размах полной деформации; N_p – количество циклов до разрушения; $\sigma_B(t)$ и $E(t)$ – предел прочности и модуль упругости при температуре детали t ; $\psi(t)$ – степень уменьшения поперечного сечения образца материала при разрыве; σ_m – среднее напряжение за цикл.

Пренебрегая асимметрией цикла, а также первым слагаемым, что допустимо при числе циклов до разрушения больше 10^3 [4], получим:

$$P_{\max}(T_{вх}) = \frac{1}{N_p(T_{вх})} = \left(\frac{\sigma_{\max}(T_{вх})}{3,5\sigma_B(t(T_{вх}))} \right)^{8,33}, \quad (3)$$

где $N_p(T_{вх})$ – числа циклов до разрушения в зависимости от $T_{вх}$; $\sigma_B(t)$ – предела прочности в зависимости от $T_{вх}$; $\sigma_{\max}(T_{вх})$ – напряжения на максимальном режиме от температуры на входе; $t(T_{вх})$ – температуры детали в зависимости от $T_{вх}$.

Вышеприведенное позволяет оценивать зависимость относительной выработки циклического ресурса (1) от $T_{вх}$ по формуле:

$$\eta(T_{вх}) = \frac{P_{\max}(T_{вх})}{P_{\max}(T_{ст})} = k_{\sigma_{\max}}^{8,33} \cdot k_{\sigma_B}^{-8,33}, \quad (4)$$

где $k_{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_{\max}(T_{вх})}{\sigma_{\max}(T_{ст})}$ – коэффициент изменения

нагрузки детали; $k_{\sigma_B} = \frac{\sigma_B(t(T_{вх}))}{\sigma_B(t(T_{ст}))}$ – коэффициент изменения прочности материала.

Таким образом, для определения зависимости $\eta(T_{вх})$ с целью использования в качестве поправочного коэффициента для простейшего счетчика наработки повышенной точности необходимо воспользоваться результатами указанных расчетов с помощью автоматизированного ПК «Ресурс-АИ450МС» [2].

Так, на рис. 1 приведено изменение относительной выработки циклического ресурса $\eta(T_{вх})$ для некоторых основных деталей двигателя АИ-450-МС в интервале температуры $T_{вх} = -60 \dots +45^\circ\text{C}$, которое получено по результатам расчетов с помощью ПК «Ресурс-АИ450МС».

Результаты расчетов показывают на рост реальной выработки циклического ресурса на 20...90% при возрастании $T_{вх}$ до 45°C , которое не будет обнаружено простейшим счетчиком наработки. То же относится к уменьшению реальной выработки на 10...70% при уменьшении $T_{вх}$ до -60°C .

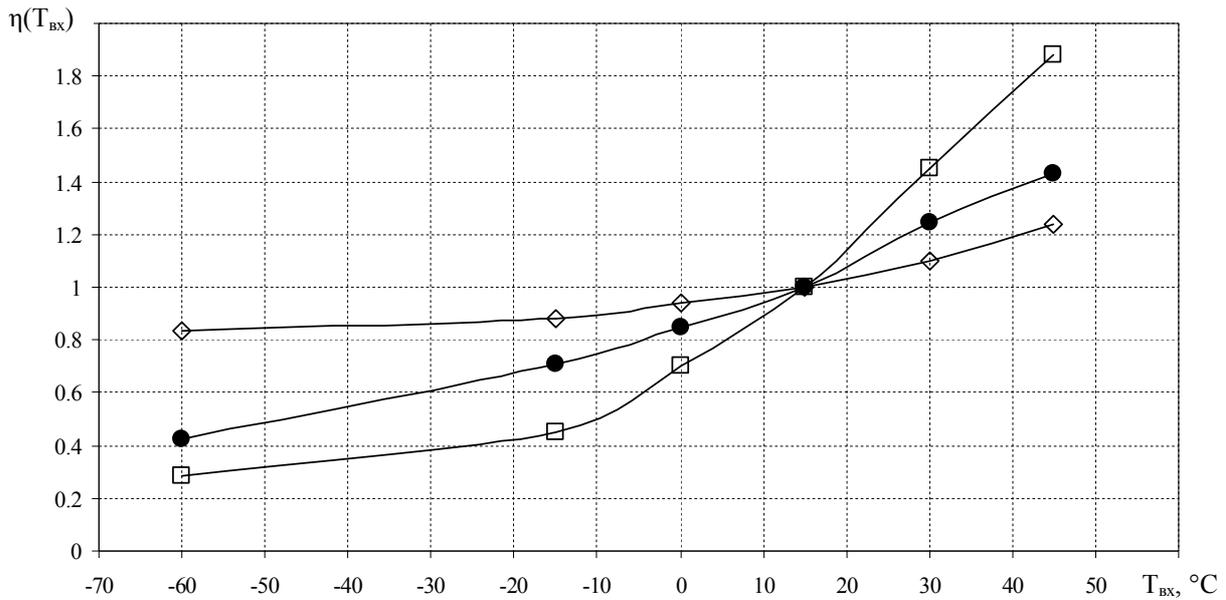


Рис. 1. Относительная выработка ресурса деталей ТВаД в зависимости от температуры на входе в двигатель:
 ◇ – диск СК; □ – диск ЦБК; ○ – диск ТК

Результаты проведенных расчетов могут быть использованы для оценки относительной погрешности $\delta(T_{вх})$ простейшего счетчика циклической наработки, зависящей от $T_{вх}$ и определяемой с помощью зависимости

$$\delta(T_{вх}) = \frac{N_p(T_{вх}) - N_p(T_{ст})}{N_p(T_{ст})} = \frac{N_p(T_{вх})}{N_p(T_{ст})} - 1 = \eta(T_{вх}) - 1. \quad (5)$$

В соответствии с (5) при учете данных рис. 1 величина погрешности $\delta(T_{вх})$ при неучитываемом простейшим счетчиком наработки изменении $T_{вх}$ от -60 до $+45^\circ\text{C}$ может изменяться в пределах от 45 до 85%. То есть можно признать, что влияние $T_{вх}$ на показания простейшего счетчика наработки основных деталей недопустимо велико.

Таким образом, при разработке простейшего счетчика наработки невозможно учесть все факторы, влияющие на точность МВР. Однако учет в них температуры на входе в двигатель позволит существенно уменьшить погрешность определения выработанных ресурсов, например, для основных деталей двигателя АИ-450-МС – до 2-х раз.

2. Простейший счетчик наработки повышенной точности

С целью повышения точности простейшего счетчика наработки нами предлагается корректировать полученное значение количества ТЭЦ путем умножения коэффициента $\eta(T_{вх})$, зависящий от температуры $T_{вх}$ на входе в двигатель.

В предлагаемом простейшем счетчике наработки повышенной точности применяется следующий алгоритм:

1. Определить количество ТЭЦ с помощью информации, зарегистрированной блоком управления и контроля двигателя.

2. Определить среднюю температуру на входе в двигатель. Для этого:

При запуске на земле принять $T_{вх}$, равную среднему значению температур перед запуском и после останова двигателя; при отсутствии одной из указанных температур принять значение равное существующей.

При запуске в полете принять $T_{вх}$, равную среднему значению температур перед запуском и после останова двигателя; при отсутствии измерений температуру на входе в двигатель рассчитать по формуле

$$T_{вх} = \left(288,15 - 6,5 \cdot \frac{H(m)}{10^3} \right) - 273,15, \quad [^\circ\text{C}], \quad (6)$$

где $H(m)$ – высота полета самолета в метрах.

3. По графикам, подобным представленным на рис. 1, определить коэффициент коррекции $\eta(T_{вх})$ количества ТЭЦ для каждой основной детали.

4. Рассчитать количество выработанных ТЭЦ $[N_{выр}(T_{вх})]$ для каждой основной детали двигателя по формуле

$$N_{выр}(T_{вх}) = N \cdot \eta(T_{вх}), \quad (7)$$

где N – количество циклов, зарегистрированных простейшим счетчиком наработки двигателя.

Выводы

Таким образом, предложен упрощенный счетчик наработки основных деталей авиационного двигателя повышенной точности, предназначенный для учета выработки ресурса в случае временной неработоспособности автоматизированного ПК МВР.

Предложенный счетчик наработки позволяет частично учесть влияние условий эксплуатации двигателя, в частности температуры на входе в двигатель, на количество выработанных типовых эксплуатационных циклов.

На примере основных деталей двигателя АИ-450-МС показано, что упомянутый учет температуры на входе позволит снизить уровень погрешностей используемого простейшего счетчика наработки до двух раз, однако в целом оставляет их на весьма существенном уровне.

Необходимо также отметить, что предложенный счетчик наработки позволяет лишь приближенно определять количество выработанных циклов, существенно уступая в точности автоматизированным системам МВР по эквивалентной повреждаемости.

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; защита 17.11.06; утв. 18.03.07 / Олейник Алексей Васильевич. – Х., 2006. – 241 с.

2. Шимановская Н.А. Программный комплекс для мониторинга выработки ресурса основных деталей вспомогательного двигателя АИ-450-МС / Н.А. Шимановская, Д.Ф. Симбирский, И.Л. Гликсон, С.И. Шанькин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 9 (76). – С. 120-124.

3. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость / С. Мэнсон. – М.: Машиностроение, 1974. – 334 с.

4. Ресурсное проектирование авиационных ГТД: [руководство для конструкторов]. – М.: ЦИАМ, 1990. – 208 с.

Поступила в редакцию 10.05.2011

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

СПРОЩЕНИЙ МЕТОД МОНИТОРИНГУ ВИРОБІТКУ РЕСУРСУ АВІАЦІЙНИХ ГТД

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

Запропоновано спрощений метод моніторингу виробітку ресурсів основних деталей авіаційних двигунів, призначений для врахування виробітку ресурсу у випадку тимчасової непрацездатності автоматизованого програмного комплексу. Метод засновано на використанні відомого найпростішого лічильника наробітку і дозволяє частково врахувати вплив умов експлуатації двигуна, зокрема температури на вході в двигун, на кількість відпрацьованих типових експлуатаційних циклів. На прикладі ряду основних деталей двигуна АИ-450-МС показано, що запропонований спрощений метод моніторингу дозволяють знизити рівень похибок відомого найпростішого лічильника до двох разів.

Ключові слова: ресурс, моніторинг, пошкоджуваність, лічильник ресурсу.

SIMPLIFIED METHOD FOR AIRCRAFT GTE LIFETIME MONITORING

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

A simplified method of lifetime monitoring of aircraft engines key components suggested, designed to account for lifetime in case of temporary disability automated software system. The method is based on use of well-known simple work off counter and allows partially taking into account the influence of engine operating conditions, particularly the temperature at the inlet to the engine, on the number of worked off standard operating cycles. By the example of AI-450-MS major engine parts showed that the proposed simplified method of monitoring makes it possible to reduce the errors level of well-known simple work off counter up to two times.

Key words: lifetime, monitoring, damaging, resource counter.

Шимановская Наталья Анатольевна – канд. техн. наук, научный сотрудник 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.

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

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