УДК 629.7.03

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ДЛА НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

© 2006 А.И. Белоусов, А.В.Сафронов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Предложена методика оценки надежности проектируемых деталей на этапе проектирования с учетом отклонений размеров и режимов работы детали. Методика позволяет оценить надежность будущей детали и провести коррекцию допусков для обеспечения безотказной работы элемента двигателя.

Проблема повышения надежности ГТД является частью общей проблемы безопасности и регулярности полетов, а также экономической эффективности авиационного транспорта.

С развитием двигателей возрастает их трудоемкость и стоимость. Для повышения экономической эффективности ГТД важно обеспечивать высокие показатели надежности. Задача эта очень сложна, так как современные двигатели имеют напряженные параметры, их рабочие режимы находятся вблизи границ предельного состояния элементов.

Выполнение растущих требований к надежности изделий может быть достигнуто благодаря разработке оптимальной конструкции, совершенствованию технологии, максимальному использованию возможностей материала.

Обеспечение высокой и стабильной конструкционной прочности двигателей, под которой понимается прочность конструкции в реальных условиях эксплуатации с учетом металлургических, технологических и конструкционных факторов, — одно из направлений решения проблемы повышения надежности изделий. При этом наиболее актуальным является прогнозирование и обеспечение показателей надежности на этапе проектирования.

Для авиационных силовых установок, отказ которых приводит к тяжелым последствиям, большую опасность представляют внезапные отказы. Наиболее частым проявлением внезапных отказов являются поломка деталей изделий, вызванная неблагоприятным сочетанием действующих нагрузок и фактической прочности. Разрушения могут возникнуть в результате непредвиденных местных напряжений, вызванных нерасчетными статическими или динамическими нагрузками в сочетании с невыявленными производственными отклонениями. Указанные местные напряжения и нагрузки, как случайные величины, отличаются от средних величин, принимаемых при прочностных расчетах и оценке ресурса изделия.

Вычисление минимальных запасов прочности, гарантирующих надежную работу в течение ресурса, осложняется тем, что двигатель эксплуатируется в разных режимах. Поэтому задачу о необходимых запасах прочности можно ставить только в вероятностном плане.

Для надежной работы детали двигателя необходим запас работоспособности, т.е. выполнение условия превышения предельных напряжений $\sigma_{пред}$ над рабочими напряжениями σ_p в расчетных сечениях:

$$\varphi = \sigma_{ïðåä} - \sigma_{ð} > 0,$$

где φ - функция качества [1].

Предельные и рабочие напряжения - случайные величины (рис. 1,а). Следовательно, функция качества φ, как композиция распределений $\sigma_{пред}$ и σ_p, также является случайной величиной (рис. 1,б).

Вероятность неразрушения детали равна $P(t) = 0.5 + F(\gamma)$, где t - наработка, для которой определяется вероятность неразрушения; $F(\gamma)$ - функция Лапласа; γ - коэффициент однородности (гауссовская мера надежности).

Одним из показателей для оценки безотказности детали двигателя является интенсивность отказов $\lambda(t)$, которая для наиболее опасных нелокализованных разрушений должна быть меньше $1 \cdot 10^{-9}$ 1/ч.

Для определения интенсивности отказов необходимо знать время работы двигателя на режимах и вероятность разрушения на каждом из них:

$$\lambda(t)=\left(\sum_{i=1}^{n_p} Q_i(t)\cdot \bar{t}_i\right)/t \ ,$$

Вероятность разрушения (прочностного отказа) $P_{разр}(t)=Q(t)=1-P(t)$,

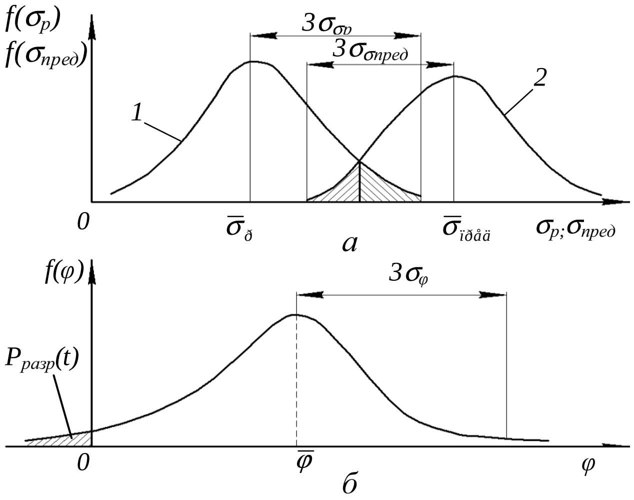

Рис.1. Распределения:
а - действующих (1) и предельных (2) напряжений; б - запаса работоспособности

где n_p – количество режимов эксплуатации двигателя; $Q_i(t)$ – вероятность отказа (разрушения) детали на i-ом режиме работы двигателя; $\bar{t}_i = t_i / t$ – относительная наработка на i-ом режиме; t_i - наработка на i-ом режиме; t – суммарная наработка на всех режимах.

Для оценки показателей надежности деталей двигателя необходимо определять среднеквадратическое отклонение возникающих в детали напряжений.

Существует два способа определения среднеквадратического отклонения рабочего напряжения в детали: с помощью традиционного метода линеаризации (малых возмущений) и с использованием метода конечных элементов в пакете конечно-элементного анализа ANSYS.

Широко распространенный на практике метод линеаризации (метод малых возмущений) заключается в следующем. Нелинейная зависимость $\sigma_p = f(X_i)$; $i = 1, 2, \ldots m$ аппроксимируется линейной, статистически эквивалентной зависимостью [2]. Метод основан на допущении малости случайных отклонений возмущающих параметров X_i от их математических ожиданий $\overline{X}_i$. Он удобен, если зависимость σ_p от возмущающих параметров X_i имеет явное однозначное аналитическое выражение при известных (обычно нормальных) законах распределения случайных величин X_i.

Среднеквадратическое отклонение рабочего напряжения

$$\sigma_{\sigma_p} \cong \sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)_H^2 \sigma_{X_i}^2 + 2\sum_{i<j}\left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)_H\left(\frac{\partial f}{\partial X_j}\right)_H r_{X_iX_j}\sigma_{X_i}\sigma_{X_j}}\ ,$$

где $r_{X_iX_j}$ - коэффициент корреляции величин X_i и X_j. Индекс H при частных производных указывает на то, что их вычисляют в точке ($\overline{X}_1, \overline{X}_2, \ldots, \overline{X}_m$), т.е. при номинальном значении возмущающих факторов. Обозначение $i<j$ указывает на то, что суммирование распространяется на соответствующие парные сочетания величин X_i и X_j . Производные $\partial f / \partial X_i$ представляют собой коэффициенты влияния возмущений X_i на напряжение σ_p .

Метод Монте-Карло реализован в пакете ANSYS многократными повторениями расчета на прочность при различных значениях входных параметров. Для расчета параметров распределения рабочего напряжения необходимо построить параметрическую конечно-элементную модель детали, задать законы распределения входных параметров, искомый параметр и запустить систему на расчет.

Результатом вероятностного расчета в пакете ANSYS являются интегральные функции распределения возмущающих и результирующих факторов, их номинальные значения и среднеквадратические отклонения, вероятности достижения ими заданных значений, матрицы корреляций и графики вероятностных коэффициентов чувствительности, определяющих взаимовлияния рассеивания «входных» и «выходных» параметров.

Пример расчета параметров надежности лопатки с использованием метода конечных элементов.

В программе Ansys была построена параметрическая конечно-элементная модель лопатки, приведенная на рис. 2.

В модели предусмотрено изменение параметров лопатки согласно допускам чертежа (на примере рабочей лопатки 1 ступени турбины высокого давления ТРДД НК-86).

На модель были наложены следующие граничные условия:

1) запрещены перемещения во всех направлениях во втулочном сечении;

2) контактное взаимодействие на контактных поверхностях бандажной полки смоделировано контактными элементами с коэффициентом трения 0.02;

3) приложена центробежная нагрузка, соответствующая угловой скорости на взлетном режиме

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 7290}{60} = 763 \text{ рад/с};$$

4) приложенная к поверхности корытца газодинамическая нагрузка изменяется по высоте лопатки по квадратичной зависимости, а по длине пера по линейной.

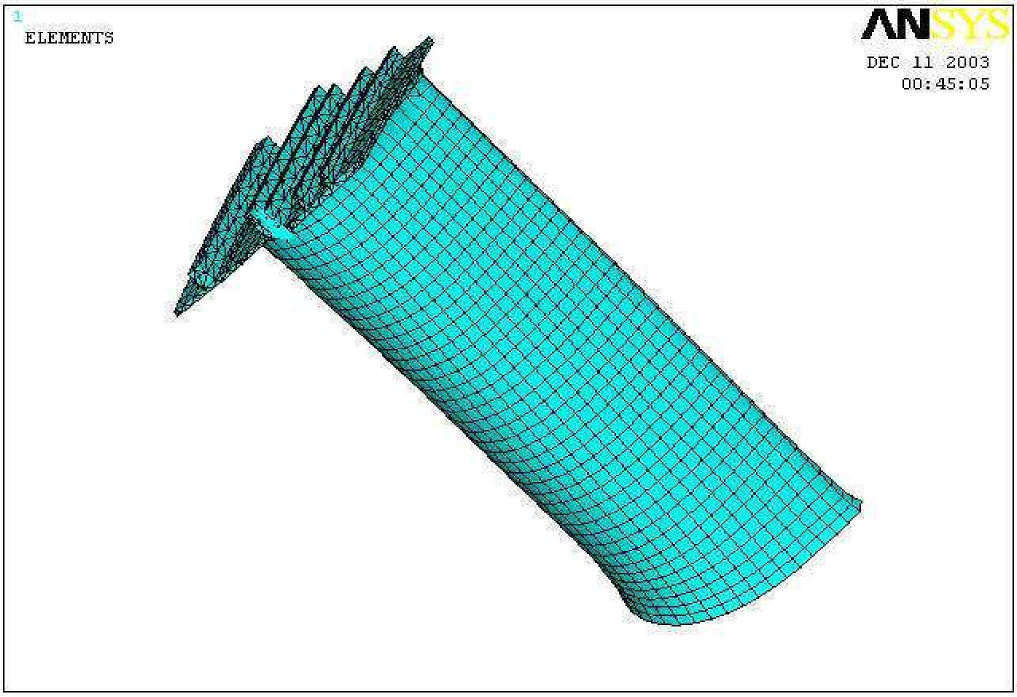

Рис. 2. Конечно-элементная модель лопатки

Напряженное состояние лопатки показано на рис. 3 и 4.

Наибольшее напряжение $\sigma_{р} = 229$ МПа возникает на корытце лопатки между средним и втулочным сечениями.

Предел длительной прочности для материала лопатки Ж30МС при температуре 805 °С и наработке 5000 ч равен 383 МПа.

Минимальный запас прочности на взлетном режиме

$$k_{взл} = \frac{\sigma_{дл}}{\sigma_{р}} = \frac{383}{229} = 1.675 \geq 1.6 .$$

Исходными данными для расчета параметров надежности будут средние значения параметров, влияющих на величину рабочего напряжения, их среднеквадратические отклонения и закон распределения. Для несимметричного закона Гаусса необходимо задать также минимальное и максимальное значения параметра.

За среднее значение параметра будем брать номинальный размер по чертежу. Среднеквадратическое отклонение рассматриваемого размера будем определять по формуле $\sigma_i = \Delta_i / 3$, где Δ_i - величина допуска на размер.

В результате расчета в программе ANSYS был получен интегральный нормальный закон распределения рабочего напряжения, среднеквадратическое отклонение которого равно $\sigma_{\sigma_{р}} = 22.9$ МПа.

Тогда коэффициент вариации рабочего напряжения

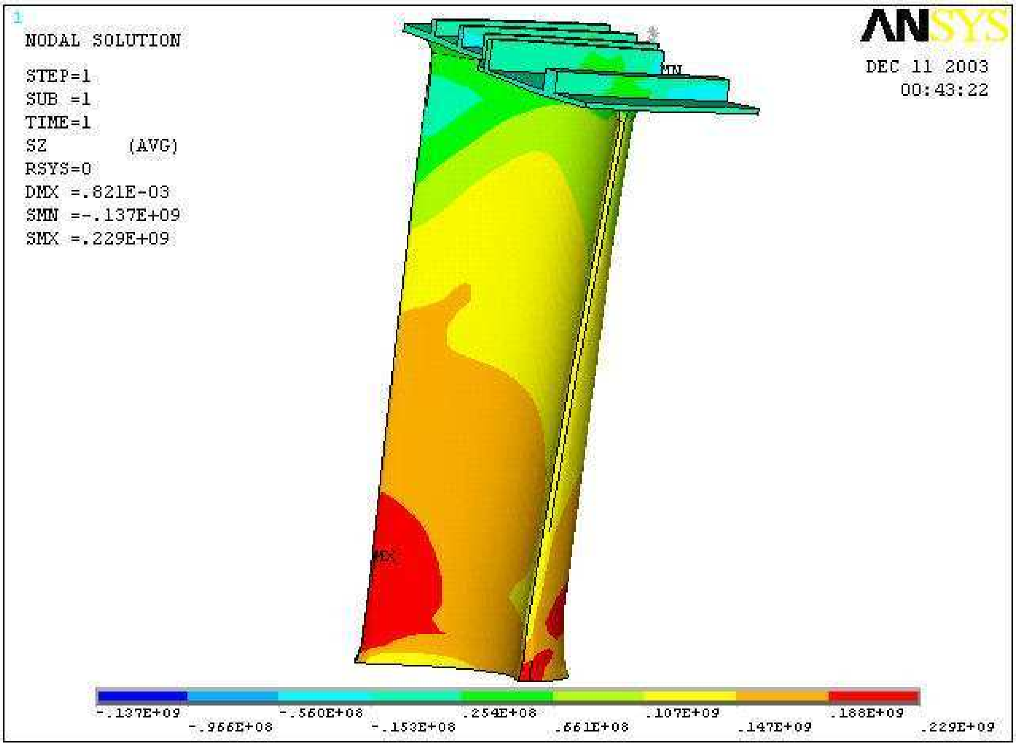

Рис. 3. Напряженное состояние лопатки

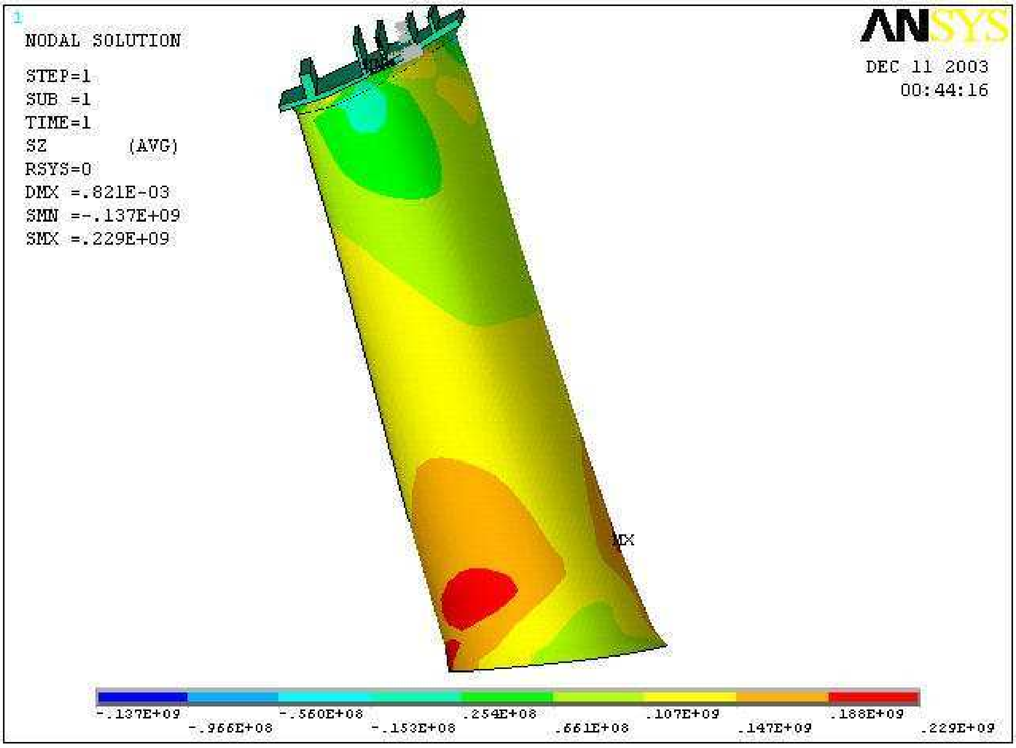

Рис. 4. Напряженное состояние лопатки

$$\vartheta_{\sigma_\delta} = \frac{\sigma_{\sigma_\delta}}{\sigma_\delta} = \frac{22.9}{229} = 0.1.$$

Найдем коэффициент вариации предела длительной прочности

$$\vartheta_{\sigma_{дл}} = \frac{\sigma_{\sigma_{дл}}}{MO(\sigma_{дл})},$$

где $\sigma_{\sigma_{\ddot{a}\ddot{e}}} = 100/3 = 33.3$ МПа – среднеквадратическое отклонение предела длительной прочности;

$\grave{I}\hat{I}\ (\sigma_{\ddot{a}\ddot{e}}) = 383$ МПа –математическое ожидание предела длительной прочности.

$$\vartheta_{\sigma_{\ddot{a}\ddot{e}}} = \frac{33.3}{383} = 0.087\,.$$

Определим коэффициент однородности

$$\gamma = \frac{k-1}{\sqrt{k^2 \cdot \vartheta^2_{\sigma_{\text{äë}}} + \vartheta^2_{\sigma_{\text{ð}}}}} = \frac{1.675-1}{\sqrt{1.675^2 \cdot 0.087^2 + 0.1^2}} = 3.82$$

Вероятность неразрушения

$P_{\text{â}}(t) = F(\gamma) = F(3.82) = 0.9^4 32$.

Вероятность разрушения

$Q(t) = 1 - P_{\text{â}}(t) = 1 - 0.9^4 32 = 6.8 \cdot 10^{-5}$.

Двигатель НК-86 работает на следующих режимах [3]:

– взлетный $n_{\max}$ - 3% времени полета;
– номинальный $n = 0.909 \cdot n_{\max}$ - 20% времени полета;
– 0.8 номинала $n = 0.727 \cdot n_{\max}$ - 40% времени полета;
– 0.6 номинала $n = 0.545 \cdot n_{\max}$ - 8% времени полета;
– 0.4 номинала $n = 0.364 \cdot n_{\max}$ - 7% времени полета;
– малый газ $n = 0.182 \cdot n_{\max}$ - 22% времени полета.

Найдем напряжения в лопатке на всех режимах работы двигателя при $\sigma_{\text{ð}} = 229$ МПа на взлетном режиме:

$$\sigma_{\text{ð}_{\text{íî}}} = \sigma_{\text{ð}} \cdot 0.909^2 = 189 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{ð}_{0.8\text{íî}}} = \sigma_{\text{ð}} \cdot 0.727^2 = 121 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{ð}_{0.6\text{íî}}} = \sigma_{\text{ð}} \cdot 0.545^2 = 68 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{ð}_{0.4\text{íî}}} = \sigma_{\text{ð}} \cdot 0.364^2 = 30 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{ð}_{\text{ìã}}} = \sigma_{\text{ð}} \cdot 0.182^2 = 7.6 \text{ МПа}.$$

Определим коэффициент запаса прочности на каждом режиме эксплуатации:

$$k_{\text{íî}} = \frac{\sigma_{\text{äë}}}{0.909^2 \cdot \sigma_{\text{ð}}} = \frac{k_{\text{âçë}}}{0.909^2} = 2;$$

$$k_{0.8\text{íî}} = \frac{\sigma_{\text{äë}}}{0.727^2 \cdot \sigma_{\text{ð}}} = \frac{k_{\text{âçë}}}{0.727^2} = 3.2;$$

$$k_{0.6\text{íî}} = \frac{\sigma_{\text{äë}}}{0.545^2 \cdot \sigma_{\text{ð}}} = \frac{k_{\text{âçë}}}{0.545^2} = 5.639;$$

$$k_{0.4\text{íî}} = \frac{\sigma_{\text{äë}}}{0.364^2 \cdot \sigma_{\text{ð}}} = \frac{k_{\text{âçë}}}{0.364^2} = 12.6;$$

$$k_{\text{ìã}} = \frac{\sigma_{\text{äë}}}{0.182^2 \cdot \sigma_{\text{ð}}} = \frac{k_{\text{âçë}}}{0.182^2} = 51.$$

Рассчитаем коэффициент однородности для каждого из режимов:

$$\gamma_{\text{íî}} = \frac{2-1}{\sqrt{2^2 \cdot 0.087^2 + 0.1^2}} = 5.06;$$

$$\gamma_{0.8\text{íî}} = \frac{3.2-1}{\sqrt{3.2^2 \cdot 0.087^2 + 0.1^2}} = 7.39;$$

$$\gamma_{0.6\text{íî}} = \frac{5.6-1}{\sqrt{5.6^2 \cdot 0.087^2 + 0.1^2}} = 9.26;$$

$$\gamma_{0.4\text{íî}} = \frac{12.6-1}{\sqrt{12.6^2 \cdot 0.087^2 + 0.1^2}} = 10.5;$$

$$\gamma_{\text{ìã}} = \frac{51-1}{\sqrt{51^2 \cdot 0.087^2 + 0.1^2}} = 11.3.$$

Вычислим вероятность неразрушения на каждом режиме:

$$P_{\text{â}}(t)_{\text{íî}} = F(\gamma_{\text{íî}}) = F(5.06) = 0{,}9^6 79;$$

$$P_{\text{â}}(t)_{0.8\text{íî}} = F(\gamma_{0.8\text{íî}}) = F(7.39) = 0{,}9^{13} 28;$$

$$P_{\text{â}}(t)_{0.6\text{íî}} = F(\gamma_{0.6\text{íî}}) = F(9.26) = 1;$$

$$P_{\text{â}}(t)_{0.4\text{íî}} = F(\gamma_{0.4\text{íî}}) = F(10.5) = 1;$$

$$P_{\text{â}}(t)_{\text{ìã}} = F(\gamma_{\text{ìã}}) = F(11.3) = 1.$$

Вероятность разрушения на каждом режиме работы:

$$Q(t)_{\text{íî}} = 1 - P_{\text{â}}(t)_{\text{íî}} = 1 - 0{,}9^6 79 = 2{,}1 \cdot 10^{-7};$$

$$Q(t)_{0.8\text{íî}} = 1 - P_{\text{â}}(t)_{0.8\text{íî}} = 1 - 0{,}9^{13} 28 = 7{,}2 \cdot 10^{-14};$$

$$Q(t)_{0.6\text{íî}} = 1 - P_{\text{â}}(t)_{0.6\text{íî}} = 1 - 1 = 0;$$

$$Q(t)_{0.4\text{ном}} = 1 - P_{\text{в}}(t)_{0.4\text{ном}} = 1 - 1 = 0;$$

$$Q(t)_{\text{ìã}} = 1 - P_{\text{â}}(t)_{\text{ìã}} = 1 - 1 = 0.$$

Найдем интенсивность отказов за 1 час работы двигателя

$$\lambda = \left(\sum_{1}^{n_{\text{ð}}} Q_{\text{ð.ý.}}(t) \cdot t_{\text{ð.ý}} \right) / t = (6.8 \cdot 10^{-5} \cdot 0.03 +$$

$$+ 2.1 \cdot 10^{-7} \cdot 0.2 + 7.2 \cdot 10^{-14} \cdot 0.4) / 5000 =$$

$$= 0.41 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}.$$

Полученное значение интенсивности отказов меньше величины $1 \cdot 10^{-9}$, следовательно, лопатка отвечает требованиям по надежности.

Таким образом, на этапе проектирования, когда закладываются отклонения размеров и режим работы детали, можно оценить надежность будущей детали и провести коррекцию допусков для обеспечения безотказной работы элемента двигателя.

Список литературы

1. Белоусов А. И., Биргер И. А. Прочностная надежность деталей турбомашин:

Учебное пособие. – Куйбышев: КуАИ, 1983. – 75с.
2. Расчет надежности деталей авиационных газотурбинных двигателей: Учеб. Пособие / А. С. Москаленко, - Харьков: Харьк. авиац. Ин-т, 1985. – 107с.
3. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1976. – 216с.

DEFINITION OF PARAMETERS OF STRENGTH RELIABILITY OF DETAILS OF AIRCRAFT ENGINES AT A DESIGN STAGE

© 2006 A.I. Belousov, A.V. Safronov

Samara State Aerospace University

The technique of definition of parameters of no-failure operation of aircraft engines details is in-process observed. For this purpose the dispersion of stresses in a detail by a method of a linearization and the Monte-Carlo method offered by authors in a packet of certainly-element analysis ANSYS is considered.