

УДК 621.452.3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ НАИБОЛЬШЕЕ ВЛИЯНИЕ
НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ ДИСКА ГТД
С УЧЕТОМ ВНЕЗАПНЫХ ОТКАЗОВ**

© 2009 А. И. Белоусов, А. В. Грицин

Самарский государственный аэрокосмический университет

В данной работе представлена методика оценки параметров надежности ГТД с учетом внезапных отказов. По этой методике проведен анализ влияния допусков геометрических размеров, частоты вращения и плотности материала диска на интенсивность отказов.

Надежность, интенсивность отказов, параметры надежности, диск турбины, метод конечных элементов

Переход к новым, современным двигателям и летательным аппаратам путем интенсификации всех производственных процессов невозможен без более полного использования достижений научно-технического прогресса, эффективного использования ресурсов, снижения ущерба от аварийности. Решение этой грандиозной задачи требует научно обоснованных подходов к организации и обеспечению высокого уровня надёжности изделий во всех отраслях промышленности.

Выполнение растущих требований к надёжности изделий может быть достигнуто благодаря разработке оптимальной конструкции, совершенствованию технологии, максимальному использованию возможностей материала, методов проектирования и рациональной эксплуатации. Все это может быть выполнено благодаря созданию методов расчётного определения показателей надёжности, с учётом отмеченных факторов.

Обеспечение высокой и стабильной конструкционной прочности двигателей, под которой понимается прочность конструкции в реальных условиях работы с учётом металлургических, технологических и конструктивных факторов, — одно из направлений решения проблемы повышения надёжности изделий.

Требуемая надёжность двигателей закладывается на этапе проектирования, доводится до требуемого для начала эксплуатации уровня на этапе опытно-конструкторской отработки, совершенствуется и обеспечивается при производстве, улучшается и реализуется при эксплуатации [1].

Но даже если конструирование, расчёты, изготовление, сборка, испытания отдель-

ных элементов выполнены правильно, в соответствии с нормативно-технической документацией, при доводке опытных изделий и в эксплуатации наблюдаются отказы и разрушения деталей. Это объясняется многообразием факторов, влияющих на конструкционную прочность, и отсутствием чётких, научно обоснованных рекомендаций по ряду вопросов конструирования, выбора материала, расчёта на прочность с учётом комплексности нагружения и длительности эксплуатации.

Одной из основных задач проблемы обеспечения безотказности и долговечности является разработка методов определения числовых значений показателей надёжности изделий. Эта задача решается методами обработки данных эксплуатационных наблюдений и ускоренных испытаний, а также расчётным путем. Расчётный метод в настоящее время слабо оформился в инженерный метод из-за сложности задачи, ее новизны и недостаточного количества фактических и опытных данных. Но в настоящее время они наиболее экономически целесообразны и дают возможность судить о надёжности изделий в нормальных условиях эксплуатации по значению соответствующих показателей при форсированных режимах (повышенные нагрузки, скорости, температуры, концентрации реагентов и т.д.).

По характеру потери работоспособности отказы двигателей делятся на две группы. К первой группе относятся внезапные отказы, носящие характер случайного выброса: хрупкое разрушение; превышение предела текучести в какой-либо точке детали, для которой остаточные деформации недопустимы; возникновение слишком больших упругих деформаций и др. Ко второй

группе относятся постепенные отказы, возникающие в результате необратимого накопления повреждений в детали: накопление пластических деформаций (деформаций ползучести), усталостных повреждений, ведущих к развитию трещин, механическое изнашивание и др.

Таким образом, при оценке надёжности деталей авиационных двигателей необходимо учитывать внезапные и постепенные отказы.

Поведение реальных конструкций обусловлено взаимодействием целого ряда факторов, имеющих явно выраженный случайный характер. В связи с этим определение надёжности конструкций невозможно без применения методов теории вероятностей и математической статистики.

К особенностям ДЛА с точки зрения оценки показателей надёжности относятся [2]:

- сравнительно небольшой объём статистической совокупности (в ряде случаев единичные экземпляры);
- трудность получения опытных данных для последующей обработки методом математической статистики;
- сложный характер и взаимосвязанность процессов нагружения;
- повышенное влияние на надёжность конструкций стабильности технологических процессов и сборочных работ.

Нагрузки, действующие на конструкцию, как правило, оказывают многократное влияние или развертывают свои вероятностные свойства во времени. Механические свойства материалов, изготавливаемых в массовом количестве, могут быть изучены основательно [3]. Таким образом, поведение самой уникальной конструкции определяется случайными факторами массового характера, для каждого из которых допускается статистическое толкование вероятности. Предсказать на основе этого статистического массива данных поведение конструкции – в этом и состоит цель расчета надёжности ДЛА.

Для авиационных силовых установок, отказ которых приводит к тяжёлым последствиям, большую опасность представляют внезапные отказы. Наиболее частым проявлением внезапных отказов являются поломки, деформации и растрескивания отдельных деталей изделий и узлов их крепления, вызываемые неблагоприятным сочетанием дей-

ствующих нагрузок и фактической прочностью. Разрушения из-за нарушения прочности могут возникнуть в результате непредвиденных местных напряжений, вызванных нерасчётными статическими или динамическими нагрузками в сочетании с невыявленными производственными отклонениями. Указанные местные напряжения и нагрузки, как случайные величины, существенно отличаются от средних величин, принимаемых при прочностных расчётах и оценке ресурса изделия.

Одной из задач проектирования двигателя является обеспечение гарантии того, что за время эксплуатации не наступит ни одно из предельных состояний его элементов, т.е. не нарушатся условия их нормального функционирования. Решение этой задачи – определение рациональных характеристик прочности при заданных показателях надёжности.

При определении запаса прочности возникают затруднения в установлении величины предельных напряжений, с которыми сравниваются расчётные. Такие параметры прочности, как предел прочности (длительной прочности) при фиксированной температуре или предел выносливости данного материала в изделии, являются случайными величинами в связи с существованием допусков на химический состав материала и технологию его получения, неоднородностью температурного режима различных плавок и внешних климатических условий, отклонением условий термической обработки сортамента и др.

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

Введём понятие функции качества (запаса работоспособности) [1]

$$\varphi = \sigma_{пред} - \sigma_p, \quad (1)$$

где $\sigma_{пред}$ – предельные напряжения (предел длительной прочности, предел выносливости и др.); σ_p – рабочее напряжение в расчетном сечении.

Для надёжной работы детали двигателя необходимо выполнение условия

$$\varphi > 0. \quad (2)$$

Предельные напряжения и рабочее напряжение - случайные величины. Они имеют нормальное или логарифмически-нормальное распределение вокруг среднего значения с некоторым стандартным отклонением от него [1,2,4]. Следовательно, функция качества φ согласно выражению (1), как композиция распределений σ_{npred} и σ_p , также является случайной величиной.

Применение нормального закона оправдано тем, что в случае совместного действия достаточно большого числа случайных возмущений, подчиняющихся различным законам распределения (если среди них нет преобладающего) результирующее возмущающее воздействие имеет согласно центральной предельной теореме теории вероятностей распределение, близкое к нормальному. Тогда согласно свойствам композиции законов распределений и функция качества φ описывается нормальным законом Гаусса с математическим ожиданием $\bar{\varphi} = \bar{\sigma}_{npred} - \bar{\sigma}_p$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_\varphi = \sqrt{\sigma_{\sigma_{npred}}^2 + \sigma_{\sigma_p}^2}$, где $\bar{\sigma}_{npred}$ и $\bar{\sigma}_p$ - математически ожидания, а $\sigma_{\sigma_{npred}}$ и σ_{σ_p} - среднеквадратические отклонения предельного σ_{npred} и рабочего σ_p напряжений соответственно.

Вероятность неразрушения детали согласно условию (2)

$$P_s(t) = \text{Вер}[(\sigma_{npred} - \sigma_p) > 0] = \int_0^\infty f(\varphi) d\varphi = \frac{1}{\sigma_\varphi \sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{(\varphi - \bar{\varphi})^2}{2\sigma_\varphi^2}} d\varphi, \quad (3)$$

где t - наработка, для которой определяется вероятность неразрушения.

В справочнике [5] приведены значения $\bar{\sigma}_{npred}$ и $\sigma_{\sigma_{npred}}$ для некоторых авиационных материалов.

Введем переменную $z = \frac{\varphi - \bar{\varphi}}{\sigma_\varphi}$. Тогда

$d\varphi = \sigma_\varphi dz$. Выражение (3) для вероятности неразрушения преобразуется в нормированный нормальный закон распределения

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz; \quad (4)$$

$$P_s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\gamma}^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\gamma e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0.5 + F(\gamma), \quad (5)$$

где $\gamma = \frac{\bar{\varphi}}{\sigma_\varphi} = \frac{1}{\nu_\varphi}$ - коэффициент однородности (гауссовская мера надёжности); $\nu_\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{\bar{\varphi}}$

- коэффициент вариации функции качества φ .

Для интеграла вероятности (4) имеются таблицы в справочниках по математике.

Преобразуем выражение коэффициента однородности, подставив согласно свойствам композиции распределений значения $\bar{\varphi}$ и σ_φ :

$$\gamma = \frac{\bar{\sigma}_{npred} - \bar{\sigma}_p}{\sqrt{\sigma_{\sigma_{npred}}^2 + \sigma_{\sigma_p}^2}} = \frac{\frac{\bar{\sigma}_{npred}}{\bar{\sigma}_p} - 1}{\sqrt{\frac{\sigma_{\sigma_{npred}}^2}{\bar{\sigma}_p^2} + \frac{\sigma_{\sigma_p}^2}{\bar{\sigma}_p^2}}} = \frac{k - 1}{\sqrt{k^2 \cdot \nu_{\sigma_{npred}}^2 + \nu_{\sigma_p}^2}}, \quad (6)$$

где коэффициент запаса прочности (из расчёта на прочность) $k = \frac{\bar{\sigma}_{npred}}{\bar{\sigma}_p}$; коэффициент вариации предельных напряжений

$\nu_{\sigma_{npred}} = \frac{\sigma_{\sigma_{npred}}}{\bar{\sigma}_{npred}}$; коэффициент вариации рабочего напряжения $\nu_{\sigma_p} = \frac{\sigma_{\sigma_p}}{\bar{\sigma}_p}$.

Вероятность разрушения (внезапного прочностного отказа)

$$Q(t) = 1 - P_s(t). \quad (7)$$

Показателем для оценки надёжности (безотказности) детали двигателя является интенсивность отказов λ , 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 режиме.

Напряжения в детали от центробежных сил на режимах работы двигателя приближённо можно оценить по формуле

$$(\sigma_p)_{p.э} = (\sigma_p)_{\max} \frac{\omega_{p.э}^2}{\omega_{\max}^2}, \quad (8)$$

где $(\sigma_p)_{p.э}$ и $\omega_{p.э} = a_p \cdot \omega_{\max}$ – напряжение в детали и угловая скорость на рассматриваемом режиме эксплуатации; $(\sigma_p)_{\max}$ и ω_{\max} – напряжение и угловая скорость на максимальном (взлетном) режиме; a_p – коэффициент режима.

В первом приближении можно считать, что статистические разбросы прочности $\nu_{\sigma_{пред}}$ и рабочего напряжения ν_{σ_p} не зависят от режимов работы двигателя (на всех режимах эксплуатации $\nu_{\sigma_{пред}} = const$ и $\nu_{\sigma_p} = const$), т.е. функция вероятностей $F(x)$ зависит только от коэффициента запаса прочности.

Коэффициент запаса прочности в режиме эксплуатации вычисляем по формуле

$$k_{p.э} = \frac{\sigma_{пред}}{(\sigma_p)_{p.э}} = \frac{\sigma_{пред}}{(\sigma_p)_{\max}} \cdot \frac{(\sigma_p)_{\max}}{(\sigma_p)_{p.э}} = \frac{k_{взл}}{a_p^2},$$

где $k_{взл}$ – коэффициент запаса на взлётном режиме.

Определив по зависимости (6) коэффициент однородности γ , по таблицам соответствующий интеграл вероятности $F(\gamma)$, по формулам (5) вероятность неразрушения детали и (7) вероятность разрушения на каждом режиме работы двигателя, находим интенсивность отказов детали за 1 ч работы двигателя:

$$\lambda = \left(\sum_1^{n_p} Q(t)_{p.э} \cdot \bar{t}_{p.э} \right) / t \quad [\text{ч}^{-1}], \quad (9)$$

где n_p – количество режимов эксплуатации двигателя; $Q(t)_{p.э}$ – вероятность отказа (разрушения) детали на данном режиме работы двигателя; $\bar{t}_{p.э} = \frac{t_{p.э}}{t}$ – относительная наработка на рассматриваемом режиме; $t_{p.э}$ – наработка на рассматриваемом режиме; t – суммарная наработка изделия в эксплуатации.

Из вышеизложенного следует, что для оценки показателей надёжности деталей двигателя при статическом нагружении необходимо уметь определять среднеквадратическое отклонение σ_{σ_p} возникающих в детали напряжений.

Среднеквадратическое отклонение σ_{σ_p} можно найти несколькими способами: методом малых возмущений, с помощью модуля “Probabilistic Design System” (PDS) в пакете конечно-элементного анализа ANSYS и др. 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, определяющие рассеивание «выходного» параметра при наличии рассеивание «входных» параметров.

Сравнение двух методов и пример их использования приводятся в [6]. В настоящей работе будем использовать программный пакет ANSYS, а в качестве примера, рассмотрим рабочее колесо турбины ТРДД НК–8–4 самолета Ил-62.

На надёжность работы диска ГТД влияют разнообразные факторы. Но среди них можно выделить наиболее очевидные, которые могут оказывать наибольшее воздействие на надёжность работы. При производстве эти параметры невозможно выдерживать точными, поэтому на них назначаются допуски с учётом достижений современной технологии, затрат на изготовление и стоимости окончательного изделия, условий сборки, оптимальной работы и т.д. Если бы не было допусков, разброса параметров и условий работы, то изделие работало бы безотказно. Но в действительности допуски на параметры могут сложиться самым неблагоприятным образом, что приводит к потере работоспособности изделия.

Проведя анализ работы диска турбины двигателя НК-8-4, мы выделили следующие параметры, которые наиболее очевидно оказывают влияние на работоспособность диска и являются удобными для замеров:

- геометрические размеры;
- частота вращения;

– плотность материала диска.

Рассмотрим влияние допусков на размеры, частоту вращения и плотность материала диска на его показатели надёжности. Для того чтобы иметь возможность проводить вероятностные расчёты, исследовать влияние возмущающих факторов на интересующий нас параметр, сначала необходимо создать параметрическую модель рассчитываемой детали и рассчитать её на прочность. Модель сектора рабочего колеса и графическое отображение результата расчёта на прочность представлены на рис.1.

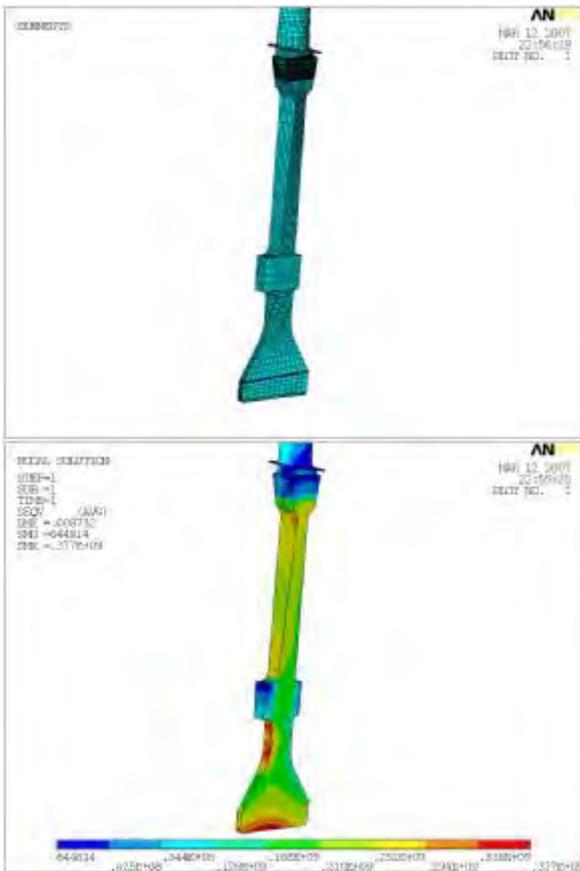


Рис. 1. Конечно-элементная модель диска и распределение эквивалентных напряжений

Проведем расчёт показателей надёжности для варианта с установленными допусками. В результате расчёта в программе ANSYS был получен интегральный нормальный закон распределения рабочего напряжения, среднеквадратическое отклонение которого равно $\sigma_{\sigma_p} = 28.7$ МПа.

По формулам, приведенным в [6], найдём интенсивность отказов двигателя $\lambda = 2.378 \cdot 10^{-10}$ 1/ч. Полученное значение интенсивности отказов меньше величины

$1 \cdot 10^{-9}$ 1/ч, следовательно, диск отвечает мировым требованиям по надёжности.

Для лучшей обработки результатов и упрощения расчетов были приняты следующие допущения:

- 1) основные размеры замка и лопатки остаются неизменными;
- 2) при изменении допуска на один параметр допуски на другие параметры остаются неизменными.

Сначала проанализируем влияние допусков геометрических размеров. Выберем в качестве проверочных следующие размеры диска (рис.2):

- наружный диаметр диска $D_{нар}$;
- наружный D_1 и внутренний D_2 диаметры места под болты;
- ширина места под болты H ;
- диаметр ступицы $D_{ст}$.

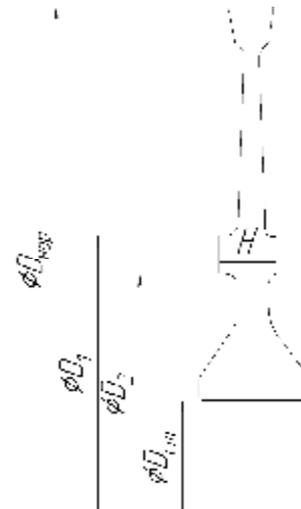


Рис. 2. Геометрические размеры, выбранные для анализа

Далее будем изменять допуски на размеры и вычислять интенсивность отказов для каждого случая.

На рис.3 приведено графическое отображение результатов расчета влияния допусков размеров на интенсивность отказов. Видно, что из геометрических размеров, выбранных для анализа, наиболее влиятельным является диаметр ступицы диска.

Теперь рассмотрим влияние частоты вращения ротора высокого давления на показатели надёжности диска. Частота вращения ротора ВД двигателя НК-8-4 на крейсерском режиме составляет 6850^{+90}_{-80} об/мин.

Результаты расчёта представлены графически на рис.4.

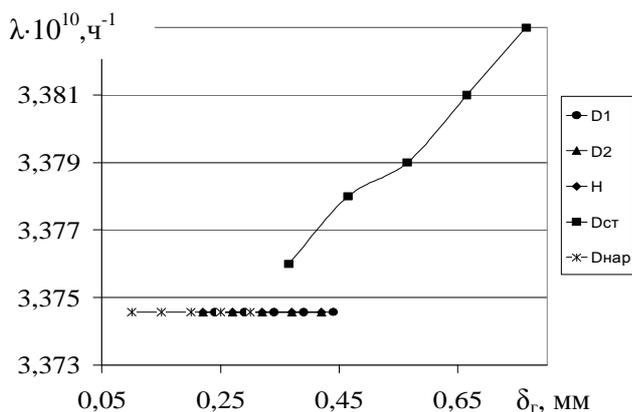


Рис. 3. Изменение интенсивности отказов при изменении допусков δ_r на размеры

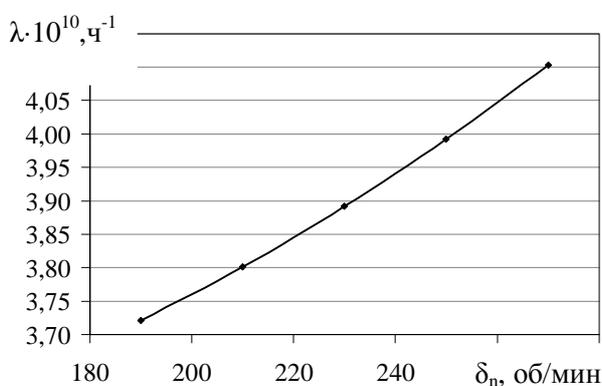


Рис.4. Изменение интенсивности отказов при изменении допуска δ_n частоты вращения

Аналогичным образом рассмотрим влияние плотности материала, на который также существует допуск. Результаты расчёта представлены на рис.5.

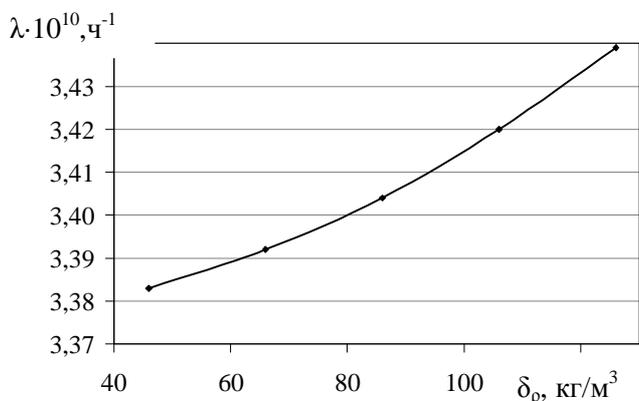


Рис.5. Изменение интенсивности отказов при изменении допуска δ_p на плотность материала

Как видно из результатов расчёта, влияние допусков всех параметров на пока-

затели надёжности практически одинаково. Интенсивность отказов во всех случаях увеличивалась с увеличением допуска на размер. В случае с геометрическими размерами, увеличение допусков не приводит к значительному изменению интенсивности отказов. Из геометрических размеров можно выделить лишь диаметр ступицы, который влияет на надёжность работы диска наибольшим образом. Остальные размеры слабо влияют на работу диска, однако нужно помнить, что это при условии, что остальные параметры диска остаются неизменными. То же можно сказать о влиянии частоты вращения и плотности материала – интенсивность отказов возрастает при увеличении допуска на данные параметры.

Таким образом, можно заключить, что на показатели надёжности диска, в частности, интенсивность отказов, наибольшее влияние оказывают три параметра: плотность материала, частота вращения и диаметр ступицы. Допуски на эти параметры нужно тщательно продумывать и назначать их как можно точнее. В противном случае данные факторы в сочетании с другими могут привести к «плачевным» результатам, выраженным как в экономических потерях, так и в гибели людей. Другие параметры оказывают меньшее влияние, но если предположить, что таких параметров было бы не 4, а 100 или 200, то все вместе они оказали бы колоссальное воздействие на работоспособность изделия.

Библиографический список

1. Белоусов, А.И., Биргер И. А. Прочностная надёжность деталей турбомашин: Учеб. Пособие / А.И. Белоусов, И.А. Биргер. – Куйбышев: КуАИ, 1983. – 75с.
2. Косточкин, В.В. Надёжность авиационных двигателей и силовых установок: Учебник для студентов / В.В. Косточкин. – М: Машиностроение, 1976. – 248с.
3. Акимов, В.М. Основы надёжности газотурбинных двигателей: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / В.М. Акимов. – М.: Машиностроение, 1981.– 207с.
4. Скубачевский, Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей: Учебник для студентов авиационных вузов / Г.С. Скубачевский.– М.: Машиностроение, 1974. – 520 с.

5. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и размеров сортамента: Справочник / Под ред. С.О. Охупкина. – М.: Машиностроение, 1970. -568 с.

6. Белоусов, А.И. Оценка параметров прочностной надежности деталей ДЛА на этапе проектирования: Учебное пособие. / А.И. Белоусов, А.В. Грицин. - Самара: СГАУ, 2006 – 115с.

References

1. Belousov A.I., Birger I.A. Strength reliability of turbomachine parts: Tutorial. – Kuybyshev: KuAI, 1983. - 75 pages.

2. Kostochkin V.V. Reliability of aircraft engines and power plants: Tutorial for students. – Moscow: Mashinostroyeniye (Machine building), 1976.-248 pages.

3. Akimov E.M. Fundamentals of reliability of gas turbine engines: Tutorial for student of machine building specialty. – Moscow: Mashinostroyeniye (Machine building), 1981.-207 pages.

4. Skubachevskiy G.S. Aircraft gas turbine engines. Construction and calculation parts: Tutorial for students of aircraft institute of higher education – Moscow: Mashinostroyeniye (Machine building), 1974. – 520 pages.

5. Probabilistic characteristics of aircraft materials strength and range sizes: Reference book. Edited by S.O. Ohapkina – Moscow: Mashinostroyeniye (Machine building), 1970. – 568 pages.

6. Belousov A.I., Gritsin A.V. Estimation strength reliability parameters of aircraft engine units on the design stage: Tutorial. – Samara:SSAU, 2006 – 115 pages.

ESTIMATION THE FACTORS, MAKE THE GREATEST INFLUENCE ON RELIABILITY PARAMETRES OF A GTD DISK WITH A GLANCE SUDDEN FAILURES

© 2009 A. I. Belousov, A. V. Gritsin

Samara State Aerospace University

In this work the methodology of an estimation of parameters of reliability GTD with a glance sudden failures is presented. By this methodology the analysis of influence of the limit of the geometrical sizes, rotating frequency and disk material density on failure rate is carried out.

Reliability, failure rate, reliability parameter, turbine disk, finite element method

Информация об авторах

Белоусов Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры Конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: aibelousov@mail.ru. Область научных интересов: динамика и прочность, надежность авиационных и ракетных двигателей, конструкция ракетных двигателей.

Грицин Алексей Валерьевич, инженер-конструктор, аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: grialeksey@gmail.com. Область научных интересов: надежность двигателей летательных аппаратов.

Belousov Anatoliy Ivanovich, doctor of technical sciences, professor of department of the Construction and designing of the aircraft engines of Samara State Aerospace University. E-mail: aibelousov@mail.ru. Area of research: dynamics and durability, reliability of the aircraft and rocket engines, construction of the rocket engines.

Gritsin Aleksey Valerevich, engineer-designer, postgraduate student of Samara State Aerospace University. E-mail: grialeksey@gmail.com. Area of research: reliability of the aircraft and rocket engines.