

## Предисловие

В связи с увеличивающимися требованиями по обеспечению высокой надёжности авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) всё большее значение приобретают методы параметрического контроля их технического состояния, в том числе и с использованием ЭВМ. Методы параметрического контроля технического состояния авиационных ГТД в процессе стендовых испытаний и эксплуатации рассмотрены во многих отечественных и зарубежных работах [3, 4, 11, 13–23, 25, 33, 35, 36, 39, 41, 42]. Однако в ряде работ приведены методы параметрического контроля для конкретных типов двигателей.

Эффективность методов параметрического контроля серийных двигателей как при стендовых испытаниях, так и в эксплуатации могут быть значительно улучшены применением методов математической статистики, позволяющей выявить закономерности изменения параметров двигателей.

В настоящее время нет ни одной книги, рассматривающей в совокупности вопросы параметрического контроля технического состояния авиационных ГТД. Автор надеется, что настоящее пособие поможет восполнить этот недостаток.

Настоящая книга направлена на то, чтобы дать читателю сведения о методах параметрического контроля технического состояния авиационных ГТД в процессе стендовых испытаний и эксплуатации.

Книга состоит из трёх частей.

В первой части книги (главы 1–4) рассмотрены общие вопросы технического контроля и технической диагностики авиационных двигателей.

В главе 1 рассмотрены понятия технического контроля и технической диагностики и их взаимосвязь, а также дефекты, неисправности и отказы авиационных ГТД.

В главе 2 рассмотрены задачи технической диагностики ГТД и методы их решения.

В главе 3 рассмотрена параметрическая контролепригодность ГТД и её показатели (критерии).

В главе 4 приведены контролируемые параметры ГТД при стендовых испытаниях и в эксплуатации, рассмотрена их информативность, точность измерения и методы их регистрации.

Во второй части пособия (главы 5–15) рассмотрены вопросы параметрического контроля технического состояния авиационных ГТД при стендовых испытаниях.

В главе 5 рассмотрены вопросы измерения параметров ГТД при стендовых испытаниях, в том числе виды, методы и средства измерений, виды погрешности измерений, а также методы и способы уменьшения погрешностей измерения экспериментальных данных.

В главе 6 рассмотрена обработка экспериментальных данных по результатам испытаний ГТД, в том числе определение параметров рабочего процесса ГТД для разных типов двигателей. Рассмотрено влияние атмосферных условий на параметры ГТД, указаны стандартные атмосферные условия и методы приведения термогазодинамических параметров ГТД к стандартным атмосферным условиям.

В главе 7 указаны методы статистического определения уточняющих коэффициентов к формулам приведения.

В главе 8 рассмотрены методы построения дроссельной характеристики ТРДД по результатам испытаний различных типов двигателей. Указан метод построения индивидуальной дроссельной характеристики конкретного двигателя с использованием сводной дроссельной характеристики.

В главе 9 указаны методы определения основных технических данных авиационных ГТД различных типов двигателей по результатам стендовых испытаний ГТД.

В главе 10 рассмотрены методы построения сводной дроссельной характеристики серийных ГТД по результатам стендовых испытаний, включая определение, назначение и функции сводной дроссельной характеристики.

В главе 11 рассмотрены методы отладки серийных ГТД, и приведен подробный пример отладки ТРДД для самолётов гражданской авиации. Предложен метод совмещённой отладки ГТД на предъявительских и приёмно-сдаточных испытаниях для экономии энергоресурсов при испытаниях ГТД.

В главе 12 рассмотрены актуальные для серийного производства методы экспериментального и статистического сравнения испытательных стендов с использованием методов математической статистики.

В главе 13 рассмотрен экспериментально-статистический метод оценки влияния наработки в эксплуатации на характеристики ГТД, а также метод оценки влияния износа узлов с наработкой на характеристики ГТД.

В главе 14 рассмотрены актуальные для серийного производства методы оценки стабильности качества двигателей в процессе серийного производства, включая оценку эффективности вводимых мероприятий на стабильность качества серийно выпускаемых двигателей.

В главе 15 рассмотрены методы контроля и диагностирование технического состояния ГТД по термогазодинамическим параметрам при стендовых испытаниях с использованием корреляционных связей термогазодинамических и геометрических параметров ГТД и математической модели двигателя. Приведен алгоритм автоматизированного термогазодинамического анализа результатов испытаний ГТД.

В третьей части пособия (главы 16–26) рассмотрены вопросы параметрического контроля технического состояния авиационных ГТД в процессе эксплуатации.

В главе 16 рассмотрены общие вопросы параметрических методов технической диагностики ГТД в эксплуатации, а также вопросы автоматической регистрации и обработки параметров в эксплуатации, включая бортовые системы регистрации полётной информации и системы диагностирования (бортовые, наземные и наземно-бортовые).

В главе 17 рассмотрены вопросы контроля технического состояния узлов проточной части ГТД (компрессора, камеры сгорания, турбины) параметрическими методами.

В главе 18 рассмотрены требования и классификация математических моделей ГТД. Приведен пример простейшей математической модели и решения системы уравнений линейной математической модели.

В главе 19 рассмотрены методы диагностирования технического состояния проточной части ГТД с использованием математических моделей. Кратко описаны назначение, концепция построения системы и функциональные возможности программных комплексов «ГРАД» и DVIGw.

В главе 20 рассмотрено диагностирование технического состояния проточной части ГТД с использованием диагностических матриц, включая построение, применение и практическое использование диагностических матриц.

В главе 21 рассмотрены методы контроля технического состояния ГТД по параметрам вибрации экипажем в полёте и при наземном опробовании двигателя.

В главе 22 рассмотрены статистические методы контроля технического состояния ГТД в эксплуатации: методы распознавания технического состояния ГТД (метод Байеса и метод статистических решений: метод Неймана — Пирсона), а также статистическое сглаживание и контроль вибrosостояния ТРДД с использованием статистических методов и принятие решений по результатам контроля вибrosостояния и оценки технического состояния двигателя.

В главе 23 рассмотрены методы контроля выработки ресурса ГТД посредством оценки эквивалентной наработки двигателя в эксплуатации по регистрируемым параметрам, а также рассмотрено влияние условий эксплуатации на выработку ресурса.

В главе 24 рассмотрены методы контроля технического состояния по результатам наземного опробования. Приведен пример контроля технического состояния по результатам наземного опробования отечественного ТРДД и метод оценки и регулировки параметров ТРДД с большой наработкой в эксплуатации.

В главе 25 рассмотрены методы контроля технического состояния ТРДД по параметрической полётной информации на примере информационно-программной системы «Анализ-86». Приведены примеры решения отдельных задач контроля технического состояния.

В главе 26 рассмотрены различные методы контроля технического состояния деталей ГТД, омываемых маслом, в эксплуатации.

Автор благодарен коллективу кафедры реактивных двигателей и энергетических установок Казанского научно-исследовательского технического университета (КНИТУ-КАИ) за ценные советы и замечания при обсуждении пособия. В учебном пособии использованы результаты работ, выполненных автором самостоятельно и совместно с сотрудниками КПБМ «Авиамотор» А. Н. Королёвым, Т. А. Семёновой, Р. Ш. Юсуповым.

## **Введение. Технический контроль, техническая диагностика, виды технического состояния**

Для поддержания высокого уровня характеристик современных авиационных ГТД, достигнутых за счёт их технического усложнения, близкого к предельным уровням параметров термодинамического цикла, а также для обеспечения высоких показателей ГТД по надёжности и безопасности полётов необходима оценка и контроль технического состояния (ТС) каждого экземпляра ГТД как в процессе испытаний, так и в эксплуатации. Значительный рост ресурсов ГТД, внедрение методов эксплуатации по техническому состоянию (ЭТС) могут быть обеспечены также при оценке ТС каждого экземпляра ГТД. Контроль технического состояния ГТД необходим и для контроля стабильности серийного производства и ремонта авиационных двигателей.

Надёжность авиационных ГТД, безопасность и регулярность полётов в значительной степени обусловлены совершенством методов контроля технического состояния ГТД, позволяющих обнаруживать неисправности элементов ГТД на ранней стадии их развития.

*Технический контроль*, согласно [8], — это проверка соответствия продукции или процесса, от которых зависит качество продукции, установленным техническим требованиям. Следует отличать технический контроль от технического диагностирования, под которым, согласно [9], понимают «процесс определения технического состояния объекта диагностирования с определённой точностью». «Результатом диагностирования (технического диагноза) является заключение о техническом состоянии объекта с указанием, при необходимости, места, вида и причины дефекта» [9].

Контроль технического состояния ГТД осуществляется *техническим диагностированием*.

В общем смысле контроль — это процесс получения информации, состоящий в обнаружении происходящих в объекте контроля каких-либо событий [42].

В зависимости от этапа жизненного цикла технического изделия различают *производственный контроль* и *эксплуатационный контроль*.

*Производственный контроль* выполняется на этапе производства изделия и включает [43]:

- 1) контроль технических процессов (технологических сред, режимов, параметров, процессов);
- 2) операционный контроль продукции или процесса во время выполнения или после завершения определённой операции;
- 3) приёмочный контроль готовой продукции.

Под *эксплуатационным контролем* ГТД понимается технический контроль, осуществляемый на стадии его эксплуатации.

К основным видам эксплуатационного контроля ГТД относятся:

- 1) контроль целостности элементов узлов и систем ГТД визуальным осмотром и с помощью инструментальных средств и методов (бороскопов, уль-

тразвукового контроля, вихревокового контроля, рентгеноскопии и других методов неразрушающего контроля);

2) контроль параметров рабочего процесса ГТД с помощью различных инструментальных средств и методов (фотоэлектрических пиromетров для измерения бесконтактным методом температуры ( $T_{РЛ}$ ) рабочих лопаток (РЛ) турбины, электростатических зондов для обнаружения металлических частиц в потоке, ионизационных сигнализаторов горения в форсажной камере (ФК), специальных методов диагностического анализа шумов и вибраций ГТД (вибро-акустическая диагностика) и др.);

3) контроль параметров функционирующего ГТД на основных режимах его работы с использованием штатных приборов контроля;

4) периодический контроль правильности функционирования и исправного технического состояния ГТД с использованием штатных сигнализаторов, имеющихся на приборном пульте;

5) контроль с целью обнаружения отклонений в работе ГТД с использованием штатных бортовых средств контроля и средств предупредительной и аварийной сигнализации:

– в полёте с использованием информации средств сигнализаторов или специальных логических анализаторов информации бортовых средств контроля;

– на земле с использованием специальных устройств анализа полётной информации — экспресс-анализ информации бортовых регистраторов;

6) диагностика технического состояния ГТД, использующая с применением специальных диагностических алгоритмов совокупность полётной и наземной информации, а также результаты анализа ТС рабочих жидкостей (топлива, масла) и органолептического контроля.

К параметрическим методам контроля относятся методы, указанные в пунктах 3–6, включающие и вибродиагностику ГТД, и контроль ТС деталей ГТД, омыываемых маслом.

Контроль выполняется в три этапа:

1) получение информации о фактическом техническом состоянии ГТД (первичной информации);

2) обработка первичной информации, которая включает:

– исключение сбойной (недостоверной) информации,

– анализ информации по заданным алгоритмам контроля,

– сопоставление результатов анализа информации с установленными требованиями, нормами, критериями;

3) представление результатов контроля.

*Техническое состояние* объекта, в свою очередь, определяется как «совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта, характеризуемая в определённый момент времени признаками, установленными технической документацией на этот объект» [10]. «*Вид технического состояния изделия*», в свою очередь, определяется как «категория технического состояния, характеризуемая соответствием или несоответствием

качества объекта определённым техническим требованиям, установленным технической документацией на этот объект» [9].

Различают виды технического состояния: *исправность и неисправность, работоспособность и неработоспособность, правильное функционирование и неправильное* [9].

Под *функционированием* объекта следует понимать «*выполнение* предписанного объекту *алгоритма функционирования* при применении объекта по назначению».

*Исправность* — «*состояние* объекта, при котором он *соответствует* всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации» (НТД).

*Неисправность* — «*состояние* объекта, при котором он *не соответствует* хотя бы одному из требований НТД».

*Работоспособность* — «*состояние* объекта, при котором *значения всех параметров*, характеризующие способность выполнять заданные функции, *соответствуют* требованиям НТД».

*Неработоспособность* — «*состояние* объекта, при котором *значение хотя бы одного параметра*, характеризующего способность выполнять заданные функции, *не соответствует* требованиям НТД».

*Правильное функционирование* — «*вид технического состояния*, в котором применяемое по назначению изделие в целом или его составная часть *выполняют в текущий момент* времени предписанные им *алгоритмы функционирования* со значениями параметров, соответствующими установленным требованиям».

В технической диагностике рассматриваются следующие задачи:

- а) определение и виды технического состояния;
- б) прямые и обратные задачи технического диагностирования (ТД) ГТД;
- в) принципы построения алгоритмов технического диагностирования;
- г) контролепригодность ГТД, критерии контролепригодности и требования к контролепригодности ГТД;
- д) основные методы и средства ТД ГТД: методы и средства инструментального контроля ТС ГТД, параметрические методы ТД;
- е) методы и средства ТД ГТД при стендовых испытаниях;
- ж) методы и средства виброакустической диагностики ГТД;
- з) диагностирование ТС деталей ГТД, омываемых маслом;
- и) диагностирование ТС ГТД по термогазодинамическим параметрам (ТГДП), разработка и использование математических моделей (ММ) и диагностических матриц (ДМ);
- к) диагностирование ТС ГТД по полётной информации;
- л) системы диагностирования;
- м) контроль ТС ГТД по наземной и полётной информации.

В настоящем пособии рассмотрены основные детерминированные и параметрические методы контроля и диагностирования технического состояния авиационных газотурбинных двигателей в процессе стендовых испытаний и эксплуатации, основанные на обработке и анализе измеряемых параметров двигателей.

## Основные условные обозначения и индексы

### Сокращения

АДТ	— агрегат дозировки топлива;
АЦПУ	— алфавитно-цифровое устройство для печати;
АУ	— атмосферные условия;
БАЗ	— блок агрегата запуска;
БД	— база данных;
БСКД	— бортовая система диагностирования двигателя;
БСРПД	— бортовая система регистрации полётных данных;
ВСУ	— высотно-скоростные условия; вспомогательная силовая установка;
ВСХ	— высотно-скоростные характеристики;
ГА	— гражданская авиация;
ГВТ	— газовоздушный тракт;
ГГ	— газогенератор;
ГДУ	— газодинамическая устойчивость компрессора;
ГСМ	— горюче-смазочные материалы;
ГТД	— газотурбинный двигатель;
ГТД СТ	— газотурбинный двигатель со свободной турбиной;
ДМ	— диагностическая матрица;
ДМП	— динамометрическая платформа;
ДС	— диагностическое сообщение;
ДХ	— дроссельная характеристика;
ДХАС	— дроссельная характеристика акта сдачи;
ЗИП	— запас инструментов и приспособлений;
ИВ	— измеряемая величина;
ИДХ	— индивидуальная дроссельная характеристика;
ИКМ	— измеритель крутящего момента;
ИПС	— информационно-программная система;
ИС	— испытательный стенд, информационное сообщение;
КВД	— компрессор высокого давления;
КНД	— компрессор низкого давления;
КНИТУ	— Казанский научно-исследовательский технический университет;
КПВ	— клапан перепуска воздуха;
КПД	— коэффициент полезного действия;
КС	— камера сгорания;
ЛА	— летательный аппарат;
ЛД	— лаборатория диагностики;
ЛММ	— линейная математическая модель;
ЛРР	— линия рабочих режимов;
МГ	— режим малого газа;
МЛ	— магнитная лента;

ММ	— математическая модель;
ММО	— метод малых отклонений;
МНК	— метод наименьших квадратов;
МО	— математическое обеспечение, математическое ожидание;
МП	— максимальный продолжительный режим;
МСРП	— магнитный самопищий регистратор параметров;
НА	— направляющий аппарат компрессора;
НЗП	— нормальное значение параметра;
НММ	— нелинейная математическая модель;
НТД	— нормативно-техническая документация;
НТП	— неравномерность температурного поля;
ОДХ	— отладочная дроссельная характеристика;
ОП	— обобщённый параметр;
ОПЦ	— обобщённый полётный цикл;
ОСС	— ограничитель степени сжатия;
ОТД	— основные технические данные;
ПИ	— приёмочные испытания;
ПМД	— параметрические методы диагностирования;
ПОС	— противообледенительная система;
ПСИ	— приёмо-сдаточные испытания;
РАУ	— расчётные атмосферные условия;
РК	— разовая команда;
РЛ	— рабочие лопатки турбины;
РНА	— рабочий направляющий аппарат;
РТЭ	— руководство по технической эксплуатации;
РС	— реактивное сопло;
РСТ	— регулятор средней температуры;
РУД	— рычаг управления двигателем;
РУР	— рычаг управления реверсом;
СА	— сопловой аппарат, стандартная атмосфера;
САР	— система автоматического регулирования;
САУ	— стандартные атмосферные условия;
СГАУ	— Самарский государственный аэрокосмический университет;
СД	— система диагностирования;
СДХ	— сводная дроссельная характеристика;
СИ	— стендовые испытания;
СКО	— среднее квадратичное отклонение;
СССТ	— статистическое сравнение стендов;
СТ	— свободная турбина;
СУ	— силовая установка;
СФД	— система функционального диагностирования;
ТВД	— турбовинтовой двигатель; турбина высокого давления;
ТГДП	— термогазодинамический параметр;
ТД	— техническая диагностика;

ТДХ	— текущая дроссельная характеристика;
ТМР	— топливомасляный радиатор;
ТН	— техническая норма;
ТНД	— турбина низкого давления;
ТО	— техническое обслуживание;
ТП	— температурное поле;
ТПЦ	— типовой полётный цикл;
ТРДД	— двухконтурный турбореактивный двигатель;
ТС	— техническое состояние;
ТУ	— технические условия;
УВЗ	— установка воздушного запуска;
УГАТУ	— Уфимский государственный авиационный технический университет;
ФДХ	— формулярная дроссельная характеристика;
ФК	— форсажная камера;
ФН	— фактическая наработка;
ХП	— холодная прокрутка;
ЦБР	— центробежный регулятор оборотов;
ЦИАМ	— Центральный институт авиационного моторостроения;
ЭН	— эквивалентная наработка;
ЭРО	— электронный регулятор оборотов;
ЭСУД	— электронная система управления двигателем;
ЭТС	— эксплуатация по техническому состоянию;
ЭЦИ	— эквивалентно-циклические испытания.

### Условные обозначения

$A_t$	— пропускная способность турбины;
НД	— низкое давление;
$\Pi$	— параметр;
$\Pi_0$	— удельная повреждаемость, 1/ч;
$\bar{\Pi}$	— среднее арифметическое значение параметра;
$a$	— скорость звука, м/с; свободный член регрессии;
$b$	— угловой коэффициент регрессии;
$C$	— стоимость; затраты; расходы; скорость истечения газа из реактивного сопла, м/с;
$C_{уд}$	— удельный расход топлива, кг/кгс·ч;
$C_e$	— эффективный удельный расход топлива турбовального (турбовинтового) двигателя, кг/кВт·ч;
$c_p$	— теплоёмкость, Дж/(кг·град);
$D$	— диагноз технического состояния; диаметр, м; повреждаемость детали;
$d$	— абсолютная влажность;
$E$	— частная погрешность результата косвенного измерения;
$F$	— площадь, м <sup>2</sup> ; сила, Н; функция эмпирического распределения, критерий дисперсионного анализа;

$F(x)$	— интегральная функция распределения;
$f$	— функция; число степеней свободы;
$G_{\text{в}}$	— массовый расход воздуха, кг/с; масла, кг/мин;
$G_{\text{г}}$	— массовый расход газа, кг/с;
$G_{\text{дв}}$	— масса двигателя, кг;
$G_{\text{т}}$	— массовый расход топлива, кг/ч;
$g$	— ускорение свободного падения, $\text{м/с}^2$ , критерий Кохрана;
$H$	— энтропия, геометрическая высота, м, км;
$H_b$	— барометрическая высота, м;
$H_{\text{г}}$	— геопотенциальная высота, м;
$H_u$	— низшая удельная теплота сгорания топлива, Дж/кг;
$h_{\text{лон}}$	— высота лопатки, мм;
$i$	— сигнал (разовая команда);
$J$	— количество информации о техническом состоянии объекта;
$K$	— коэффициент; критерий; класс точности прибора;
$K_y$	— запас устойчивости компрессора;
$K_{x, y}$	— относительный коэффициент влияния погрешности;
$k$	— показатель адиабаты; уровень повреждений; признак состояния объекта;
$L$	— работа, Дж/кг; дальность полёта, км;
$L_s$	— адиабатическая работа;
$L_0$	— количество воздуха, теоретически необходимое для полного сжигания 1 кг топлива, кг возд/кг топл;
$l$	— множество элементов;
$M$	— число Маха;
$M_{\text{кр}}$	— крутящий момент;
$M[x]$	— математическое ожидание;
$N$	— мощность, общее число параметров, элементов, неисправностей, состояний объекта; повреждаемость диска турбины;
$N_e$	— эффективная мощность, кВт;
$N_{\text{э}}$	— эквивалентная мощность, кВт;
$n$	— частота вращения, об/мин; количество элементов, параметров, неисправностей, состояний объекта; порядковый номер;
$P$	— тяга, Н;
$P_c$	— коэффициент тяги;
$p$	— вероятность; статическое давление, Па, кгс/см <sup>2</sup> ; порядок регрессионной зависимости; параметр Ларсона — Миллера;
$p^*$	— давление заторможенного потока, Па (мм рт. ст.);
$p(x)$	— плотность вероятностей, дифференциальная функция распределения;
$\Delta p$	— перепад давления, Па, кгс/см <sup>2</sup> ;
$Q$	— количество тепла, ккал;
$q$	— вероятность отказа; уровень значимости; поправка;
$q_{\text{т}}$	— относительный расход топлива;
$q(\lambda)$	— газодинамическая функция расхода газа;

$R$	— газовая постоянная, кДж/(кгК); критерий корреляционного анализа исключения грубых ошибок; коэффициент множественной корреляции; назначенный ресурс, ч, ц;
$R_{\text{и}}$	— коэффициент использования реверса;
$R_{\text{рев}}$	— коэффициент реверсирования;
$Re$	— число Рейнольдса;
$R^2$	— коэффициент корреляции;
$r$	— критерий Хальда —Аббе;
$r_{j0}$	— коэффициент парной корреляции;
$S$	— энтропия, кДж/кг; объект диагностирования; абсолютная чувствительность средства измерения; среднее квадратичное отклонение;
$S_k$	— сглаженное значение $k$ -го измерения;
$S^2(x)$	— выборочная дисперсия;
$T$	— наработка до отказа, время работы, температура, К; трудозатраты, Ресурс, ч, ц;
$t$	— температура, °С; время; квантиль распределения Стьюдента;
$t_{\text{огр}}$	— температура ограничения;
$U$	— вектор режимных параметров;
$U$	— напряжение питания, критерий исключения грубых ошибок; окружная скорость, м/с;
$V$	— скорость, м/с; виброскорость, мм/с;
$V_b$	— базовое значение виброскорости, мм/с;
$V_m$	— уровень масла в баке, л;
$V_o$	— опорное значение виброскорости, мм/с;
$V_{\text{пр}}$	— приборная скорость, м/с;
$\hat{u}$	— оценка фактического момента изменения свойств контролируемого параметра;
$u$	— фактический момент изменения свойств контролируемого параметра;
$W$	— множество управляющих переменных;
$W_{\text{п}}$	— прокачка масла, л/мин;
$X$	— вектор параметров схемы;
$\bar{x}$	— параметр; аргумент; независимая переменная;
$\bar{x}$	— выборочное среднее значение;
$Y$	— вектор констант;
$Y$	— множество выходных сигналов;
$Z$	— вектор выходной информации;
$z$	— нормированная случайная величина;
$z_{\gamma}$	— квантиль нормированного нормального распределения для вероятности $\gamma$ ;
$\alpha$	— доверительная вероятность; коэффициент регуляризации; положение рычага управления, град; угол атаки самолёта, град; постоянная сглаживания;
$\alpha_0$	— коэффициент избытка воздуха;

$\beta$	— коэффициент доверия;
$\chi^2$	— критерий Пирсона;
$\gamma$	— доверительная вероятность;
$\gamma_d$	— предел допускаемой приведенной основной погрешности;
$\Delta$	— абсолютная погрешность, отклонение, диапазон измерения, не-вязка; абсолютное отклонение;
$\Delta r$	— величина радиального зазора, мм;
$\delta$	— относительная погрешность, относительное отклонение, критерий регрессионного анализа исключения грубых ошибок, допуск;
$\delta v$	— утечки воздуха (газа);
$\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$	— коэффициент влияния $i$ -го параметра узла на $j$ -й параметр двигателя ля;
$\varepsilon$	— внешнее возмущение;
$\eta_r$	— коэффициент полноты сгорания топлива;
$\eta^*$	— коэффициент полезного действия;
$\eta_e$	— термический КПД ГТД;
$\varepsilon$	— внешние возмущения;
$\Phi$	— нормированная функция Лапласа;
$\phi$	— критерий эффективности выявления неисправности;
$\varphi$	— относительная влажность, угол установки лопаток, град; угол установки винта, град;
$\varphi(z)$	— дифференциальная функция нормированного нормального распределения;
$\lambda$	— параметр $\gamma$ -распределения, интенсивность отказа, приведенная скорость;
$\lambda_{1-q}$	— критерий Колмогорова;
$\lambda_{\text{тепл}}$	— коэффициент теплопроводности;
$\mu$	— параметр логарифмически нормального распределения, математическое ожидание случайной величины;
$\mu_c$	— коэффициент расхода сопла;
$\nu$	— кинематическая вязкость газа;
$\pi^*$	— степень повышения (понижения) давления;
$\pi(\lambda)$	— газодинамическая функция;
$\Theta$	— параметр узла двигателя;
$\theta$	— систематическая погрешность, степень подогрева воздуха в двигателе;
$\rho$	— плотность;
$\sigma$	— среднеквадратичное отклонение, коэффициент восстановления полного давления, коэффициент гидравлических потерь;
$\sigma_{\text{кс}}$	— коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания;
$\sigma_{\text{са}}$	— коэффициент гидравлических потерь в сопловом аппарате турбины;
$\sigma[x]$	— среднее квадратичное отклонение;
$\sigma^2[x]$	— дисперсия;

$\sigma_3$	— напряжение в опасном сечении рабочей лопатки на эквивалентном режиме;
$\sigma_{3,pr}$	— эквивалентный предел длительной прочности;
$\tau(\lambda)$	— газодинамическая функция;
$\tau_p$	— долговечность до разрушения, ч;
$\tau_{\text{экв}}$	— эквивалентная наработка, ч;
$\omega$	— круговая частота;
$\omega(t)$	— параметр потока отказов;
$\xi$	— случайная величина;
$\xi$	— коэффициент трения.

### Индексы

$v$	— воздух, вход, винт, сечение перед компрессором;
$V_B$	— верхняя граница возможного уровня;
$V_D$	— верхняя граница допустимого уровня;
$v_{3L}$	— взлётный режим;
$V_D$	— ротор высокого давления;
$v_n$	— вентилятор;
$VNA$	— входной направляющий аппарат;
$v_{sp}$	— вспомогательный;
$v_X$	— вход, входной;
$v_{YX}$	— выход; выходной;
$g$	— сечение перед турбиной;
$d$	— диагностирование;
$d_V$	— двигатель;
$d_{op}$	— допустимое значение;
$e$	— эффективный;
$z_{ip}$	— запас инструментов и приспособлений;
$z_o$	— задняя опора;
$i$	— использование;
$izm$	— измеренное значение;
$k$	— компрессор;
$kr$	— крейсерский режим, критическое значение;
$ks$	— камера сгорания;
$lop$	— лопатка;
$m$	— масло;
$m_{ob}$	— маслобак;
$mg$	— малый газ;
$na$	— направляющий аппарат;
$nauch$	— начальное значение;
$NB$	— нижняя граница возможного уровня;
$ND$	— нижняя граница допустимого уровня;
$norm$	— нормальное значение параметра;
$obr$	— обратная тяга;

опр	— опробование двигателя;
осн	— основной;
оц	— оценочное значение параметра;
п	— полёт, прокачка;
по	— передняя опора;
повр	— повреждение;
ппр	— после последнего ремонта;
пр	— приведенное к стандартным атмосферным условиям значение параметра;
расч	— расчётное значение параметра;
рев	— реверс;
реж	— режим;
РЛ	— рабочая лопатка;
РВД	— ротор высокого давления;
РНД	— ротор низкого давления;
рт	— рычаг управления агрегатом дозировки топлива;
РУД	— рычаг управления двигателем;
с	— реактивное сопло;
са	— сопловой аппарат;
скв	— система кондиционирования воздуха;
т	— топливо, сечение за турбиной;
тепл	— теплопроводность;
тнд	— турбина низкого давления;
то	— техническое обслуживание;
тф	— топливная форсунка;
уд	— удельный;
физ	— физический;
форм	— формуляр;
цб	— центробежный;
э	— элемент двигателя;
экв	— эквивалентный, эквивалентный режим;
max	— максимальное значение;
<i>P</i>	— оператор;
$\Sigma$	— суммарный;
1	— сечение на входе в двигатель;
2	— сечение за компрессором;
4	— сечение перед турбиной;
6	— сечение за турбиной двигателя;
30	— $30^{\circ}\text{C}$ .

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)