

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО НАДЕЖНОСТИ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

2011

САМАРА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО НАДЕЖНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ

САМАРА

2011

УДК

ББК

Белоусов А.И.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО НАДЕЖНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ : Учеб. пособие / Сост. А.И.Белоусов - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. - 68 с.; ил.

В учебное пособие включены методические указания по выполнению лабораторных работ по надежности авиационных двигателей и энергетических установок.

Учебное пособие предназначено для студентов факультета двигателей летательных аппаратов, обучающихся по специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки", при изучении курса «Надежность АД и ЭУ». Подготовлено на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

ДК

ББК

© Белоусов А.И., 2011

© Самарский государственный

аэрокосмический университет, 2011

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 «ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА
АВИАЦИОННЫХ ГТД»**

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1 Цель занятия.....	5
2 Порядок выполнения работы.....	5
3 Ресурс двигателей, принципы установления ресурса.....	5
4 Основные факторы, определяющие ресурс двигателей.....	8
5 Влияние условий эксплуатации на ресурс ГТД.....	12
6 Контрольные задания.....	15
7 Контрольные вопросы.....	21
8 Список использованных источников.....	22
9 Приложение А.....	23
10 Приложение Б.....	24

1 ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ

Целью занятия является ознакомление студентов с основными факторами, определяющими ресурс двигателя и изучение влияния условий эксплуатации на ресурс ГТД.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с содержанием лабораторной работы, обращая внимание на иллюстрации и таблицы.
2. Ответить на контрольные вопросы, приведённые в конце работы.
3. Решить по указанию преподавателя контрольные задания, для чего необходимо изучить приложения.
4. Сделать выводы по результатам расчётов.

3 РЕСУРС ДВИГАТЕЛЕЙ, ПРИНЦИПЫ УСТАНОВЛЕНИЯ РЕСУРСА

Одним из основных показателей надёжности двигателей, влияющим на экономичность эксплуатации, является их ресурс.

Ресурс определяется как наработка двигателя до достижения им определённого состояния, при котором дальнейшая эксплуатация невозможна или нежелательна из-за снижения эффективности, либо возросшей опасности для человека.

Ниже будет рассматриваться только второй ограничитель ресурса – прочностная надёжность двигателей. В этом случае ресурс можно определить как время безотказной работы основных деталей и узлов,

разрушение которых приводит к потере работоспособности всего двигателя. Как правило, такими деталями являются лопатки и диски турбин и компрессоров, валы, корпуса камеры сгорания. Так как время до разрушения у разных деталей различно, то ресурс назначается по детали, имеющей наименьшее время безотказной работы.

До исчерпания ресурса парка двигателей могут иметь место дефекты отдельных деталей в некоторых двигателях. Такие дефекты являются не ресурсными и вызываются, как правило, технологическими отклонениями в производстве. Основным признаком не ресурсного дефекта является проявление его вне зависимости от наработки двигателей в эксплуатации, в то время как ресурсные дефекты начинают проявляться в массовом количестве только после определённой и примерно одинаковой наработки.

Ресурс двигателей закладывается при проектировании, обеспечивается в процессе производства, достигается при доводке, реализуется и повышается в эксплуатации.

Проблема обеспечения ресурса двигателей комплексная и включает в себя не только вопросы обеспечения прочностной надёжности деталей двигателя, но и вопросы проверки, теоретического и экспериментального доказательства, что этот ресурс у двигателя существует. По существу проблема доказательства ресурса не менее важна и актуальна, чем проблема создания самого двигателя.

Основы методов теоретической и экспериментальной проверки ресурса авиационных двигателей заложены в работах таких советских учёных и авиаконструкторов, как И. А. Биргер, Р. С. Киносашвили, Н. Д. Кузнецов, А. А. Микулин, В. И. Цейтлин.

В практике авиационного двигателестроения используются следующие виды ресурса:

- назначенный ресурс;
- гарантийный ресурс;
- ресурс до первого капитального ремонта;
- межремонтный ресурс.

Различают два вида назначенного ресурса:

- полный назначенный ресурс;
- временно назначенный ресурс.

Полный назначенный ресурс двигателя – ресурс от начала эксплуатации до окончательного снятия двигателя с эксплуатации.

Полный назначенный ресурс $[\tau]$ определяется расчётным путём как наименьшее время безотказной работы одной из основных деталей двигателя:

$$[\tau] = \frac{\tau_p}{k_\tau}, \quad (1)$$

где τ_p - время до разрушения;

k_τ - коэффициент запаса по долговечности.

Для некоторых деталей допускается в отдельных случаях время безотказной работы (ресурс детали) меньшее, чем полный назначенный ресурс двигателя. Такие детали заменяются при ремонтах двигателя.

В эксплуатации назначенный ресурс реализуется постепенно, этапами. Первые партии двигателей выпускаются с ресурсом значительно меньшим чем назначенный. Для двигателей гражданской авиации, проектируемых на назначенный ресурс 15000...20000 ч, начальный ресурс составляет 1000...2000 ч. Далее, по мере успешной эксплуатации и по результатам специальных ресурсных испытаний на стендах начальный ресурс увеличивается этапами по 250...500 ч.

Промежуточный между начальным и назначенным ресурсом называется *временно назначенным ресурсом*. Перед каждым увеличением ресурса проводится полная разработка нескольких двигателей, имеющих наибольшую наработку, и анализируется состояние их деталей. Временно назначенный ресурс увеличивается только при удовлетворительном состоянии узлов разобранных двигателей и отсутствии ресурсных дефектов.

Назначенный ресурс может реализовываться с одним или несколькими ремонтами, во время которых проводится восстановление, замена или модернизация отдельных узлов двигателя.

Для установления времени ремонтов двигателей назначаются ресурсы до первого капитального ремонта и межремонтные. Основные принципы назначения этих ресурсов такие же, как и временно назначенного ресурса.

Гарантийный ресурс двигателя – установленная наработка двигателя, в течение которой изготовитель или ремонтное предприятие гарантирует и обеспечивает выполнение установленных требований к

двигателю при условии соблюдения правил хранения, транспортировки и эксплуатации.

Гарантийный ресурс двигателя, как правило, равен ресурсу до первого капитального ремонта. Однако при эксплуатации по техническому состоянию, т.е. с учётом конкретных условий работы, качества изготовления и индивидуальных особенностей отдельных двигателей ресурс до первого капитального ремонта может превышать гарантийный.

4 ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РЕСУРС ДВИГАТЕЛЕЙ

Ресурс двигателей определяется способностью его деталей выдерживать без разрушения статические нагрузки, изменения нагрузок и температур при смене режимов работы, высокочастотные вибрационные нагрузки, а также стойкостью к изнашиванию, газовой эрозии и коррозии.

В зависимости от условий работ может превалировать тот или иной фактор. Поэтому, для учёта возможно большего количества повреждающих факторов, ресурс двигателей назначается в часах и циклах.

Суммарное повреждение, накопленное деталью в процессе эксплуатации, определяется на основе методов суммирования повреждений.

Обозначив время работы на отдельных режимах $-t_i$, а время до разрушения при непрерывной работе на этих режимах как τ_{pi} , запишем формулу, определяющую накопленное повреждение детали на ресурс двигателя при работе на всех режимах:

$$D = \sum_{i=1}^P \frac{\tau_i}{\tau_{pi}}, \quad (2)$$

где i – номер режима;

P – количество режимов.

Величина накопленного повреждения за ресурс D не должна превысить своего допустимого значения $[D]$, определяемого как

$$[D] = \frac{D_p}{k_t}, \quad (3)$$

где D_p – величина накопленного повреждения, при котором наступает разрушение детали;

k_t – коэффициент запаса.

Величину D_p определяют экспериментальным путём при программном нагружении, имитирующем работу детали в эксплуатации. При отсутствии экспериментальных данных в расчётах принимают $D_p=1$. Время работы на различных режимах t_i задаётся в техническом задании на проектирование двигателя и впоследствии уточняется при эксплуатации в относительных величинах.

$$C_i = \frac{\tau_i}{[\tau]}, \quad (4)$$

где C_i – доля работы двигателя на i -м режиме;

$[\tau]$ – ресурс двигателя.

Время до разрушения при непрерывной работе на режиме t_{pi} зависит от температуры t_i и уровня действующих напряжений σ_i , в детали и определяется по диаграмме длительной прочности материала детали, как показано на рисунке 1.

С учетом выражений (2), (3), (4) назначенный ресурс двигателя в часах определяется по формуле

$$[\tau] = \frac{[D]}{\sum_{i=1}^p \frac{C_i}{\tau_{pi}}} \quad (5)$$

При выводе формулы (5) условно принимается, что при ресурсе $[\tau]$ $D=[D]$, $k_t=1$.

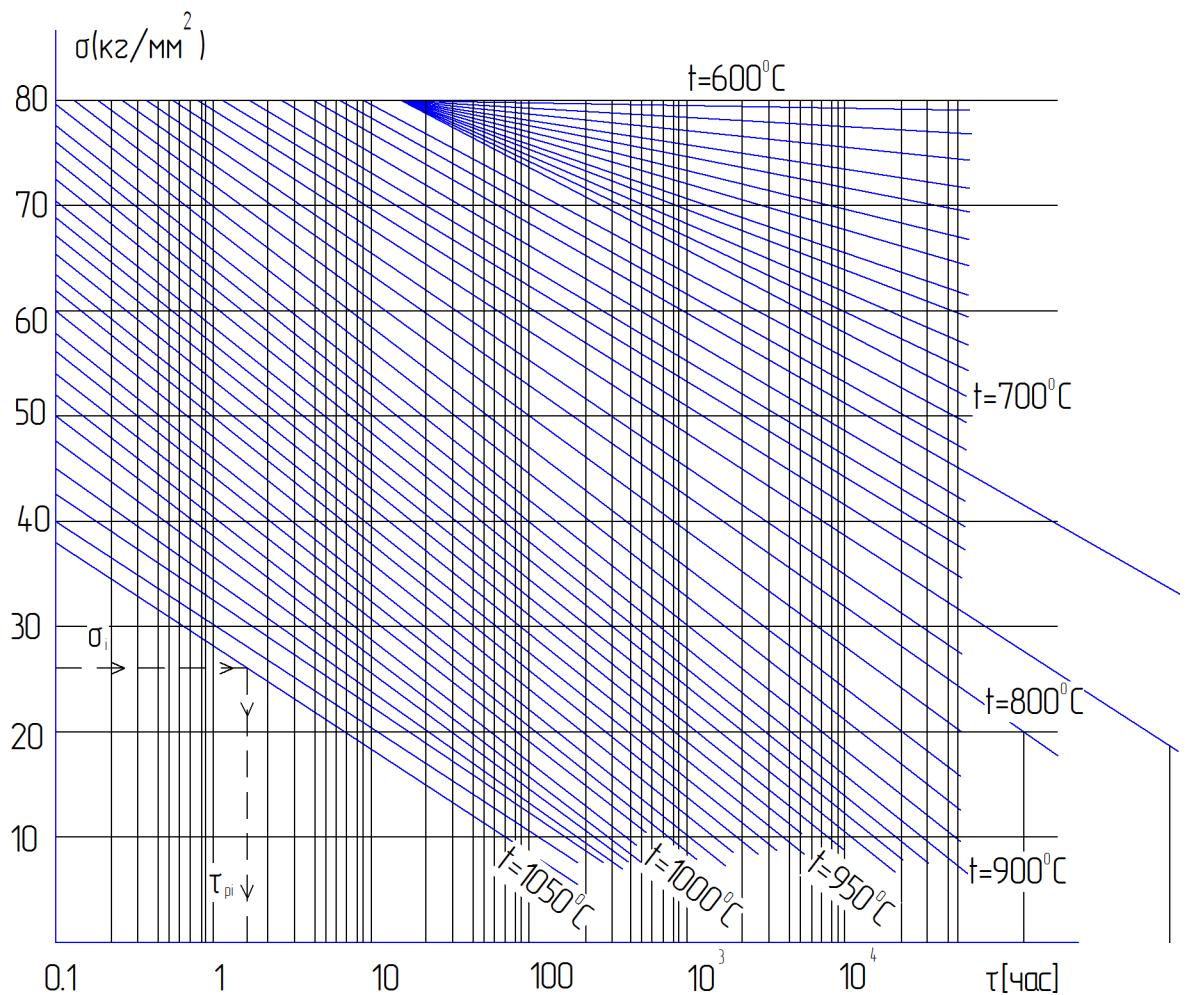


Рисунок 1 – Кривые длительной прочности материала лопаток турбины ГТД (уравнения кривых длительной прочности материалов при постоянной температуре имеют вид $\sigma^m \cdot t = \text{Const}$)

Ресурс в циклах определяется также с учётом всех видов переменных режимов, имеющих место в эксплуатации. Здесь определяется эквивалентное число циклов по формуле

$$Z_{\text{экв}} = \sum_j^n Z_j \cdot \eta_j, \quad (6)$$

где n – количество видов циклов;

Z_j – количество циклов j -го вида;

η_j – коэффициент приведения j -го цикла к эквивалентному, учитывающий отличия в их повреждающей способности.

За эквивалентный цикл принимается цикл с наибольшими максимальными напряжениями. Таковым является, как правило, первый цикл запуска двигателя с последующим выходом на

максимальный режим – цикл с минимальными напряжениями $\sigma_{\min}=0$ и максимальными $\sigma_{\max}=\sigma_{\text{экв}}$.

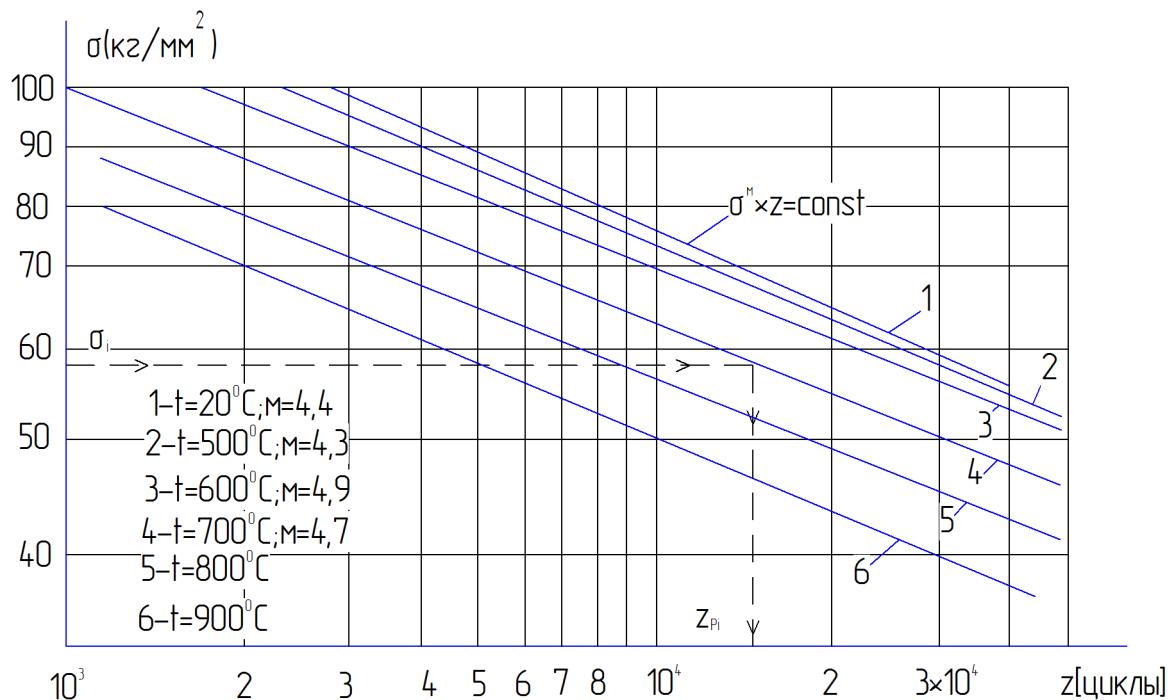


Рисунок 2 – Кривые малоцикловой усталости дисков турбин ГТД в сечении с коэффициентом концентрации напряжений $a_\sigma=2,8$

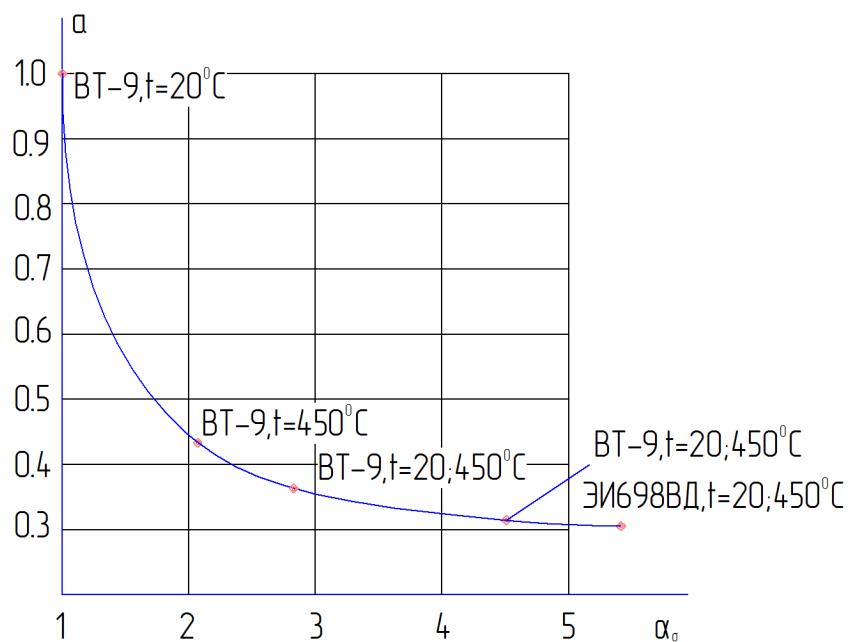


Рисунок 3 – Зависимость величины коэффициента a от коэффициента концентрации напряжений a_σ

5 ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РЕСУРС ГТД

Внешние условия эксплуатации оказывают сильное влияние на напряжённость, температурные условия работы а, следовательно, и исчерпание ресурса всех деталей двигателя.

Наибольшее влияние на исчерпание ресурса ГТД оказывают следующие эксплуатационные факторы:

- температура воздуха на входе в двигатель,
- принципы пилотирования,
- индивидуальные особенности двигателей.

При работе на одном и том же режиме температура воздуха на входе в двигатель t_H оказывает существенное влияние на температуру газа в тракте двигателя и частоту вращения роторов, а следовательно, на температуру и напряжённость деталей.

На рисунке 4 показана зависимость изменения температуры газа перед турбиной T_4^* и частоты вращения роторов высокого и низкого давлений на взлётном режиме двухвального ГТД НК-86 от температуры воздуха на входе в двигатель.

Аналогичный эффект происходит и при использовании одного режима при наборе высоты, когда t_H уменьшается.

На рисунке 5 показано изменение параметров работы двигателя при взлёте и разгоне с набором высоты на максимальном режиме при стандартных атмосферных условиях.

Принципы пилотирования включают в себя несколько факторов:

- регламент перегрева двигателя,
- изменение режимов работы (циклирование) в полёте и при посадке,
- выбор режима взлёта.

На рисунке 6 показаны зависимости изменения температуры обода и ступицы диска первой ступени турбины двигателя НК-86 и указана его циклическая долговечность при различных регламентах прогрева. Видно, что циклическая долговечность диска в зависимости от регламента прогрева может изменяться в несколько раз.

На рисунке 7 в качестве примера показаны изменения режимов работы двигателя в полёте самолёта ИЛ-86. Видно, что при посадке самолёта имеет место до 15...30 изменений режимов работы двигателей. При этом максимальные режимы отдельных циклов близки к взлётному. Поэтому переменные режимы при посадке самолёта ИЛ-86 учитывают эквивалентную циклическую наработку дисков турбины в 1,5...2 раза.

Замечено, что при выполнении одного задания разные пилоты нарабатывают разное количество переменных режимов.

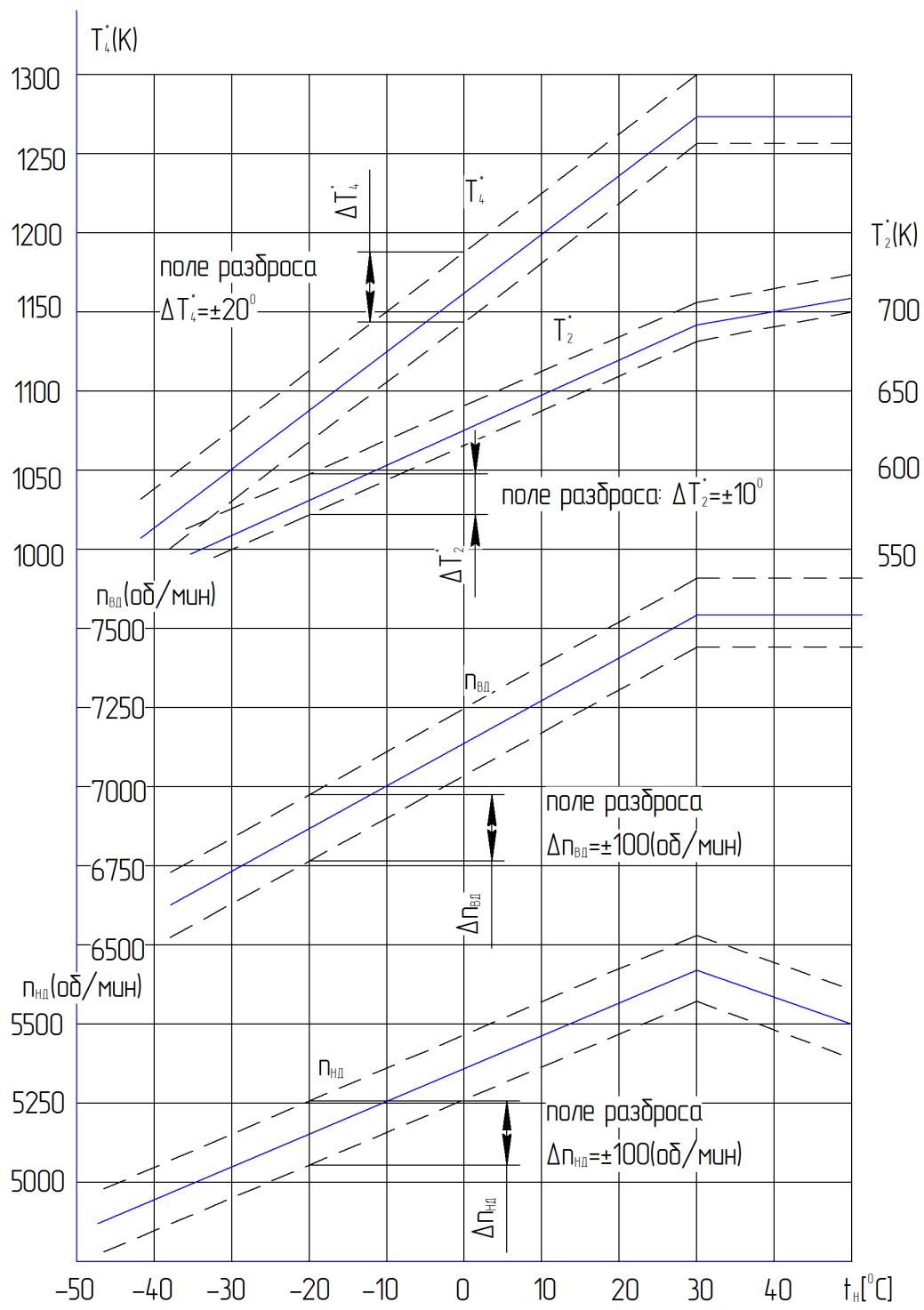
Большое влияние на исчерпание ресурса оказывает правильный выбор режима взлёта.

Самым неблагоприятным является взлёт на максимальном (взлётном) режиме. Однако в отдельных случаях (например, при неполной загрузке самолёта) возможен взлёт на номинальном режиме.

На рисунке 8 показано изменение исчерпания ресурса деталей двигателя в зависимости от режима взлёта. Переход полностью на взлёт на номинальном режиме увеличил бы ресурс рабочих лопаток турбины ТРДД НК-8-2У почти в 100 раз, а дисков турбины – в 1,6 раз.

Имеет значение и продолжительность работы на максимальном режиме при взлёте самолёта.

Имеющийся разброс параметров при работе разных двигателей на одном режиме вызывает и различное исчерпание ресурса.



T_4^* – температура газов перед турбиной;

T_2^* – температура воздуха за компрессором;

$n_{ВД}$ – частота вращения ротора высокого давления;

$n_{НД}$ – частота вращения ротора низкого давления;

Рисунок 4 – Изменения параметров работы двигателя НК-86 на взлётном режиме в

зависимости от температуры воздуха на входе в двигатель – t_H

Видно, что температура рабочих лопаток турбины может отличаться на 40^0C , а исчерпание ресурса примерно в 5 раз. Зимние полёты ($t_H \geq 15^0\text{C}$) более, чем в 100 раз.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Оценить, во сколько раз отличается ресурс рабочих лопаток турбины ВД при работе на взлётном режиме при $t_H=30^0\text{C}$ двигателей с крайними в пределах выброса параметрами T_4^* и n_{WD} . Давление воздуха за компрессором принимать постоянным и равным $P_{2WD}^*=13\text{kг}/\text{см}^2$.

2. Оценить, во сколько раз отличается циклическая долговечность дисков третьей ступени турбины двигателей с крайними в пределах разброса параметрами работы. Оценку проводить для циклов запуска с выходом на взлётный режим и последующим остановом при $t_H=30^0\text{C}$.

3. Оценить, во сколько раз отличаются в среднем по накопленному повреждению в рабочих лопатках турбины ВД полёты по маршрутам:

- а) Москва – Ташкент и Ташкент – Москва в июле месяце;
- б) Москва – Ташкент и Ташкент – Москва в январе месяце;
- в) Москва – Минеральные Воды и Минеральные Воды – Москва в июле месяце;
- г) Москва – Минеральные Воды и Минеральные Воды – Москва в январе месяце;
- д) Москва – Самара и Самара – Москва в июле месяце;
- е) Москва – Самара и Самара – Москва в январе месяце.

Средние температуры июля и января в городах Москва, Ташкент, Самара, Минеральные Воды приведены в таблице 1. Давление воздуха за компрессором принимать во всех случаях равным $P_{2WD}^*=13\text{kг}/\text{см}^2$.

Таблица 1

Город	t_H июль	t_H январь
-------	---------------	-----------------

Москва	$+17^{\circ}\text{C}$	-10°C
Ташкент	$+27^{\circ}\text{C}$	-1°C
Минеральные воды	$+23^{\circ}\text{C}$	-4°C
Самара	$+20^{\circ}\text{C}$	-14°C

4. Оценить, во сколько раз в среднем отличаются по величине накопленного повреждения от исчерпания малоциклической долговечности дисков турбины НД двигателя НК-86 взлёты, выполненные в июле и январе месяце в аэропортах городов:

- а) Москва;
- б) Ташкент;
- в) Минеральные Воды;
- г) Самара.

Средние температуры июля и января в городах Москва, Ташкент, Самара, Минеральные Воды приведены в таблице 1. Температуру расчётного сечения диска принять постоянной $t=200^{\circ}\text{C}$.

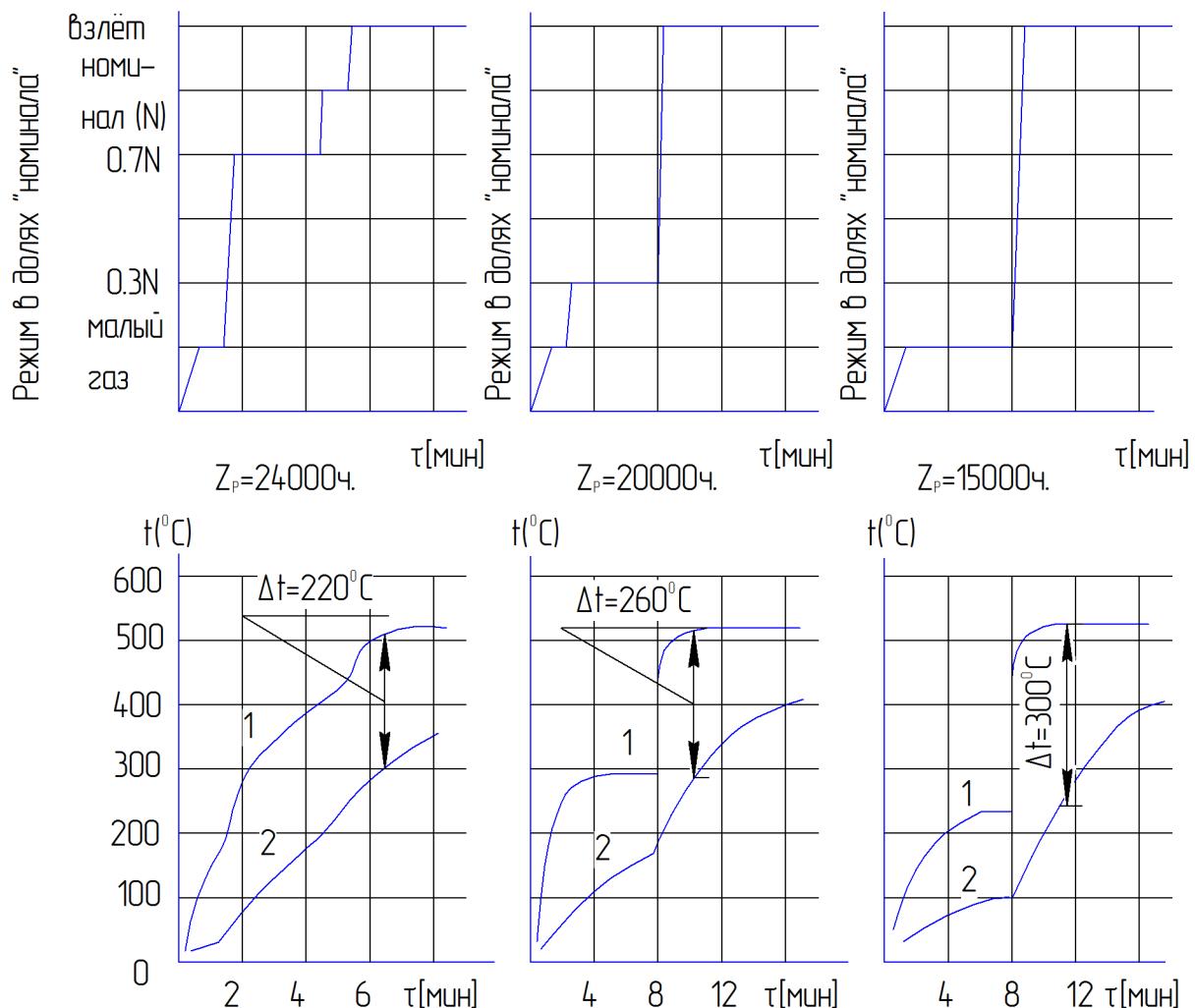


Рисунок 6 – Графики изменения температуры обода и ступицы диска ВД двигателя НК-86 в зависимости от регламента прогрева

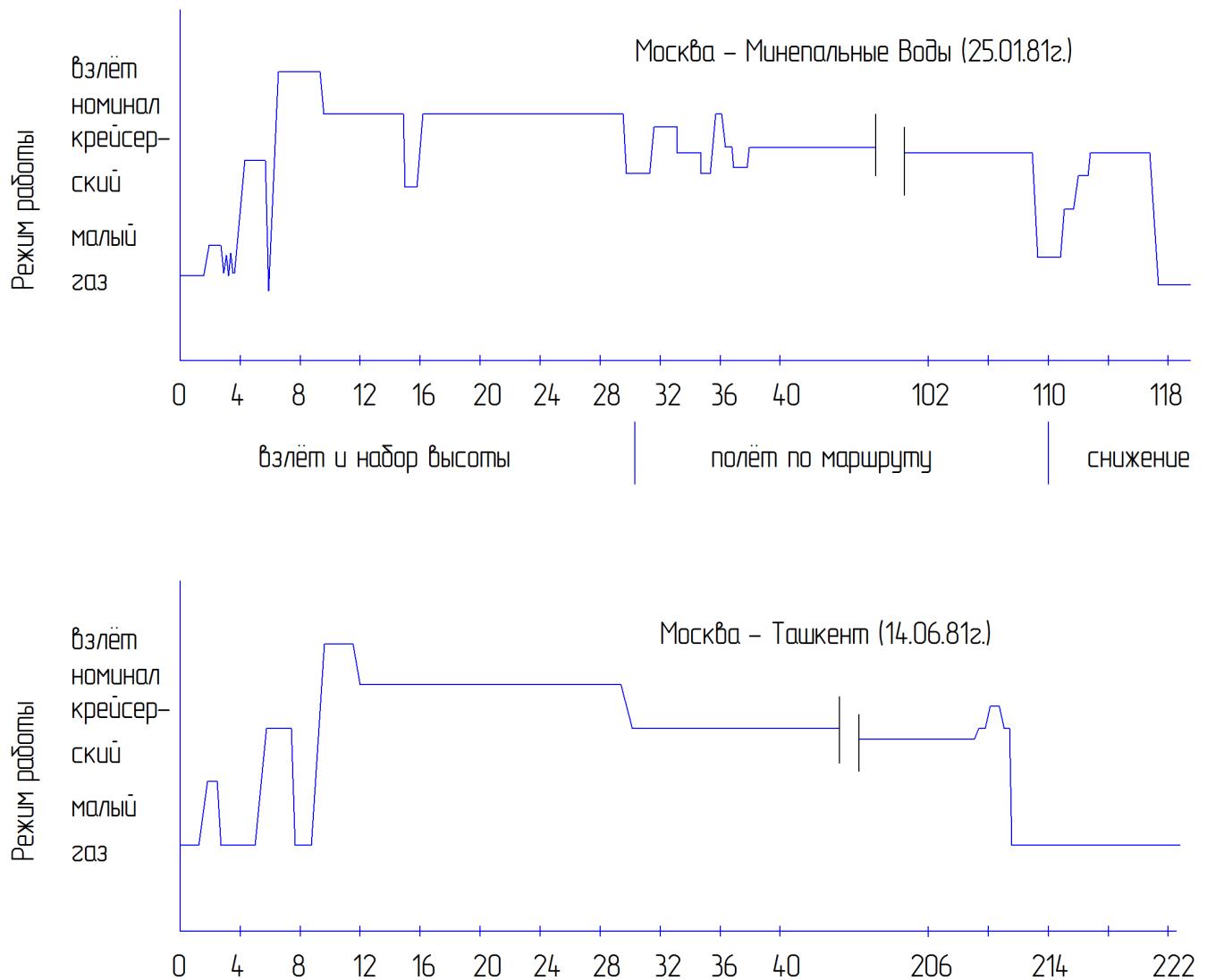


Рисунок 7 – Изменение режимов работы двигателя НК-86 в процессе полёта

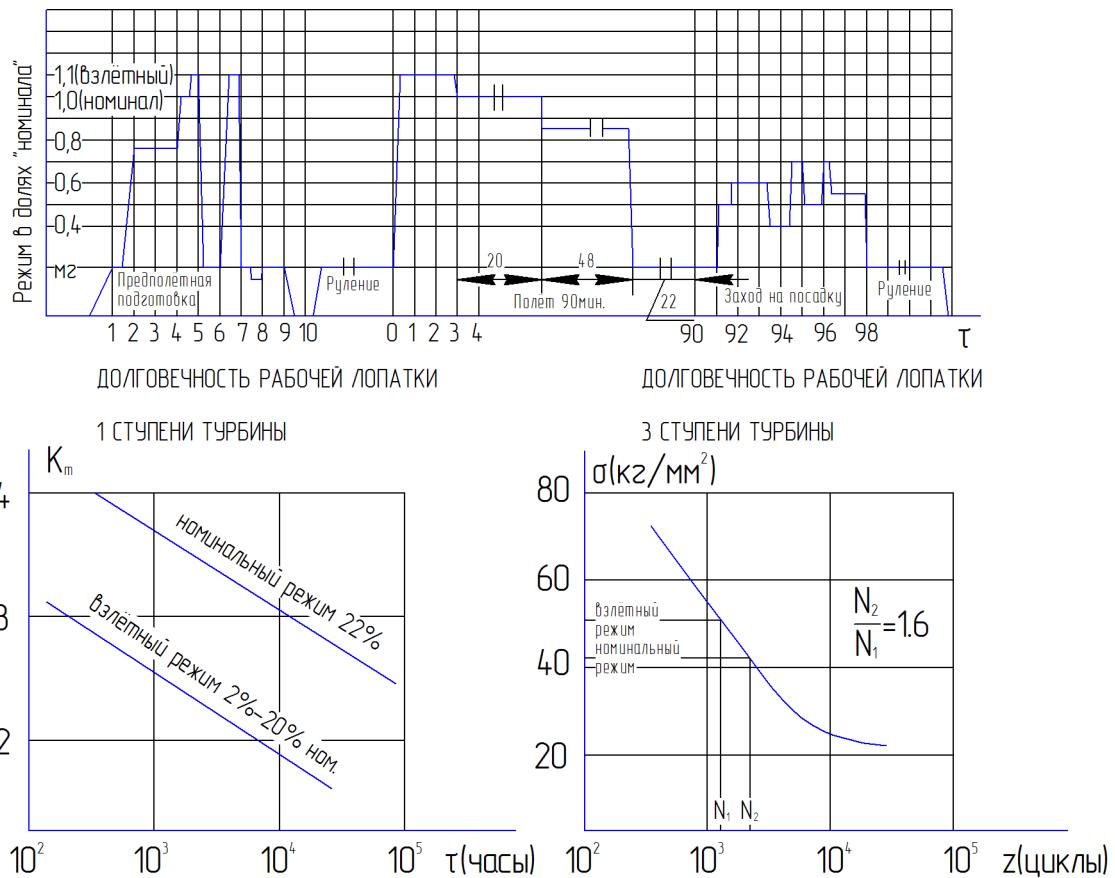


Рисунок 8 – Изменение ресурса деталей двигателя НК-8-2у в зависимости от режима взлёта

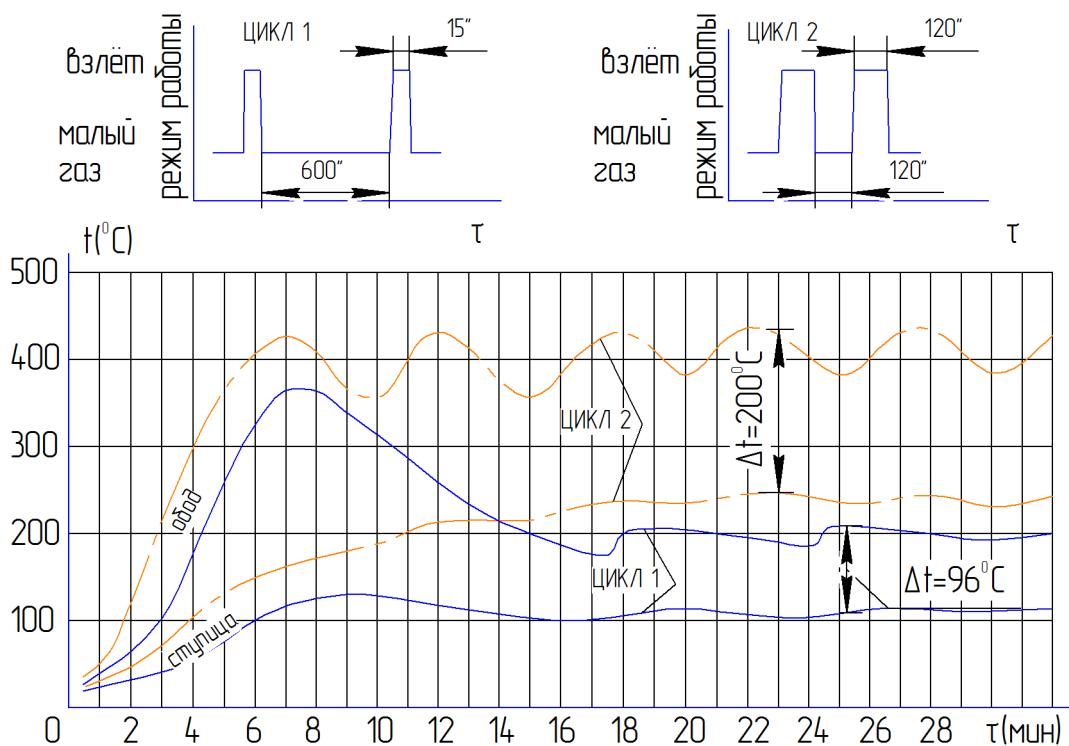


Рисунок 9 – Изменение температуры обода и ступицы диска третьей ступени турбины двигателя НК-86 при циклировании на стенде

5. Оценить, во сколько раз отличается реальное исчерпание длительной прочности рабочей лопатки турбины ВД двигателя НК-86 за год эксплуатации в сравнении с расчётным, когда 100% взлётов проводится при стандартных атмосферных условиях (САУ) при $t_H=15^0\text{C}$ для самолётов, приписанных к аэропортам городов:

- а) Москва;
- б) Ташкент;
- в) Алма – Ата.

Распределение температур взлётов t_H за год для самолётов, приписанных к аэропортам Москвы, Ташкента, Алма – Аты приведено в таблице 2. Давление воздуха за компрессором принимать во всех случаях равным $P_{2\text{ВД}}^*=13 \text{ кг/см}^2$.

6. Оценить, во сколько раз отличается реальное исчерпание малоцикловой долговечности диска турбины НД двигателя НК-86 при взлётах за год эксплуатации в сравнении с расчётным, когда 100% взлётов проводится при стандартных атмосферных условиях (САУ) при $t_H=15^0\text{C}$ для самолётов, приписанных к аэропортам городов:

- а) Москва;
- б) Ташкент;
- в) Алма – Ата.

Распределение температур взлётов t_H за год для самолётов, приписанных к аэропортам Москвы, Ташкента, Алма – Аты приведено в таблице 2. Температуру расчётного сечения диска принять постоянной $t=200^0\text{C}$.

Таблица 2

	Москва	Ташкент	Алма – Ата
30^0C	6%	16%	6%
$15...25^0\text{C}$	26%	27%	26%
$5...14^0\text{C}$	31%	23%	25%
5^0C	37%	34%	43%

7. Оценить, во сколько раз отличается реальное исчерпание малоцикловой долговечности диска турбины НД двигателя НК-86 при различных режимах взлёта, определяемых циклографмой, которая приведена на рисунке 6.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое ресурс?
2. Не ресурсные дефекты и их основной признак.
3. Какие виды ресурсов Вам известны?
4. Что такое назначенный ресурс?
5. Что такое гарантийный ресурс?
6. Чем определяется ресурс двигателя и в чём он измеряется?
7. Как определить накопленное повреждение детали за ресурс двигателя при работе на всех режимах?
8. Как определить назначенный ресурс двигателя в часах и предельный ресурс в циклах?
9. Какой деталью определяется ресурс по длительной прочности двигателя НК-86?
10. Какой деталью определяется ресурс по малоцикловой долговечности двигателя НК-86?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М: Машиностроение, 1976. – 216 с.
2. Белоусов А. И., Биргер И. А., Прочностная надёжность деталей турбомашин. Учебное пособие. Куйбышев, КуАИ, 1983. – 75 с.
3. Цейтлин В. И., Федорченко Д. Г. Оценка циклической долговечности деталей, работающих при сложных программах нагружения. Проблемы прочности. № 2, 1983. – с. 13 – 19.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Зависимости для определения напряжённости и температуры основных деталей ГТД

1. Лопатки турбин и компрессоров

Напряжения в расчётном сечении:

$$\sigma_{\text{лон}} = a_1 \cdot n^2 + a_2 \cdot P_{2\text{ВД}}^* + a_3 \cdot n^4 + a_4 \cdot \Delta t, [\text{кг} / \text{мм}^2] \quad (9)$$

где n – частота вращения ротора;

$P_{2\text{ВД}}^*$ – давление воздуха за компрессором;

Δt – разница между температурами наиболее горячей и наиболее холодной точкой сечения (только для охлаждаемых лопаток турбин);

a_1, a_2, a_3, a_4 – постоянные коэффициенты для расчётного сечения.

Среднемассовая температура расчётного сечения:

$$t_{\text{лон}} = b_1 \cdot T_4^* + b_2 \cdot T_2^* - 273, [{}^\circ\text{C}] \quad (10)$$

где T_4^* – температура газа перед турбиной;

T_2^* – температура воздуха за компрессором;

b_1, b_2 – постоянные коэффициенты для расчётного сечения.

$$\Delta t = c_1 \cdot T_4^* + c_2 \cdot T_2^*, \quad (11)$$

где c_1, c_2 – постоянные коэффициенты для расчётного сечения.

2. Диски турбин и компрессоров

Напряжения в расчётном сечении:

$$\sigma_{\text{д}} = d_1 \cdot n^2 + d_2 \cdot (t_{\text{o6}} - t_{\text{cm}}), [\text{кг} / \text{мм}^2] \quad (12)$$

где t_{o6} – температура обода диска;

$t_{\text{ст}}$ – температура ступицы диска;

d_1, d_2 – постоянные коэффициенты для расчётного сечения.

$$\begin{aligned} t_{\text{o6}} &= e_1 \cdot T_4^* + e_2 \cdot T_2^* - 273, \\ t_{\text{cm}} &= e_3 \cdot T_4^* + e_4 \cdot T_2^* - 273, \end{aligned} \quad (13)$$

где e_1, e_2, e_3, e_4 – постоянные коэффициенты для расчётного сечения.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Все приведённые ниже задания относятся к двухконтурному турбореактивному двигателю НК-86, установленному на самолёте Ил-86.

Параметры работы двигателя НК-86 на взлётном режиме приведены на рисунке 4.

Ресурс по длительной прочности (ресурс в часах) двигателя НК-86 определяется работоспособностью рабочей лопатки турбины высокого давления (ВД), ресурс по малоцикловой долговечности (ресурс в циклах) – работоспособностью диска третьей ступени турбины.

Рабочая лопатка турбины ВД неохлаждаемая. Исчерпание ресурса по длительной прочности рабочей лопатки на 99% происходит при работе на взлётном режиме и только 1% исчерпания ресурса приходится на остальную часть полёта. Поэтому в оценках исчерпания ресурса двигателей НК-86 в эксплуатации учитывается только наработка на взлётном режиме.

Расчётное сечение, по которому оценивают исчерпание ресурса расположено на расстоянии 36 мм от корневого сечения. Формулы для определения температуры и напряжений в расчётном сечении лопатки приведены в приложении А (формулы (9), (10)). Коэффициенты в уравнении (9) для оценки напряжений в расчётном сечении лопатки равны: $a_1=0,326 \cdot 10^{-6}$; $a_2=0,965$; $a_3=-0,354 \cdot 10^{-14}$; $a_4=0$. Коэффициенты в уравнении (10) для оценки температуры расчётного сечения лопатки: $b_1=0,935$; $b_2=0$.

Кривые длительной прочности материала рабочих лопаток турбины ВД двигателя НК-86 приведены на рисунке 1.

Исчерпание ресурса диска третьей ступени турбины двигателя НК-86 происходит в основном на начальном участке полёта (при взлёте самолёта) и конечном, когда имеют место многочисленные изменения режимов работы, связанные с маневрированием при заходе на посадку (см. рисунок 7). Крейсерский участок полёта, как правило, не влияет на исчерпание ресурса дисков и рабочих лопаток турбины.

Расчётное сечение диска третьей ступени турбины двигателя НК-86 расположено в ступичной части на радиусе $R=165$ мм отверстий под болты крепления с валом. Коэффициент концентрации напряжений от отверстий $\alpha_o \approx 2,8$.

Формулы для определения напряжений в расчётном сечении диска приведены в приложении А (формулы (12), (13)). Коэффициенты в уравнениях для оценки напряжений в расчётном сечении диска:

$$d_1=1,031 \cdot 10^{-6};$$

$$d_2=3,59 \cdot 10^{-2};$$

$$e_1=0,235;$$

$$e_2=0,75;$$

$$e_3=-0,094;$$

$$e_4=1,1.$$

Температура расчётного сечения равна температуре ступицы. При рабочих температурах эффекты длительной прочности в ступичной части диска ещё не проявляются, поэтому ресурс диска определяется только исчерпанием малоцикловой долговечности. Кривые малоцикловой прочности дисков третьей ступени турбины двигателя НК-86 приведены на рисунке 2.

Лабораторная работа №8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Цель работы

1. Ознакомиться с методами расчета схемной надежности изделия.
2. Изучить основные методы повышения надежности функциональных систем.
3. Приобрести практические навыки расчёта надёжности изделий.

1. Простые и сложные изделия

В теории надежности для разработки более удобной классификации методов и средств обеспечения и анализа уровня надежности все изделия делятся на простые и сложные. Согласно [13] простым изделием называется такое, у которого все его элементы и узлы функционально составляют единую последовательную цепь и отказ любого отдельного элемента или узла вызывает отказ изделия в целом.

Сложным изделием называется такое, у которого для выполнения заданных функций имеется несколько параллельно функционирующих узлов, агрегатов и систем или же в изделии использованы различные сочетания нескольких функциональных узлов и систем таким образом, что в случае отказа таких узлов и систем работоспособность изделия в целом сохраняется. В соответствии с этим различают понятия физической надежности, которая связана с надежностью отдельных элементов как простых, так и сложных изделий, и схемой надежности, которая применяется только для сложных изделий.

К сложным элементам ГТД можно отнести системы топливопитания, управления, регулирования, смазки, подачи и отбора воздуха.

Они состоят из большого числа гидравлических, электрических и механических агрегатов и узлов: насосов, кранов, регуляторов, электромагнитных реле, переключателей и др.

При расчете надежности сложных систем ГТД исходными данными являются: показатели надежности и модели отказов составных элементов системы; критерии отказа и структурная схема надежности системы.

Для расчетов и анализа показателей надежности применяются следующие методы:

- 1) метод структурных схем;
- 2) метод логических схем;
- 3) схемно-функциональный метод.

2. Метод структурных схем

Этот метод заключается в том, что рассматриваемое изделие представляется в виде структурной схемы, состоящей из суммы последовательных и параллельных звеньев.

Последовательным соединением называется система, для которой необходимым и достаточным условием нарушения работоспособности является отказ хотя бы одного элемента системы.

Параллельным соединением называется система, работоспособность которой нарушается только при условии отказа всех её элементов.

Пусть изделие состоит из n элементов, вероятность безотказной работы каждого из которых равна соответственно P_i , где $i = 1, \dots, n$. Вероятности безотказной работы системы этих элементов определяются по формулам:

для последовательного соединения:

$$P_{nosl} = \prod_{i=1}^n P_i ; \quad (2.1)$$

для параллельного соединения:

$$P_{nap} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) . \quad (2.2)$$

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы $P_i = \exp(-\lambda_i t)$. Тогда

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - \exp(-\lambda_i t)] , \quad (2.3)$$

где t – время работы системы;

λ_i – интенсивность отказов i -го элемента.

Для повышения надежности работы отдельных систем часто предусматривается резервирование, поэтому при расчете надежности необходимо учитывать все виды резервирования.

При общем резервировании с постоянным нагружением вероятность безотказной работы

$$P_{OP}(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1} , \quad (2.4)$$

где n – число последовательно соединенных элементов основной системы;

m – кратность резервирования.

Среднее время безотказной работы резервированной системы

$$T_{cp_OP} = \frac{\sum_{i=1}^m \left[\frac{1}{(i+1)} \right]}{\lambda_{cp}} = T_{cp} \sum_{i=1}^m \left[\frac{1}{(i+1)} \right] , \quad (2.5)$$

где λ_{cp} и T_{cp} – соответственно интенсивность отказов и среднее время безотказной работы основной системы.

При раздельном резервировании с нагруженным резервом вероятность безотказной работы

$$P_{PP}(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \left[1 - P_i(t)^{m_i+1} \right] \right\}, \quad (2.6)$$

где n – число последовательных элементов основной системы;
 m_i – кратность резервирования i -го элемента.

3. Пример расчёта надёжности по методу структурных схем

Рассмотрим расчет схемной надёжности системы высотного запуска двигателя, представленный на рис.1

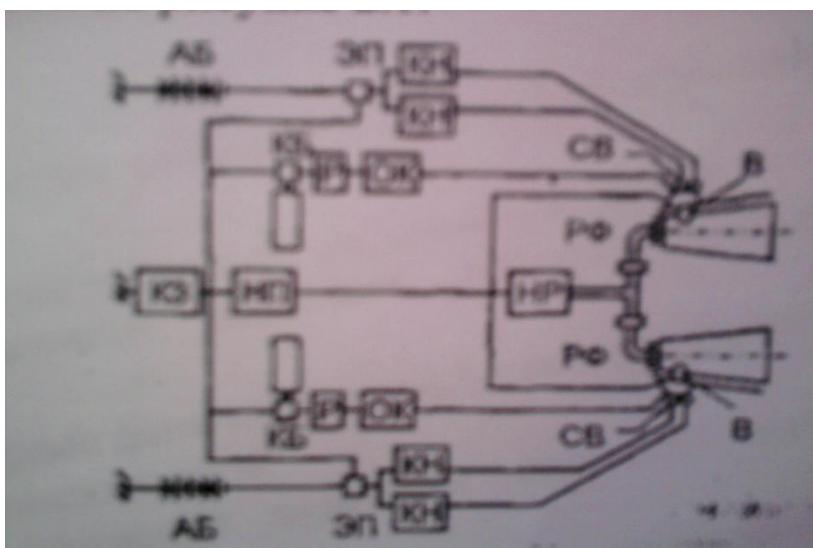


Рисунок – 1 Принципиальная схема системы запуска.

Система запуска в своём составе имеет:

- два пусковых воспламенителя с форсунками пускового топлива (В), установленных на двух камерах сгорания двигателя;
- по две свечи зажигания (С) на каждом воспламенителе;
- два автономных кислородных баллона (КБ) с редуктором (Р) и обратными клапанами (ОК);
- один насос пускового топлива (НП);
- кнопку включения запуска (КЗ);
- две аккумуляторные батареи (АБ).

На основании принципиальной схемы составляем структурную схему системы запуска для расчета её схемной надёжности на основе определений последовательных и параллельных звеньев (рис.2). Для удобства расчета представим структурную схему в виде отдельных блоков 1,2,3,4 и составим для них расчетные уравнения вероятности отказа системы и отдельных структурных блоков:

$$P_{\text{сист}} = P_1(P_2 + P_3 - P_2 P_3) P_4, \quad (2.7)$$

Для отдельных блоков:

$$P_1 = (P_{AB} + P'_{AB} - P_{AB} P'_{AB}) P_{K3} P_{HP};$$

$$P_2 = P_A P_B P_C;$$

где $P_A = P_{KB} P_P P_{OK}$;

$$P_B = [P_{EP} (P_{KH} P_C + P'_{KH} P'_C - P_{KH} P_C P'_{KH} P'_C)];$$

$$P_C = P_B.$$

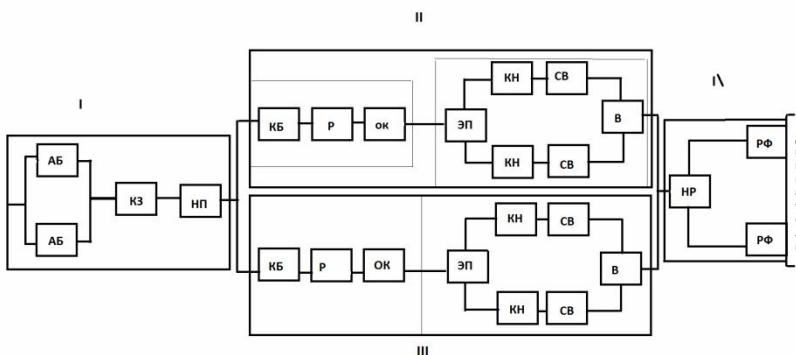


Рисунок – 2 Структурная схема системы запуска.

После подстановки получаем:

$$P_2 = [P_{KB} P_P P_{OK} P_{EP} (P_{KH} P_C + P'_{KH} P'_C - P_{KH} P_C P'_{KH} P'_C)].$$

Аналогично можно определить и P_3 .

Для блока 4 (рис.2) можно записать следующее уравнение:

$$P_4 = P [(P_{P\Phi})_L + (P_{P\Phi})_U - (P_{P\Phi})_L (P_{P\Phi})_U].$$

Для расчетного определения вероятности безотказной работы системы запуска необходимо знать данные по интенсивности отказов для всех элементов и агрегатов. Эти данные определяются по результатам статистической обработки неисправностей, выявляемых в эксплуатации.

Делая допущение, что плотность распределения вероятности отказов подчиняется экспоненциальному закону, можно определить вероятность безотказной работы каждого из элементов системы по уравнению:

$$P_i = \exp(-\lambda t),$$

где t – время работы системы запуска. За расчетное время можно принять время одного полета $t = 1\text{час}$.

Полученные данные сводятся в специальную таблицу.

4. Метод логических схем

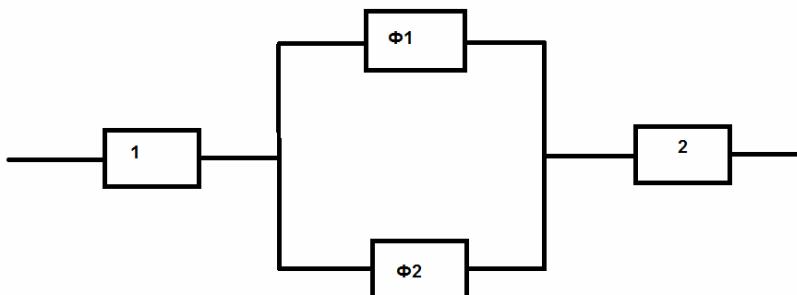
Метод логических схем позволяет:

- рассчитывать сложные функциональные системы, выполняющие несколько функций;
- производить анализ возможностей выполнения заданных функций при наличии разнообразных отказов отдельных элементов и звеньев системы.

Определение вероятности безотказной работы системы и анализ её надёжности методом логических схем производится с использованием алгебры логики (алгебры Буля). В алгебре логики используется основные операции, обозначаемые «+» и «×». При логических операциях знак «+» имеет смысл «или», знак «×» соответствует «и». Например, запись $A_1 + A_2$ обозначает, что имеет место событие A_1 или событие A_2 , запись $A_1 \times A_2$ соответствует тому, что произошли события A_1 и A_2 .

Используя основные положения алгебры логики, можно определить вероятность безотказной работы изделий, имеющих в своём составе как параллельно, так и последовательно соединённые элементы.

В качестве примера рассмотрим систему, состоящую из двух агрегатов, включенных последовательно с фильтрами (рисунок 2.3). Поскольку каждый фильтр (Φ_1 и Φ_2) может иметь по два отказа (отказ по засорению сеток q'_ϕ и отказ по разрыву сеток q''_ϕ), расчет надежности следует проводить методом логических схем.



Для определения вероятности безотказной работы необходимо:

- Сформулируйте условия безотказности: система будет работать безотказно, если:
 - Все элементы работают безотказно;
 - Произойдет отказ по засорению одного фильтра при условии безотказной работы других элементов;
 - Произойдет отказ по засорению второго фильтра при условии безотказной работы других элементов.

Отказ по разрыву сеток фильтров считается недопустимым, так как при этом не будет обеспечиваться очистка рабочей жидкости от механических примесей.

- Составить алгебраическое уравнение безотказности:

$$S = A_1 A_{\phi 1} A_{\phi 2} A_2 + A_1 \overline{A_{\phi 1}} A_{\phi 2} A_2 + A_1 A_{\phi 1} \overline{A_{\phi 2}} A_2;$$

Где $\overline{A_{\phi 1}}$ означает засорение фильтра.

- Записать расчетное уравнение для определения вероятности безотказной работы в виде:

$$P_{cucm} = P_1 P_{\phi 1} P_{\phi 2} P_2 + P_1 q'_{\phi 1} P_{\phi 2} P_2 + P_1 P_{\phi 1} q'_{\phi 2} P_2 = \\ = P_1 P_2 (P_{\phi 1} P_{\phi 2} + q'_{\phi 1} P_{\phi 2} + P_{\phi 1} q'_{\phi 2})$$

Здесь $q'_{\phi 1}, q'_{\phi 2}$ – отказы фильтров 1 и 2 по засорению сеток. Вероятность безотказной работы элементов можно выразить через вероятность появления отказа q . Тогда:

$$P_1 = 1 - q_1; P_2 = 1 - q_2; P_\phi = 1 - q_\phi = 1 - (q'_\phi + q''_\phi).$$

Подставляя в уравнение вероятности безотказной работы $P_1, P_2, P_{\phi 1}, P_{\phi 2}$, можно получить:

$$P_{cucm} = (1 - q_1)(1 - q_2)[(1 - q'_{\phi 1} - q''_{\phi 1})(1 - q'_{\phi 2} - q''_{\phi 2}) + \\ + q'_{\phi 1}(1 - q'_{\phi 2} - q''_{\phi 2}) + q'_{\phi 2}(1 - q'_{\phi 1} - q''_{\phi 1})]$$

В случае экспоненциального распределения вероятности отказов $P = \exp(-\lambda t) \approx 1 - \lambda t$ (если $\lambda \ll 1$); $q \approx 1 - (1 - \lambda t) \approx \lambda t$. Тогда:

$$P_{cucm} = (1 - \lambda t_1)(1 - \lambda t_2)[(1 - \lambda'_{\phi 1}t - \lambda''_{\phi 1}t)(1 - \lambda'_{\phi 2}t - \lambda''_{\phi 2}t) + \\ + \lambda'_{\phi 1}t(1 - \lambda'_{\phi 2}t - \lambda''_{\phi 2}t) + \lambda'_{\phi 2}t(1 - \lambda'_{\phi 1}t - \lambda''_{\phi 1}t)]$$

Принимая во внимание значения интенсивностей отказов различных элементов, приведенных в табл.1, можно определить вероятность безотказной работы системы в течение t часов.

5. Порядок выполнения работы

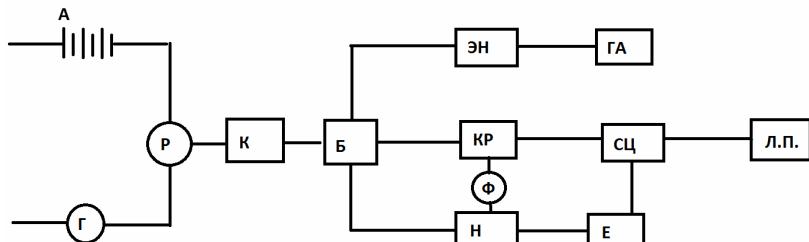
1. Ознакомиться с основными положениями расчета надежности сложных систем.
2. Произвести расчет надежности заданной системы (рис.4) методом структурных схем, используя данные табл.1.

Таблица 1

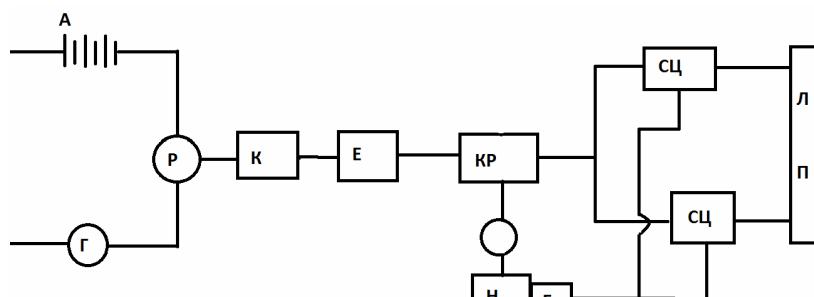
Варианты	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-5}$					
	λ_1	λ_2	$\lambda'_{\phi 1}$	$\lambda''_{\phi 1}$	$\lambda'_{\phi 2}$	$\lambda''_{\phi 2}$
1	0,10	0,1	1,0	0,1	0,5	0,05
2	0,25	0,2	1,0	0,2	1,0	0,1
3	0,50	0,3	1,0	0,5	0,5	0,1
4	0,75	0,4	2,0	0,5	1,0	0,1
5	1,00	0,5	2,0	0,2	0,5	0,1
6	1,25	0,4	1,5	0,2	0,5	0,1
7	1,50	0,3	1,0	0,1	1,0	0,5

8	1,75	0,2	0,8	0,1	0,8	0,2
9	2,00	0,1	0,8	0,1	0,6	0,05
10	2,25	1,0	0,5	0,1	0,5	0,2
11	2,50	2,0	0,5	0,1	0,2	0,05

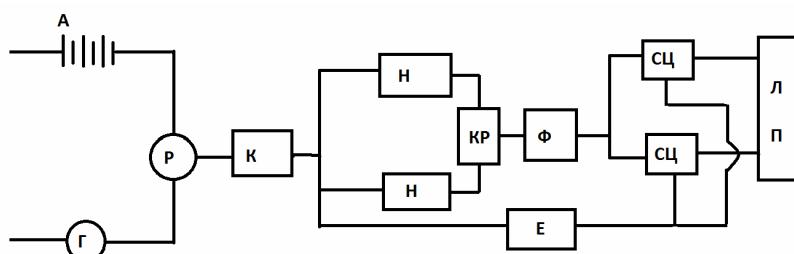
Система 1



Система 2



Система 3



Система 4

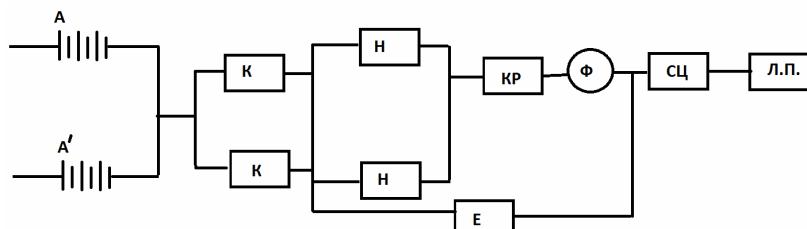


Рисунок – 4

2.1 На основе принципиальной схемы системы составить структурную схему.

2.2. Составить расчётное уравнение для определения вероятности безотказной работы.

2.3. Пользуясь данными интенсивности отказов, приведенных в табл.2, определить надежность системы.

3. Сравнить уровень надёжности различных вариантов принципиальной схемы систем ГТД.

4. Провести расчет надёжности методом логических схем одной из заданных систем двигателя (рис.5).

Таблица 2

Элементы систем	Интенсивность отказов		Вероятность безотказной работы	
	Обозначение	λ	Обозначение	P
Аккумуляторная батарея	АБ	$1,0 \cdot 10^{-4}$	P_{AB}	0,99990
Кнопка запуска	КЗ	$0,1 \cdot 10^{-4}$	P_{KZ}	0,99999
Насос пускового топлива	НП	$0,5 \cdot 10^{-4}$	P_{NP}	0,99995
Арматура кислородного баллона	КБ	$0,5 \cdot 10^{-4}$	P_{KB}	0,99995
Кислородный редуктор	Р	$0,5 \cdot 10^{-4}$	P_P	0,99950
Обратный клапан	ОК	$0,1 \cdot 10^{-4}$	P_{OK}	0,99999
Электропредохранитель	ЭП	$0,5 \cdot 10^{-4}$	P_{EP}	0,99995
Катушка зажигания	КН	$1,0 \cdot 10^{-4}$	P_{KN}	0,99990
Свеча электро-зажигания	СВ	$2,5 \cdot 10^{-4}$	P_{CB}	0,99975
Пусковой воспламенитель	В	$0,5 \cdot 10^{-4}$	P_B	0,99995
Насос рабочего топлива с арматурой	НР	$1,0 \cdot 10^{-4}$	P_{HP}	0,99990
Форсунки рабочего	РФ	$2,5 \cdot 10^{-4}$	P_{PF}	0,99975

топлива				
Емкость	E	$1,0 \cdot 10^{-4}$	P_E	0,99990
Фильтр	Ф	$0,1 \cdot 10^{-4}$	P_Φ	0,99990
Силовой цилиндр	СЦ	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$P_{СЦ}$	0,99975
Лента	ЛП	$0,5 \cdot 10^{-4}$		0,99975

4.1. Составить алгебраическое уравнение безотказности заданной системы двигателя.

4.2. Составить расчетное уравнение для определения вероятности безотказной работы заданной системы двигателя.

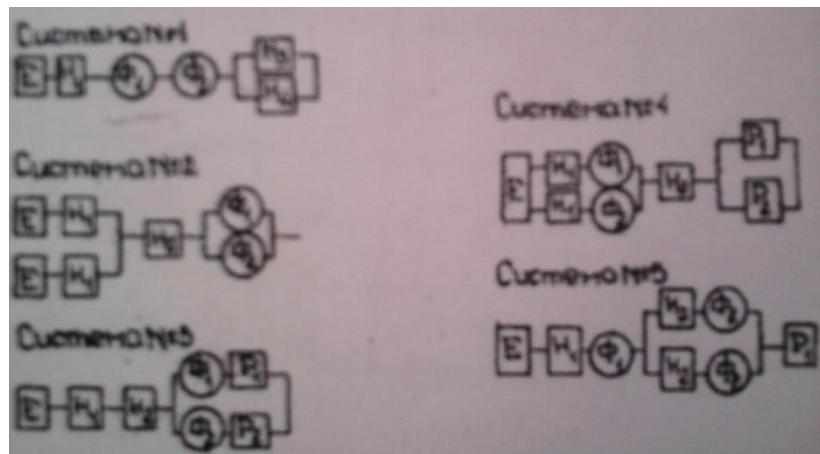


Рисунок – 5

4.3. Используя данные таблицы 2.2 по интенсивности отказов, элементов системы, определить вероятность безотказной работы заданной системы.

6. Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие материалы:

1. Титульный лист с указанием номера группы, ФИО студента, фамилия преподавателя, название дисциплины, номера и названия лабораторной работы, дата выполнения работы. Титульный лист должен быть подписан студентом.
2. Цель работы.

3. Краткие теоретические сведения о методах определения надёжности сложных систем.
4. Структурную схему заданной системы двигателя.
5. Расчет надёжности заданной системы двигателя методом структурных схем.
6. Схему и исходные данные заданной системы двигателя для расчета надёжности методом логических схем.
7. Расчет надёжности заданной системы двигателя методом логических схем.
8. Вывод об уровне надёжности заданных систем двигателя.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое сложные системы? Какие сложные системы есть в ГТД.
2. Какие основные методы определения надёжности сложных систем вы знаете?
3. перечислите преимущества и недостатки метода структурных схем.
4. В чем сущность метода логических схем?

Лабораторная работа № 9

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ МАСЛОСИСТЕМЫ ГТД

Цель работы:

Ознакомление с работой масляной системы ГТД, методами и средствами контроля деталей и узлов, омываемых маслом.

Приобретение практических навыков по определению надёжности работы элементов ГТД.

1. Диагностирование технического состояния деталей ГТД, омываемых маслом

В данной лабораторной работе объектом исследования является система маслопитания ГТД и работоспособность его элементов.

В настоящее время в практике эксплуатации ГТД широко применяется метод диагностирования технического состояния (ТС) деталей ГТД, омываемых маслом, по содержанию в нем продуктов износа. Применение этого метода основано на допущении, что при взаимном перемещении контактирующих поверхностей деталей происходит их износ и транспортировка микроскопических частиц износа потоком масла. Содержание продуктов износа в пробах масла можно определить спектральным или химическим способами. Динамика изменения концентрации частиц в масле указывает на состояние деталей, омываемых маслом. В целях упрощения методики диагностирования в практике используют экспресс-методы анализа масла с ограниченным количеством исследуемых элементов. Величина концентрации продуктов износа в масле зависит от срока службы масла и условий его замены.

Для диагностирования ТС деталей ГТД, омываемых маслом, необходимо иметь следующие данные:

- результаты анализов серии последовательных проб масла;
- время работы ГТД после замены масла до отбора каждой пробы;
- общий срок службы ГТД и характеристики условий эксплуатации.

Кроме того, для заключения о ТС деталей ГТД необходимо знать закономерности изменения содержания продуктов износа в масле по времени для нормального ТС и для характерных неисправностей. Диагностирование можно производить путем

сравнения графических зависимостей, полученных для конкретного ГТД, с диагностической номограммой, которая строится на основании обобщения результатов массовых наблюдений за двигателями данного типа. Для примера на рисунке 1 показаны данные по концентрации металла в масле при разной наработке двигателя.

По результатам анализа продуктов износа в масле и по динамике их изменения по времени наработки можно также прогнозировать надежность работы двигателя. Сущность прогнозирования надежности состоит в определении вероятности безотказной работы контролируемого парка двигателей для наработки, превышающей достигнутую, на основании зависимостей плотности и вероятности безотказной работы от наработки, построенным по статистическим данным.

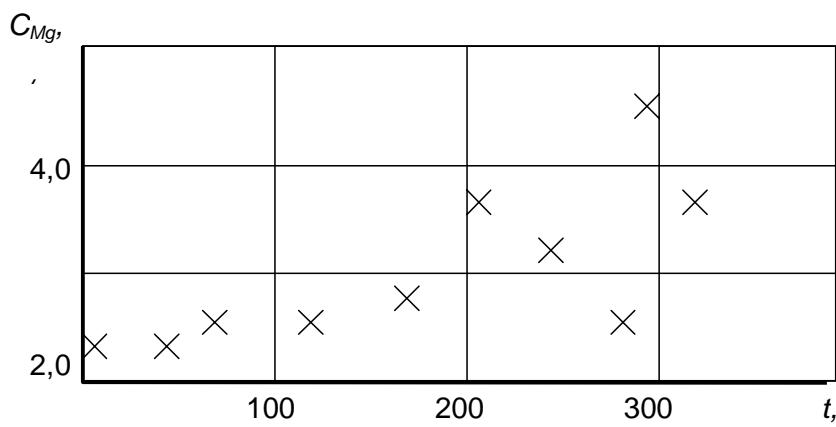


Рисунок 1 - Величины концентрации металла в масле

Один из способов определения продуктов изнашивания в работавших авиамаслах - это рентгеноспектральный метод с помощью анализатора БАРС-3, применяемого в лабораториях технической диагностики АТБ ГА с целью диагностирования технического состояния авиадвигателей.

Принцип действия анализатора основан на возбуждении и регистрации характеристического флуоресцентного излучения химических элементов, входящих в состав анализируемого вещества.

Соединённая с высоковольтным устройством рентгеновская трубка возбуждает характеристическое излучение химических элементов, входящих в состав образца. Регистрация флуоресцентного излучения образца осуществляется четырьмя спектрометрическими каналами, построенными по схеме дифференциального детектора. Детектор регистрирует с наибольшей эффективностью излучение, энергия которого лежит в узком диапазоне между значениями энергий краёв поглощения фильтра и излучателя, т.е. $E_t < E < E_2$. Излучение вне рабочего диапазона регистрируется со значительно меньшей эффективностью.

Кванты рентгеновского излучения преобразуются пропорциональным счётчиком в импульсы напряжения, которые усиливаются предусилителями, а затем подаются в пульт управления на устройство усилителей-формирователей и далее через клапан в устройстве управления на устройство пересчётоное, с помощью которого происходит измерение скоростей счёта импульсов, поступивших в течение заданного времени. Информация о скоростях счёта выводится на индикаторное табло. Время экспозиции задаётся автоматически с помощью таймерного устройства. Общее питание анализатора осуществляется от сетевого источника питания. Напряжение источника питания стабилизируется и преобразуется в другие напряжения, необходимые для работы анализатора, с помощью устройства преобразователей. Устройство усилителей стабилизации осуществляет стабилизацию и регулировку режимов работы рентгеновской трубки и пропорциональных счётчиков, воздействуя на регулирующие транзисторы, через которые подаётся питание на согласующую плату. Работа устройства усилителей стабилизации связана с переключателем «КАНАЛЫ» таким образом, что каждому спектрометрическому каналу соответствует вполне определённое наперёд заданное значение высокого напряжения и тока рентгеновской трубки. Этим достигается условие оптимального возбуждения рентгеновским излучением тех или иных элементов в анализируемом образце.

Контроль работоспособности изделия в процессе его эксплуатации сводится к сопоставлению текущих случайных значений параметров с их номинальными значениями с учетом допусков. Изделие считается работоспособным, если его параметры находятся в пределах этих допусков.

Значения измеренных параметров однотипных изделий вследствие неоднородности исходных материалов, влияния условий эксплуатации и других факторов отличаются от номинальных значений и являются случайными величинами. Поэтому наработка, при которой конкретное изделие достигнет предельного состояния, также является случайной величиной, имеющей определённое распределение.

Зная функциональную зависимость величины параметра от времени наработки, можно определить момент выхода параметра за пределы допуска, т. е. момент отказа изделия. Практически значения параметров могут быть получены в фиксированные моменты времени в соответствии с установленной периодичностью контроля (t_1, t_2, \dots, t_n).

Необходимо отметить, что такой метод определения изменения параметров используется только для тех отказов, которые происходят в результате постепенного изменения состояния изделия.

**2. Определение вероятности
безотказной работы
деталей ГТД, омываемых маслом,
в зависимости от наработки**

При определении надежности работы деталей ГТД, омываемых маслом, в качестве контролируемого параметра может рассматриваться концентрация продуктов изнашивания, например магния (C_{Mg}). Осуществляя контроль концентрации продуктов изнашивания однотипных изделий в фиксированной моменты времени или наработки (t_1, t_2, \dots, t_n), можно построить их распределения, характеризуемые соответствующими функциями плотности: $f(x, t_1), f(x, t_2), \dots, f(x, t_1), f(x, t_n)$.

Как правило, распределение значений параметров ГТД, включая и концентрации продуктов изнашивания деталей, подчиняется нормальному закону в фиксированные моменты наработки. Следовательно, плотность распределения параметров можно определить по формуле

$$f(x, t) = e^{-(x_i - m_x)^2 / 2\sigma_x^2} / \sigma_x, \quad (1)$$

где σ_x – среднеквадратическое отклонение;

m_x – математическое ожидание значения параметра x при наработке t ,

x_i – текущие значения параметра x при наработке t .

Взаимосвязь функции плотности распределения времени до первого отказа $\varphi(t)$ с одномерными характеристиками распределения случайного процесса $x(t)$ (распределение значений параметров в вертикальных сечениях) и границами поля допуска определяется выражением

$$f(x, t) = e^{\frac{\eta - m_x^2(t)}{2\sigma_x^2(t)} \cdot \left(\frac{\eta - m_x(t)}{2\sigma_x(t)} \right)^2} / \sqrt{2\pi}, \quad (2)$$

где η – верхняя граница допуска.

В качестве контролируемого параметра в данной лабораторной работе рассматривается предельно допустимое значение концентрации продуктов износа C_{dop} в масле авиационного ГТД.

Практически плотность и вероятность безотказной работы ГТД определяются следующим образом.

Весь диапазон наработки разбивается на k интервалов по способу, указанному в лабораторной работе № 7, и для каждого k -го интервала наработки рассчитываются

среднее арифметическое значение C_k и среднеквадратическое отклонение S_{Ck} концентрации металла в масле:

$$m_x = \bar{C}_k = \frac{1}{n} \sum C_i , \quad (3)$$

$$S_c = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C}_k)^2} , \quad (4)$$

где n - количество измерений в k -м интервале.

По формуле (1) определяются значения плотности распределения $f(C,t)$ в k -м интервале. При этом в формуле (1):

$x_i = C_{ki}$ - значения концентрации C_{ki} в k -м интервале; $m_x = \bar{C}_k$; $\sigma_x = S_{Ck}$

Вероятность выхода параметра за пределы допуска определяется по формуле:

$$P_{\text{вых}k} = 1 - \int_{-\infty}^{\bar{C}_{\text{доп}}} f(C,t) dC , \quad (5)$$

где $\bar{C}_{\text{доп}}$ - верхняя граница допуска.

Подставляя $f(C,t)$ в формулу (5), получаем

$$P_{\text{вых}k} = 1 - \int_0^{\bar{C}_{\text{доп}}} e^{-\frac{(C_i - \bar{C}_k)^2}{2S_{Ck}^2}} / S_{Ck} \sqrt{2\pi} dC , \quad (6)$$

Интеграл $\int_0^{\bar{C}_{\text{доп}}} e^{-\frac{(C_i - \bar{C}_k)^2}{2S_{Ck}^2}} / S_{Ck} \sqrt{2\pi} dC$ определяется с помощью табулированной функции Лапласа $\Phi(z)$ (см. лабораторную работу № 1).

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} / \sqrt{2\pi} dt , \quad (7)$$

где $z = (\bar{C}_{\text{доп}} - \bar{C}_k) / S_{Ck}$ и представляет собой площадь под кривой $f(x,t)$, ограниченную снизу предельно допустимым значением концентрации продуктов износа $\bar{C}_{\text{доп}}$ (заштрихованная область на рисунке 3.2).

При использовании функции Лапласа в формуле (3.6) получим:

$$\begin{aligned} P_{\text{вых}k} &= 1 - \Phi(z), \quad \text{при } z < 0, \\ P_{\text{вых}k} &= 0,5 + \Phi(z) \quad \text{при } z \geq 0. \end{aligned} \quad (8)$$

После определения $P_{\text{вых}k}$ для каждого k -го интервала вычисляются значения функции плотности распределения времени до первого отказа $\varphi(t)$ по формуле:

$$\varphi_k(t) = \frac{P_{\text{вых}k} - P_{\text{вых}(k-1)}}{t_k - t_{(k-1)}}, \quad (9)$$

где t_k и $t_{(k-1)}$ - границы k -го интервала.

Геометрически $\varphi_k(t)$ представляет собой среднюю высоту криволинейной трапеции каждого k -го интервала.

Вероятность безотказной работы ГТД по времени наработки приближенно может быть рассчитана по формуле

$$P(t) = 1 - \sum_{k=1}^m \varphi_k(t) \Delta t_k, \quad (10)$$

где m – количество интервалов наработки;

Δt_k – отрезок наработки в k -м интервале.

Плотности распределения концентраций в зависимости от наработки, а также график функции плотности распределения времени до первого отказа $\varphi(t)$ показаны на рисунке 2.

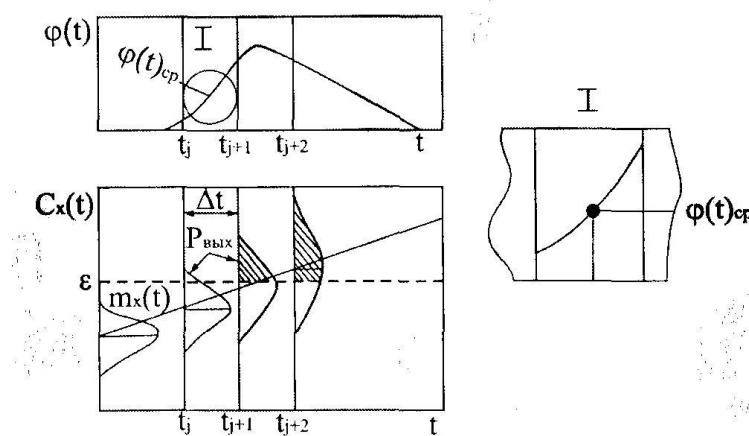


Рисунок 2 - Плотности распределения концентраций металла в масле и безотказной работы в зависимости

3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с работой портативного определителя металлов в масле (ПОМЖ или БАРС).
2. Определить концентрации металлов в пробах масла, отобранных из различных двигателей.
3. Используя результаты измерений или данные таблицы 1, представить данные по концентрации металла в масле от наработки (по образцу рисунка 1).
4. Весь диапазон наработки разбить на k интервалов.
5. Для каждого k -го интервала наработки рассчитать значения \bar{C}_k и S_{C_k} концентрации металла в масле по формулам (3) и (4).
6. Определить значения плотности распределения $f_k(C,t)$ в k -м интервале по формуле (1).
7. Определить вероятность выхода параметра за пределы допуска в k -м интервале $P_{\text{вых } k}$ по формуле (8).
8. Для каждого k -го интервала вычислить значения функции плотности распределения времени до первого отказа $\varphi(t)$ по формуле (9).
9. Результаты расчёта по пунктам 1...8 свести в таблицу 1

Таблица 1 Прогнозирование надежности

Параметр	Интервалы					
	1	2	...	k	$k+1$	m
$t_{(k-1)}$						
t_k						
Δt_k						
n_k						
\bar{C}_k						
S_{C_k}						
z_k						
$\Phi(z_k)$						
$P_{\text{вых } k}$						
$\varphi_k(t)$						

10. Построить гистограммы изменения $P_{\text{вых } k}$ и $\varphi(t)$ по интервалам наработки (построение гистограмм см. в лабораторной работе № 7)

11. Оценить вероятности безотказной работы контролируемого парка двигателей в течение 4000, 4500, 5000, 5500 часов эксплуатации по формуле (10), используя в ней соответствующие заданной наработке значения количества интервалов m .

12 Построить график изменения вероятности безотказной работы по наработке по данным таблиц 2 и 3.

Таблица 2 Изменение концентрации магния в масле по наработке двигателя

Номер двигате-ля	Наработка двигателя, ч	Концен-трация магния в масле, г/т
1	2	3
1	686	0,2
2	702	1,8
3	566	1,05
4	566	0,65
5	29	1,5
6	244	0,2
7	299	0,2
8	365	0,9
9	51	1,05
10	260	1,05
11	505	0,5
12	330	0,55
13	316	0,8
1	2	3
14	105	1,5
15	257	0,65
16	530	1,15
17	530	0,63
18	227	0,6
19	469	0,60
20	148	1,0
21	298	0,25
22	146	4,35

Номер двигате-ля	Наработка двигателя, ч	Концен-трация магния в масле, г/т
1	2	3
41	679	0,1
42	36	1,75
43	42	2,0
44	346	0,25
45	346	0,1
46	56	1,0
47	625	1,75
48	66	0,75
49	72	1,65
50	102	1,2
51	568	0,7
52	295	1,25
53	122	1,25
1	2	3
54	687	0,1
55	126	0,75
56	135	1,7
57	153	1,25
58	248	0,25
59	248	0,1
60	652	1,0
61	586	0,5
62	340	3,75

23	184	0,75	63	451	5,75
24	377	0,25	64	521	0,2
25	163	1,0	65	201	0,65
26	163	1,75	66	756	0,7
27	172	1,05	67	494	4,9
28	184	1,75	68	494	0,9
29	606	0,2	69	756	0,75
30	433	0,2	70	665	2,9
31	357	1,6	71	287	0,8
32	2	1,5	72	435	0,2
33	197	0,7	73	308	0,85
1	2	3	1	2	3
34	197	0,75	74	308	0,75
35	8	1,3	75	332	3,5
37	454	1,25	76	471	0,65
38	665	1,25	77	367	0,35
39	21	0,3	78	367	0,75
40	412	0,2	79	414	0,4

Таблица 3 Изменение концентрации алюминия в масле

по наработке двигателя

Номер двигателя	Наработка двигателя, ч	Концентрация алюминия в масле, г/т	Номер двигателя	Наработка двигателя, ч	Концентрация алюминия в масле, г/т
1	2	3	1	2	3
1	2	0,35	72	339	0,25
2	3	0,55	73	340	0,35
3	8	0,35	74	346	0,2

4	8	0,45
5	11	0,2
6	12	0,2
1	2	3
7	21	0,2
8	26	0,5
9	29	0,3
10	42	0,4
11	51	0,5
12	52	0,2
13	55	0,55
14	56	0,35
15	66	0,3
16	72	0,5
17	79	0,2
18	81	0,2
19	87	0,45
20	89	0,3
21	100	0,5
22	102	0,3
23	103	0,4
24	103	0,4
25	105	0,5
26	108	0,2
1	2	3
27	108	0,4
28	126	0,3

75	346	0,45
76	352	0,2
77	352	0,3
1	2	3
78	357	0,45
79	365	0,3
80	367	0,3
81	367	0,35
82	374	0,35
83	376	0,5
84	377	0,45
85	409	0,55
86	412	0,2
87	414	0,3
88	433	0,4
89	435	0,25
90	446	0,25
91	449	0,3
92	451	0,3
93	454	0,35
94	458	0,2
95	461	0,45
96	469	0,5
97	471	0,2
1	2	3
98	472	0,3
99	472	0,2

29	135	0,3
30	146	0,45
31	148	0,3
32	153	0,3
33	160	0,2
34	163	0,45
35	163	0,35
36	166	0,15
37	172	0,45
38	179	0,6
39	180	0,45
40	184	0,35
41	184	0,35
42	197	0,2
43	197	0,2
44	201	0,4
45	201	0,2
46	227	0,6
47	227	0,2
48	240	0,45
1	2	3
49	244	0,45
50	247	0,25
51	248	0,3
52	248	0,25
53	255	0,25
54	255	0,4

100	472	0,2
101	472	0,2
102	494	0,3
103	494	0,25
104	505	0,25
105	521	0,25
106	530	0,2
107	530	0,75
108	540	0,2
109	554	0,75
110	554	0,2
111	566	0,5
112	566	0,4
113	568	0,4
114	586	0,4
115	595	0,2
116	606	0,4
117	614	0,45
118	623	0,25
119	623	0,6
1	2	3
120	625	0,3
121	635	0,3
122	644	0,4
123	652	0,2
124	652	0,3
125	665	0,3

55	257	0,35
56	260	0,75
57	273	0,2
58	273	0,2
59	287	0,35
60	292	0,2
61	293	0,45
62	294	0,2
63	295	0,2
64	298	0,3
65	299	0,45
66	308	0,35
67	308	0,3
68	316	0,3
1	2	3
69	330	0,3
70	330	0,2
71	332	0,4

126	665	0,31
127	674	0,3
128	675	0,2
129	675	0,2
130	679	0,2
131	686	0,4
132	687	0,4
133	689	0,2
134	689	0,2
135	694	0,2
136	700	0,4
137	702	0,6
138	708	0,3
139	723	0,25
1	2	3
140	756	0,35
141	756	0,3
142	780	0,65

4. Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие материалы:

Титульный лист с указанием номера группы, ФИО студента, фамилии преподавателя, названия дисциплины, номера и названия лабораторной работы, даты выполнения работы. Титульный лист должен быть подписан студентом.

Далее отмечаются разделы.

Цель работы.

Краткое описание методов диагностирования технического состояния деталей ГТД, омываемых маслом.

Краткое описание метода прогнозирования характеристик надежности изделий.

Результаты измерений концентрации продуктов износа или таблицу исходных данных.

Графическую модель изменения контролируемого параметра и формирования плотности распределения времени возникновения отказов двигателей.

Расчет вероятности безотказной работы двигателей по наработке по данным таблицы 2.

Гистограммы изменения вероятности и плотности безотказной работы по интервалам наработки.

Расчет вероятности безотказной работы контролируемого парка двигателей в течение 4000, 4500, 5000, 5500 часов эксплуатации.

График изменения вероятности безотказной работы контролируемого парка двигателей по наработке.

5. Контрольные вопросы

Каков метод диагностирования технического состояния авиационных ГТД по изменению концентрации продуктов износа в масле?

Каков метод прогнозирования вероятности безотказной работы двигателя по изменению его параметров?

Какова цель прогнозирования надежности систем ГТД?

Как определяется вероятность безотказной работы деталей ГТД, омываемых маслом, в зависимости от наработки?

Лабораторная работа № 10

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЁЖНОСТИ
РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА****МЕТОДОМ****Цели работы:**

- 1)ознакомление с методами регрессионного анализа;
- 2)определение зависимости удельного расхода топлива от наработки двигателя по статистическим данным.

**1.Изменение параметров ГТД
в процессе эксплуатации.*****1.1 Необходимость статического анализа изменения параметров двигателя.***

В процессе эксплуатации авиационных ГТД наблюдается отклонение основных параметров двигателя от технических условий, что приводит к ухудшению лётно-технических данных самолёта и надёжности двигателя. Изменение параметров двигателя определяется интенсивностью износа элементов проточной части двигателя с наработкой. Значительные ресурсы современных двигателей требуют оценки изменения параметров двигателей с наработкой в эксплуатации. Одним из методов оценки изменения параметров является статистический анализ, заключающийся в построение регрессионных зависимостей параметров двигателя в зависимости от наработки.

Анализ экспериментальных данных по изменению параметров двигателя показывает, что при одной и той же наработке изменение параметров у различных двигателей неодинаково. Разброс параметров в значительной мере зависит от условий эксплуатации, погрешностей измерений и способов оценки параметров двигателя при снятии характеристик. Поэтому целесообразно определить влияние наработки на изменение параметров методом регрессионного анализа, полагая изменение параметров ΔP случайной величиной, а величину наработки τ - неслучайной величиной.

Вследствие различной интенсивности изменения параметров двигателей, обусловленной особенностями износа деталей и узлов проточной части двигателя, процесс изменения параметров двигателя по наработке описывается нелинейной (степенной) зависимостью вида

$$\Delta P(\tau) = b_0 \tau^b, \quad (4.1)$$

где ΔP - изменение параметра при наработке τ , b и b_0 - искомые коэффициенты регрессионной зависимости.

1.2 Сущность регрессионного анализа

Основной характеристикой вероятностной связи между случайной величиной y и неслучайной x является регрессия, т.е. зависимость математического ожидания (среднего значения) случайной величиной y от x . График этой зависимости называется линией регрессии.

Регрессионный анализ - это нахождение зависимости по отдельным значениям величин y и x (обычно по экспериментальным данным). Линейная зависимость между величинами или их логарифмами является наиболее распространённой. Уравнение линии регрессии имеет вид

$$m_y = \beta_0 + \beta_x, \quad (4.2)$$

где β , β_0 - параметры или коэффициенты регрессии.

Оценкой теоретической линии регрессии является эмпирическая линия регрессии, уравнение которой имеет вид

$$\bar{Y} = b_0 + b_x, \quad (4.3)$$

где \bar{Y}, b_0, b - оценки величин m_y, β_0, β соответственно.

Коэффициенты регрессии b и b_0 находят методом наименьших квадратов (МНК) (Приложение Г), в основу которого положено требование минимизации суммы квадратов отклонений результатов измерений от линии регрессии. Решением системы уравнений, составленных на основе этого требования, можно получить формулы для коэффициентов b и b_0 . Для этого определяются средние арифметические значения величин y и x

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n; \quad \bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n, \quad (4.4)$$

и значения коэффициентов b и b_0

$$b = \left(n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right) / \left[n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right], \quad (4.5)$$

$$b_0 = \bar{y} - b \cdot \bar{x}. \quad (4.6)$$

2. Построение линейной регрессионной зависимости. Методика обработки результатов испытаний

В данной лабораторной работе рассматривается изменение удельного расхода топлива $\Delta C_{y\partial}$ по наработке τ .

Зависимость изменения $\Delta C_{y\partial}$ с наработкой не является линейной и поэтому описывается степенной зависимостью вида (4.1)

$$\Delta C_{y\partial} = A \cdot \tau^b, \quad (4.7)$$

где $\Delta C_{y\partial}$ - изменение удельного расхода топлива; A и b - искомые коэффициенты регрессионной зависимости.

Логарифмируя данное уравнение, получим

$$\lg \Delta C_{y\partial} = \lg A + b \cdot \lg \tau, \quad (4.8)$$

Уравнение эмпирической линии регрессии представляем в виде

$$\bar{Y} = b_0 + b \cdot X, \quad (4.9)$$

где $\bar{Y} = \overline{\lg \Delta C_{y\vartheta}}$ - оценка математического ожидания $\lg \Delta C_{y\vartheta}$ при данном X ;

$X = \lg \tau$; $\lg A$ и b - коэффициенты, подлежащие определению.

Определяются \bar{x}, \bar{y} по формулам (4.4), где $x_i = \lg \tau_i$, $y_i = \lg \Delta C_{v\vartheta i}$, коэффициенты b и b_0 - определяются по формулам (4.5) и (4.6), а коэффициент A в уравнении (4.7) - по формуле

$$A = 10^{b_0}, \quad (4.10)$$

В логарифмических координатах рассеяние значений y_i относительно среднего арифметического значения оценивается среднеквадратическим выборочным отклонением S_y

$$S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}]^2} / (n-1). \quad (4.11)$$

Рассеяние значений $y_i = \lg \Delta C_{v\vartheta i}$ относительно линии регрессии (4.9) оценивается среднеквадратическим выборочным отклонением

$$S_{peep} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [y_i - y(x_i)]^2} / (n-2), \quad (4.12)$$

где $y(x_i)$ - значения y по регрессионной зависимости (4.9) при значении $x_i = \lg \tau_i$.

Средние арифметические значения $\bar{\Delta C}_{y\vartheta}$ и $\bar{\tau}$ определяются либо по формулам (4.4), либо по формулам

$$\bar{\Delta C}_{y\vartheta} = 10^y; \quad \bar{\tau} = 10^x \quad (4.13)$$

Рассеяние значений $\Delta C_{v\vartheta i}$ относительно среднего арифметического значения $\bar{\Delta C}_{y\vartheta}$ оценивается среднеквадратическим выборочным отклонением $S_{\Delta C_{y\vartheta}}$

$$S_{\Delta C_{y\vartheta}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\Delta C_{y\vartheta i} - \bar{\Delta C}_{y\vartheta}]^2} / (n-1) \quad (4.14)$$

Рассеяние значений $\Delta C_{v\vartheta i}$ относительно линии регрессии (4.7) оценивается среднеквадратическим выборочным отклонением S'_{peep}

$$S'_{peep} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\Delta C_{y\vartheta i} - \Delta C_{y\vartheta}(\tau_i)]^2} / (n-2), \quad (4.15)$$

где $\Delta C_{y\vartheta}(\tau_i)$ - значения $\Delta C_{y\vartheta}$ по регрессионной зависимости (4.7) при значениях τ_i .

3. Построение доверительных интервалов и доверительной зоны для линии регрессии

3.1 Определение доверительных интервалов и доверительной зоны для линии регрессии

Построенные выше по статистическим данным эмпирические регрессионные зависимости (4.7) и (4.9) являются только оценкой неизвестной истинной (теоретической) линии регрессии.

При оценке отклонений эмпирической линии регрессии от неизвестной нам истинной (теоретической) линии регрессии различают две задачи.

Первая задача: оценка с заданной доверительной вероятностью P величины отклонения истинного (теоретического) среднего значения зависимой переменной Y от эмпирического среднего $\hat{Y}(x)$, определённого по построенной эмпирической линии регрессии при данном фиксированном значении аргумента x_0 . Решение этой задачи позволяет построить "коридор" для линии регрессии, любое сечение которого прямой $x = x_0$, параллельной вертикальной оси, даёт доверительный интервал, в котором с заданной вероятностью P находится истинное значение среднего $Y(x_0)$ зависимой переменной (рис.4.1). Этот "коридор" не гарантирует расположения в нём с заданной вероятностью P истинной линии регрессии.

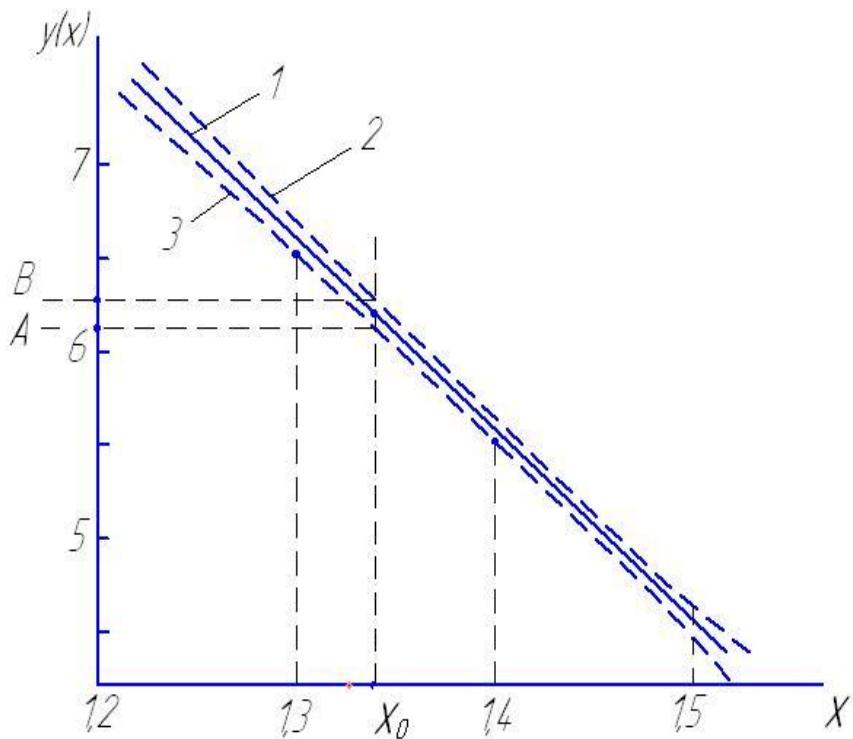


Рисунок 4.1 Доверительные границы для теоретической регрессионной прямой

Вторая задача: построение доверительной зоны для линии регрессии, т.е. такой области на плоскость xOy , в которой с заданной вероятностью P находится неизвестная линия регрессии (рис. 4.2)

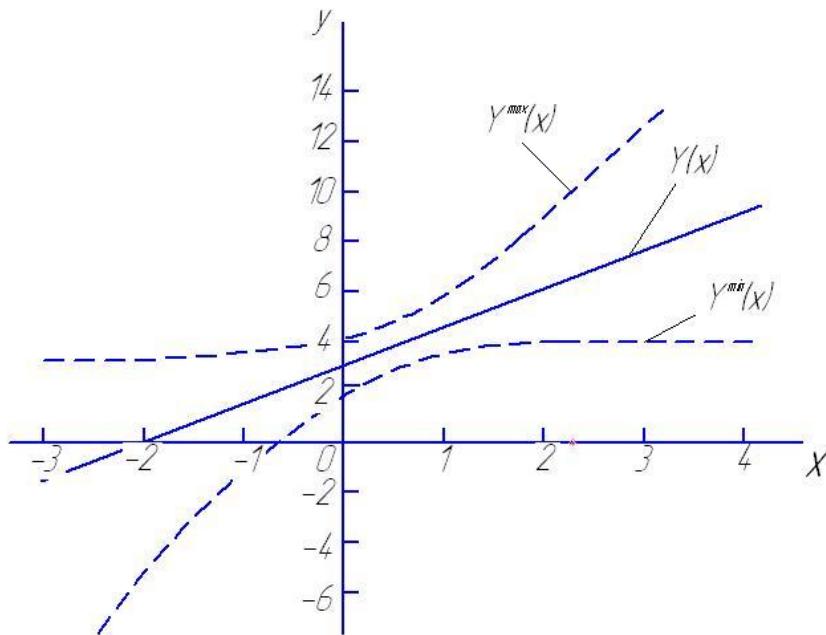


Рисунок 4.2 Доверительная зона линии регрессии

3.2 Построение доверительных интервалов

Оценка величины отклонения истинного (теоретического) среднего значения зависимой переменной Y от эмпирического среднего $\bar{Y}(x)$ с заданной доверительной вероятностью P (первая задача) производится при каждом фиксированном значении аргумента x с помощью квантиля (100 α - % точки) распределения Стьюдента $t_{\alpha/2,(n-2)}$ по формуле:

$$\Delta Y(x_i) = \pm t_{\alpha/2,(n-2)} \cdot S_x / n, \quad (4.16)$$

где α - уровень значимости; $\alpha = 1 - P$. Значение квантиля $t_{\alpha/2,(n-2)}$ определяется по таблице ДЗ Приложения Д "100 α - % $t_{\alpha,(n)}$ точки распределения Стьюдента t с n степенями свободы" по числу степеней свободы $v = n - 2$ и выбранному уровню значимости α . (Для линейного уравнения регрессии с двумя неизвестными коэффициентами число степеней свободы $v = n - 2$). Рекомендуемые значения α : 0,05; 0,01.; S_x - среднеквадратическое выборочное отклонение S_τ относительно среднего арифметического значения $\bar{\tau}$.

В этом доверительном интервале находятся истинные средние значения зависимой переменной Y при каждом фиксированном значении аргумента x , т.е.:

$$\bar{Y}(x_i) - \Delta Y(x_i) \leq Y(x_i) \leq \bar{Y}(x_i) + \Delta Y(x_i) \quad (4.17)$$

3.3 Построение доверительной зоны

для линии регрессии

Для построения доверительной зоны для линии регрессии в диапазоне значений независимой переменной $[X_1 \dots X_2]$ подсчитывают величины:

$$C = (X_1 - \bar{x}) / \sqrt{\sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}]^2} \quad (4.18)$$

$$D = (X_2 - \bar{x}) / \sqrt{\sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}]^2} \quad (4.19)$$

$$\lambda = \sqrt{1 - (1 + n \cdot C \cdot D)} / \sqrt{(1 + n \cdot C^2) \cdot (1 + n \cdot D^2) / 2} \quad (4.20)$$

Затем по значениям "входных" параметров: доверительной вероятности $P, v = n - 2$ и λ из таблицы Д4 Приложения Д "Доверительные зоны для линии регрессии критические значения $U_{v,P,\lambda}$ " находят величину $U_{v,P,\lambda}$. Искомая доверительная зона задаётся двумя прямыми $Y^{\min}(x)$ и $Y^{\max}(x)$

$$Y^{\min}(x) = (\bar{Y}(x) - U_{v,P,\lambda} \cdot S_{peep}) / \sqrt{n}, \quad (4.21)$$

$$Y^{\max}(x) = (\bar{Y}(x) + U_{v,P,\lambda} \cdot S_{peep}) / \sqrt{n}. \quad (4.22)$$

4. Порядок выполнения работы

4.1 Ознакомиться с теоретическими основами построения регрессионной зависимости.

4.2 По статистическим данным (табл. 4.1) определить коэффициенты регрессии в логарифмических координатах.

4.3 Определить коэффициенты степенной регрессионной зависимости.

4.4 Определить величины рассеяния значений ΔC_{vdi} относительно среднего арифметического и относительно линии регрессии в логарифмических координатах и в абсолютных значениях.

4.5 Сравнить величины рассеяния значений ΔC_{vdi} относительно среднего арифметического и относительно линии регрессии в каждой системе координат и объяснить причины их различия.

4.6 Построить графики логарифмической и степенной регрессионных зависимостей.

4.7 Рассчитать и построить доверительные интервалы для линии регрессии в логарифмических координатах.

4.8 Рассчитать и построить доверительную зону для линии регрессии в логарифмических координатах.

5. Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие материалы.

5.1 Титульный лист с указанием номера группы, ФИО студента, фамилии преподавателя, названия дисциплины, номера и названия лабораторной работы, даты выполнения работы. Титульный лист должен быть подписан студентом.

5.2 Цель работы.

5.3 Описание метода построения регрессионных зависимостей.

5.4 Таблицу исходных данных.

5.5 Расчёт коэффициентов логарифмической и степенной регрессионных зависимостей.

5.6 Расчёт значений среднего арифметического и среднеквадратических отклонений относительно среднего арифметического и относительно линии регрессии в логарифмических координатах и в абсолютных значениях.

5.7 График логарифмической регрессионной зависимости, доверительных интервалов и доверительной зоны для неё.

5.8 График степенной регрессионной зависимости.

6. Контрольные вопросы

6.1 Какие виды переменных величин описываются регрессионными зависимостями.

6.2 Сущность регрессионного анализа.

6.3 Физические предпосылки применения регрессионного анализа для оценки изменения параметров ГТД в зависимости от наработки.

6.4 Области использования метода регрессионного анализа на практике.

6.5 Различие между доверительными интервалами и доверительной зоной для линии регрессии.

Лабораторная работа № 11

Определение показателей безотказной работы модулей наземных ГТУ по эксплуатационным данным

Цели работы:

- 1) изучить планы наблюдений при сборе статических данных об отказах модулей ГТУ в эксплуатации;
- 2) ознакомиться с методами сбора и обработки статических данных об отказах и неисправностях модулей ГТУ;
- 3) освоить основные показатели безотказной работы модулей и методы их определения по статическим эксплуатационным данным;
- 4) определить по статическим данным показатели безотказной работы модулей ГТУ за выбранный интервал.

1. Планы наблюдений при сборе статических данных об отказах модулей в эксплуатации

Для сбора статистической информации о надёжности изделий необходимо выбрать план наблюдений. Различают следующие планы наблюдений, имеющих соответствующие условные обозначения:

$$[N, U, N]; [N, U, T]; [N, U, r]; [N, R, T]; [N, R, r],$$

где N – общее число наблюдаемых изделий;

U – планы для неремонтируемых изделий (отказавшие изделия в дальнейшем могут быть отремонтированы, но их отказы после ремонта из рассмотрения исключаются);

T – установленное время наблюдения;

R – планы для ремонтируемых изделий (результаты наблюдения за отремонтированными изделиями включаются в общие вплоть до снятия изделия с эксплуатации);

r – число отказов (предельных состояний), до возникновения которых проводятся наблюдения.

Указанные планы понимаются следующим образом.

$[N, U, N]$ – наблюдаются N изделий, наблюдение ведётся до отказа (наступления предельного состояния всех изделий, отказавшее изделие новым не заменяется (случай полной выработки). Этот план требует длительного времени наблюдения.

$[N, U, T]$ – наблюдаются N изделий, наблюдение ведется до наступления заданного момента T , отказавшие изделия новыми не заменяются (усечённая выработка).

$[N, U, r]$ – наблюдаются N изделий, наблюдение ведётся до появления r отказов, отказавшие изделия новыми не заменяются (усечённая выборка).

$[N, R, T]$ – наблюдаются N изделий, наблюдение ведется до наступления заданного момента T , отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются (усечённая выборка).

$[N, R, r]$ – наблюдаются N изделий, наблюдение ведётся до появления r отказов, отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются (усечённая выборка).

Последние четыре плана осуществляются на основе усечённых выборок и легко воспроизводимы в условиях как обычной эксплуатации, так и при различных видах испытаний.

Суть усечённой выборки, например для плана $[N, U, T]$, состоит в следующем: N объектов наблюдается в течение времени t_a . При этом, если отказ появляется при наработке меньшей t_a , то фиксируется эта наработка t_i . Если отказ не появился за время t_a , то наблюдение прекращается. Например, при рассмотрении свободной турбины, имеющей ресурс T_p , если отказ обнаружен до отработки ресурса, то фиксируется наблюдение t_p , если отказ не обнаруживается, то свободная турбина снимается с эксплуатации по отработке ресурса.

В зависимости от вида плана наблюдения, теоретические параметры распределений рассчитываются по разным формулам.

Независимо от плана наблюдения, последовательность обработки статических данных при определении функций распределения такая, как изложена далее.

2. Объём и содержание статических данных об отказах модулей ГТУ в эксплуатации

2.1 Исходные статические данные

В настоящей лабораторной работе рассматриваются модули газотурбинных двигателей (ГТД), используемых в газоперекачивающих агрегатах (ГПА). Модулями ГТУ являются газогенератор (ГГ) и свободная турбина (СТ).

В состав исходных статистических данных для выполнения количественной оценки безотказности модулей ГТУ входят:

- поинтервальная (в пределах гарантированного, межремонтного и назначенного ресурсов) наработка ГГ и СТ на отдельных компрессорных станциях (КС) и в целом;
- полная характеристика ГГ и СТ, на которых проявились отказы, приведшие к их съёму;
- полная характеристика ГГ и СТ, на которых проявились неисправности, устраниённые в условиях эксплуатации, в том числе заменой сборочных единиц и покупных комплектующих изделий (ПКИ);
- характер и причина отказа модуля, которая устанавливается в эксплуатации и уточняется по результатам исследования на заводе-изготовителе;
- суммарное количество неисправностей, выявленных за определенный календарный период эксплуатации (квартал, полугодие, год, несколько лет) группы модулей данного типа;
- наработка модулей за рассматриваемый период эксплуатации.

2.2. Категории модулей и классификация отказов

1. При оценке безотказности модули ГТУ разделяются на следующие категории:

- модули, эксплуатируемые в пределах гарантийного ресурса;
- модули, эксплуатируемые до первого капитального ремонта или в пределах межремонтного ресурса;
- модули, эксплуатируемые в пределах назначенного ресурса.

2. Расчёт среднестатистических показателей безотказности производится только по конструктивно-производственным отказам (дефектам).

3. При расчёте безотказности отдельных модулей (ГГ и СТ) учитываются только независимые (первичные) отказы.

4. Повреждения нескольких деталей (сборочных единиц), вызванных отказом или неисправностью какого-либо узла ГГ или СТ, обнаруженные одновременно, рассматриваются как одна неисправность.

5. Конструктивно-производственные отказы разделяются на следующие группы:

1) дсд – отказ или неисправность ГГ или СТ, приведший к их досрочному съему и изъятию из эксплуатации до выработки ресурса (независимо от того, где они произошли и когда были выявлены);

2) оуэ – отказ или неисправность ГГ или СТ, устранивший в эксплуатации без съема и изъятию из эксплуатации до выработки ресурса (независимо от того, где они произошли и когда были выявлены);

3) ока – отказ или неисправность комплектующих (покупных) агрегатов, приведший к их досрочному съему и изъятию из эксплуатации;

4) ор – отказ или неисправность, проявившиеся при наработках, превышающих установленные эксплуатационно-технической документацией (ЭТД) межремонтный или назначенный ресурсы; классифицируется как отработка ресурса (ОР).

3. Показатели безотказной работы модулей

3.1. Количественные показатели

1. Количественные показатели безотказности модулей ГТУ дифференцируются в зависимости от характера, обстоятельств, места проявления, последствий и других признаков.

В зависимости от вида количественной оценки безотказности, характера и объема статистической информации определяются или среднестатистические показатели, относящиеся к какому-либо календарному периоду эксплуатации (квартал, полугодие, год, несколько лет), или характеристики, выражющие непрерывную зависимость показателей безотказности от наработки.

2. Основными задачами количественной оценки безотказности являются:

1) Определение показателей и характеристик безотказности;

2) Выявление недостаточно надёжных узлов, агрегатов и деталей модулей ГТУ с целью разработки необходимых мероприятий для устранения конструктивных и производственных недостатков;

3) Оценка эффективности мероприятий, проводимых с целью повышения надёжности модулей ГТУ.

3. Количественные показатели безотказности используются как исходные данные для решения ряда важных практических задач, например:

1) установление обоснованных норм безопасности;

- 2) оценка правильности установления ресурса и возможности его дальнейшего увеличения;
- 3) вычисление объёма и периодичности выполнения регламентных работ и различных видов технического обслуживания;
- 4) определение влияния различных условий эксплуатации на безотказность модулей ГТУ;
- 5) оценка возможности перевода ГТУ в целом и отдельных модулей ГТУ на эксплуатацию по техническому состоянию (ЭТС).

3.2. Среднестатистические показатели безотказности

1. Для каждой группы отказов определяются среднестатистические величины наработка на отказ или неисправность по совокупности модулей данного типа в целом и по отдельным их функциональным группам за определенный календарный период эксплуатации (квартал, полугодие, год, несколько лет).

2. По статистическим данным эксплуатации модулей определяются:

$T_{dc\delta}^*$ – среднестатистическая наработка на суммарное количество неисправностей модуля, приведший к досрочному съему модуля и изъятию его из эксплуатации;

T_c^* – среднестатистическая наработка на суммарное количество неисправностей;

T_{cp}^* – средняя наработка снятых и изъятых из эксплуатации модулей;

K_{1000} – коэффициент количества отказов на 1000 часов наработки;

λ – интенсивность отказов;

P – вероятность безотказной работы;

τ_{dp} – фактически вырабатываемый ресурс;

$K_{u.p.}$ – коэффициент использования ресурса;

K_o – коэффициент отказов.

3. Наработка на проявившийся отказ или неисправность $T_{dc\delta}^*$ определяется как отношение суммарной наработки t_{Σ} рассматриваемых модулей к общему количеству их отказов или неисправностей n .

$$T_{\partial cm}^* = \frac{t_{\Sigma}}{n_{\partial cm}}, \quad (1)$$

где $t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N t_i$;

t_i – наработка каждого из рассматриваемых модулей в часах;

N – общее число рассматриваемых модулей данного типа;

$n_{\partial cd}$ - суммарное количество отказов по КПН, приведших к съёму модулей и изъятию их из эксплуатации.

4. T_c^* – среднестатистическая наработка на отказ или неисправность, приведших как к досрочному съёму модуля с изъятием его из эксплуатации, так и к устранению неисправностей в эксплуатации (посредством ремонта или замены деталей, сборочных единиц, агрегатов модуля), вычисляется по формуле:

$$T_c^* = \frac{t_c}{n_c} \quad (2)$$

где t_c – суммарная наработка эксплуатируемых модулей за рассматриваемый период;

n_c – суммарное количество отказов, приведших к съёму модулей, и неисправностей, устраниённых в эксплуатации,

$$n_c = n_{\partial cm} + n_{oye} + n_{cka}, \quad (3)$$

где n_{oye} – количество отказов (неисправностей) по КПН, устраниённых в эксплуатации без съёма модуля;

n_{cka} – количество снятых комплектующих (покупных) агрегатов.

5. T_{cp}^* – средняя наработка снятых и изъятых из эксплуатации модулей, вычисляется по формуле:

$$T_{cp}^* = \frac{t_{ch}}{n_{ch}} \quad (4)$$

где t_{ch} – суммарная наработка снятых и изъятых из эксплуатации модулей;

n_{ch} – суммарное количество отказов, приведших к съёму модулей и изъятию их из эксплуатации:

$$n = n_{ocd} + n_{op}, \quad (5)$$

где n_{op} – суммарное количество снятых по ОР модулей;

$n = n_{op} + n_{ocd}$ – суммарное количество модулей, выработавших ресурс n_{op} и досрочно снятых n_{ocd}

Показатель T_{cp}^* рассчитывается в пределах отработки назначенного ресурса.

6. Среднее значение интенсивности отказов λ определяется как постоянная (средняя) величина за соответствующий календарный период эксплуатации модуля данного типа, она выражается величиной, обратной T_{ocm}^* :

$$\lambda = \frac{1}{T_{ocm}^*} \quad (6)$$

7. При известных значениях T_{ocd}^* и λ определяется вероятность P безотказной или исправной работы модуля в целом или его основных функциональных групп, систем и агрегатов:

$$P = e^{-\lambda \tau}, \quad (7)$$

где τ - ресурс (наработка).

8. Наряду с основными показателями безотказности используются частные коэффициенты (показатели), позволяющие полнее охарактеризовать уровень надёжности.

Коэффициенты количества отказов на 1000 часов наработка K_{1000} характеризуют количество снятых модулей по КПН на каждые 1000 часов наработки всех модулей, находящихся в эксплуатации в рассматриваемый период:

$$K_{1000} = \frac{1000}{T_{ocm}^*} = \frac{1000 n_{ocm}}{t_c}. \quad (8)$$

При экспоненциальном законе распределения отказов

$$K_{1000} = \frac{1000}{T_{ocm}^*} = 1000 \lambda_{ocm}^*. \quad (9)$$

Таким образом, K_{1000} при экспоненциальном законе распределения прямо пропорционален усредненному значению интенсивности отказов и отличается от него лишь постоянным множителем.

Коэффициент K_{1000} может подсчитываться как за определенный период времени (месяц, квартал, год и т.д.), так и по данным эксплуатации на определенную дату (например, с начала эксплуатации на 1.01.2007 г. или с 1.01.2006 г. по 1.01.2007 г.).

9. Средний фактически выработанный ресурс $\tau_{\phi p}$ вычисляется по формуле

$$\tau_{\phi p} = (1 - P) \cdot T_{cp}^* + P \cdot \tau, \quad (10)$$

где T_{cp}^* – средняя наработка снятых и изъятых из эксплуатации модулей;

P – вероятность безотказной работы модуля;

τ – ресурс (наработка).

10. Коэффициент использования ресурса $K_{u.p.}$ характеризует степень выработки модулем установленного ресурса. Статически он определяется как отношение суммарной фактической наработки всех модулей, снятых с эксплуатации (досрочно и после выработки ресурса), к теоретической суммарной наработке рассматриваемых модулей при условии, что они полностью выработали установленный им ресурс.

$$K_{u.p.} = \frac{(n_{op} \tau + \sum_{i=1}^{n_{dcm}} t_{i,dcm})}{n \cdot \tau} \quad (11)$$

или

$$K_{u.p.} = \frac{\tau_{\phi p}}{\tau}, \quad (12)$$

где τ – установленный ресурс.

Наоборот, зная коэффициент $K_{u.p.}$, можно определить средний фактически выработанный ресурс

$$\tau_{\phi p} = K_{u.p.} \cdot \tau. \quad (13)$$

11. Коэффициент отказов K_o характеризует удельный вес отказов i -ого узла, системы, элемента и, следовательно, позволяет определить влияние проведённых мероприятий по устранению выявленных отказов данного узла, системы, элемента

на повышение надёжности модуля и надёжности какого-то узла, системы, элемента надо увеличить, чтобы повысить надёжность модуля в целом.

Коэффициент отказов K_o представляет собой отношение числа отказов из-за выхода или строя данного узла, системы, элемента или детали, к общему числу отказов всех модулей:

$$K_o = \frac{n_i}{n_{\Sigma}}, \quad (14)$$

где n_i – число отказов i -ого узла, системы, элемента или детали;

n_{Σ} – общее число отказов модулей.

Коэффициенты отказов могут рассчитываться как для одного модуля, так и для определённого количества однотипных модулей в принятом интервале времени (наработки).

4. Определение показателей безотказности работы модулей по статическим данным

1. Количественная оценка показателей безотказной работы модулей проводится на основании информации об отказах (неисправностях) и суммарной наработки модулей за рассматриваемый календарный период времени.

2. На основании окончательно установленной статической информации об отказах и неисправностях определяются общее количество неисправностей, выявленных в эксплуатации, по конструктивным и производственным недостаткам (КПН) – ($n_{КП}$), и количество неисправностей раздельно по каждой группе, указанной в пункте 2.3: $n_{\partialcm}, n_{oy}, n_{cka}, n_{op}$.

3. Результаты окончательно установленной статической информации по указанным показателям заносятся в табл.1

Таблица 1

Общее число неисправностей модуля № 1 за период эксплуатации с ... по

№ пп	$n_{КП}$	В том числе			
		n_{\partialcm}	n_{oy}	n_{cka}	n_{op}

1	2	3	4	5	6

4. На основании окончательно установленной информации о количестве неисправностей n и суммарной наработки t_{Σ} модулей одного наименования (модификации) за рассматриваемый период эксплуатации определяются среднестатистические (*) показатели безотказности, указанные в пункте 2 раздела 3.2: $T_{dcm}^*, T_c^*, T_{cp}^*, K_{1000}, \lambda, P, \tau_{fp}, K_{u.p.}$.

5. Полученные значения указанных показателей заносятся в табл.2.

Таблица 2

Показатели безотказности модуля № 1 за период эксплуатации с...по...

№ пп	Наработка на отказ (неисправность) в часах			Интенсивность отказов	ВБР		Коэффициенты	
	T_{dcm}^*	T_c^*	T_{cp}^*		λ	P	τ_{fp}	$K_{u.p.}$
1	2	3	4	5	6	7	8	

6. Для основных узлов и систем газогенератора (компрессора, камеры сгорания, турбины, маслосистемы, системы регулирования, системы топливопитания и др.) определяются коэффициенты отказов K_o .

5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с планами наблюдений при сборе статистических данных об отказах модулей ГТУ в эксплуатации и определить план, по которому представлены статистические данные об отказах и неисправностях модулей ГТУ

2. Ознакомиться с классификацией отказов по группам и модулям ГТУ по категориям.

3. Изучить основные показатели безотказной работы модулей и методы их определения по статистическим эксплуатационным данным.

4. Сформулировать по статистическим данным таблицу 1.

5. Определить по статистическим данным показатели безотказной работы модулей ГТУ за выбранный интервал.

6. Для основных узлов и систем газогенератора определить коэффициенты отказов K_o .

6. Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие материалы:

- 1) титульный лист с указанием номера группы, ФИО студента и его подписи, фамилии преподавателя и его подписи, названия дисциплины, номера и названия лабораторной работы, даты выполнения работы;
- 2) цели работы;
- 3) описание планов наблюдений при сборе статистических данных об отказах модулей ГТУ в эксплуатации;
- 4) таблицу исходных данных;
- 5) описание классификации отказов по группам и модулей ГТУ по категориям;
- 6) описание основных показателей безотказной работы модулей и методы их определения по статистическим эксплуатационным данным;
- 7) результаты обработки статистических данных об отказах модуля по форме табл. 1;
- 8) результаты расчёта показателей безотказной работы модуля по форме табл. 2;

7. Контрольные вопросы

- 1) какие планы наблюдений, используются при сборе статистических данных об отказах модулей ГТУ в эксплуатации?
- 2) какова классификация отказов по группам?
- 3) какие основные категории модулей используются в ГТУ?
- 4) какие основные показатели характеризуют безотказную работу модулей?