

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

# ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГТД ПО ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Методические указания

Составители: *Н. И. Епишев, В. А. Кочуров*

УДК 629.7.036(0.75)

Техническое диагностирование ГТД по термогазодинамическим параметрам: Метод. указания / Куйбышев. авиац. ин-т; Сост. *Н. И. Епишев, В. А. Кочуров*. Куйбышев, 1990. 20 с.

Рассматриваются вопросы диагностирования проточной части газотурбинных двигателей методом анализа термогазодинамических параметров, регистрируемых при работе двигателя. Приведены технологические указания по диагностированию двигателя НК-8-2У на самолете Ту-154 с использованием информации, получаемой по штатным приборам силовой установки.

Методические указания составлены применительно к программе курса «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» и рассчитаны на студентов старших курсов специальности 1303. Разработаны кафедрой «Эксплуатация летательных аппаратов и двигателей».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королёва.

Рецензент: *В. А. Литов*

Цель работы — изучение методики диагностирования ГТД по измеряемым термогазодинамическим параметрам, приобретение навыков измерения, обработки и анализа параметров.

В процессе выполнения лабораторной работы решаются следующие задачи:

ознакомление студентов с ТРДД как объектом диагностирования по термогазодинамическим параметрам;

изучение методики обработки и анализа параметров, применяемой при диагностировании с глубиной поиска неисправностей до узла проточной части ГТД;

практическое освоение методики измерения, обработки и анализа параметров двигателя НК-8-2У на самолете Ту-154.

## **1. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Изучить методику проведения работы по настоящему указанию. При домашней подготовке рекомендуется пользоваться конспектом лекций по курсу «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» и дополнительной литературой [1—3].

2. Подготовить самолет Ту-154 к запуску двигателей, запустить и опробовать двигатели, выключить двигатели и произвести заключительные работы на самолете. Запуск и опробование двигателя проводится в соответствии с инструкциями 4.

3. Обработать данные измерений параметров и дать заключение о состоянии двигателя.

4. Оформить отчет.

## **2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГТД ПО ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ**

### **2.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДА**

Диагностирование ГТД с использованием в качестве носителей диагностической информации термогазодинамических параметров (параметрический метод диагностирования) базируется на спе-

циальной математической обработке и анализе значительных параметров, измеренных на работающем двигателе. К числу термогазодинамических параметров относятся давление и температура воздуха и газа в различных сечениях проточной части двигателя, расход топлива, частота вращения роторов и т. п.

Сущность параметрического метода диагностирования заключается в том, что определяются отклонения измеренных значений параметров от их базовых значений. По величине отклонений делается заключение о правильности функционирования двигателя и его исправности. При достаточной номенклатуре измеряемых параметров можно осуществлять диагностирование с целью поиска неисправности (дефекта), т. е. указывать составную часть двигателя, имеющую дефект.

В качестве базовых обычно используются значения параметров исправного двигателя, полученные при проведении заводских стандартных испытаний (формулярные значения) или значения параметров двигателя в начальный период его эксплуатации (первые 10...20 полетов).

Метод диагностирования по термогазодинамическим параметрам может быть применен для обнаружения только тех неисправностей (дефектов), которые приводят к изменению параметров рабочего процесса двигателя. К их числу относятся разнообразные отклонения геометрии элементов проточной части двигателя вследствие эрозии и отложений загрязнений, прогар лопаток соевых аппаратов турбин, повреждения (деформация), обрыв, оплавление лопаток компрессоров и турбин, разрушение уплотнительных слоев рабочих колец, перетекание воздуха из внутреннего в наружный контур ТРДД, а также нарушения работы систем регулирования двигателя, связанные с усадкой пружин центробежных датчиков, неправильной регулировкой или неисправностями систем управления РНА, КПВ, реверса тяги и т. д. Неисправности (дефекты), не приводящие к изменению параметров рабочего процесса ГТД — трещины в элементах конструкции, неисправности опор роторов в начальной стадии и т. п., описываемым методом обнаружены быть не могут.)

(Особенностью применения метода диагностирования по термогазодинамическим параметрам является то, что параметры двигателя связаны между собой соотношениями, вытекающими из хорошо согласующейся с практикой теории ГТД. Имеется возможность достаточно строгого математического описания рабочего процесса двигателя, т. е. создания диагностической математической модели, отражающей влияние неисправностей (дефектов) различных узлов проточной части на термогазодинамические параметры.)

Использование математических моделей в целях диагностирования дает возможность по величине отклонения измеряемых па-

раметров от их исходных (базовых) значений оценить величину изменения характеристик узлов — КПД компрессоров и их производительности, КПД и пропускной способности турбин и т. д., а также характеристик двигателя в целом — тяги, мощности, удельного расхода топлива.

Параметры, описывающие функциональные свойства узлов двигателя, т. е. их КПД, производительность, коэффициенты потерь, в теории ГТД принято называть первичными в отличие от зависящих от них вторичных параметров — давлений, температур, расходов воздуха и газа, частот вращения роторов и т. д. Все вторичные параметры в принципе могут быть измерены, хотя обычно измеряется лишь часть из них. В теории технической диагностики величины, характеризующие способность объекта диагностирования выполнять свои функциональные свойства, называются параметрами состояния. Величины, функционально или вероятностно связанные с ними — признаками состояния. Признак (параметр) объекта, используемый в установленном порядке для определения технического состояния, называется диагностическим. Применительно к параметрической диагностике первичные параметры ГТД являются, следовательно, параметрами состояния, вторичные — признаками состояния, а измеряемые параметры — диагностическими.)

Измерение параметров с целью диагностирования осуществляется как в полете, так и при наземном опробовании двигателей. Регистрация результатов измерений может осуществляться вручную или автоматически с помощью специальных устройств. В качестве последних чаще всего используются магнитные регистраторы типа МСРП. Автоматическая регистрация имеет ряд преимуществ: одновременная запись многих параметров, регистрация на переходных режимах, большой объем информации вследствие ее непрерывной записи. В настоящее время применяются оба вида регистрации, однако для некоторых двигателей, в том числе для НК-8-2У, применение находит также ручная запись параметров двигателя экипажем в полете и наземным составом при опробовании двигателей. Для диагностирования при ручной регистрации параметров используются показания штатных приборов, которые традиционно использовались для управления двигателями, контроля их работоспособности, решения навигационных задач.

Независимо от типа ГТД, числа и номенклатуры измеряемых параметров, способа их регистрации обработка результатов измерения с целью диагностирования содержит ряд обязательных вычислительных операций. Таковыми являются: приведение измеренных параметров к стандартным атмосферным условиям (САУ), приведение к заданному режиму работы и определение отклоне-

ний найденных таким образом значений параметров от их базовых значений на данном режиме, сравнение отклонений с их предельными значениями и определение вида технического состояния двигателя (исправен, неисправен), анализ полученных результатов с целью выявления места неисправности. В случае многократных измерений в изложенную последовательность вычислений добавляются элементы статистической обработки: оценка разброса результатов измерения, отбраковка явно ошибочных измерений, «сглаживание» результатов, то есть их аппроксимация по какому-то виду аналитической зависимости (линейной, экспоненциальной и т. д.). В результате такой обработки повышается точность оценки отклонений параметров от базы и выявляется тенденция их изменений.

В настоящей работе выполняется вся процедура диагностирования за исключением статистической обработки, так как измерение разовое. Должно быть выполнено измерение параметров, приведение их к САУ и заданному режиму работы двигателя, определение отклонений от базовых значений, анализ с целью определения технического состояния двигателя.

## 2.2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ

Принятие решения о виде технического состояния двигателя, как отмечено выше, осуществляется сравнением значений определенных параметров с нормами на допускаемые их отклонения. Для этих целей используется относительная величина

$$\delta P = \frac{P - P_0}{P_0} 100\% , \quad (1)$$

где  $P$ ,  $P_0$  — определенное при текущем испытании и базовое значения параметра соответственно;

$\delta P$  — относительное отклонение параметра.

Условие исправности двигателя  $\delta P_{\min} < \delta P < \delta P_{\max}$ , где  $\delta P_{\min}$ ,  $\delta P_{\max}$  — нижнее и верхнее допускаемое отклонение параметра.

Очевидно, что сравнение параметров по уравнению (1) должно осуществляться при условии приведения результатов измерения к САУ и к одинаковому режиму работы. Приведение параметров к САУ осуществляется по следующим уравнениям [3]:

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{изм}} \sqrt{\frac{288}{T_{\text{н}}}} ; \quad (2)$$

$$T_{\text{пр}}^* = T_{\text{изм}}^* \frac{288}{T_{\text{н}}} ; \quad (3)$$

$$G_{\text{т пр}} = G_{\text{т изм}} \frac{760}{P_{\text{н}}} \sqrt{\frac{288}{T_{\text{н}}}} , \quad (4)$$

где  $n$  — частота вращения ротора двигателя;

$T = t^{\circ}\text{C} + 273$  — абсолютная температура воздуха (газа);

$G_T$  — расход топлива;

$T_H, P_H$  — температура и давление воздуха на входе в двигатель в момент испытания;

288К, 760 мм рт. ст. — параметры стандартной атмосферы при  $H=0$ .

Индексом «пр» в уравнениях (2) — (4) обозначены приведенные к САУ, индексом «изм» — измеренные параметры.)

Уравнения (2) — (4) вытекают из классической теории подобных режимов работы компрессоров и турбин при условии постоянства геометрии элементов проточной части двигателей, постоянства теплоемкости воздуха и продуктов сгорания, влажности воздуха. Однако в реальных условиях при изменении  $P_H$  и  $T_H$  все эти величины изменяются и влияют на параметры двигателя. Поэтому в формулы приведения часто вводят поправочные коэффициенты, определяемые эмпирически и учитывающие влияние влажности, теплоемкости воздуха и других факторов. С учетом поправки формула приведения расхода топлива, например, примет следующий вид:

$$G_{T\text{ пр}} \approx G_{T\text{ изм}} \frac{760}{P_H} \sqrt{\frac{288}{T_H}} \frac{1}{B_G}, \quad (5)$$

где  $B_G = f(t_H)$  — поправочный коэффициент.

Уравнения (2) — (5) применяются при обработке результатов наземных испытаний и параметров, регистрируемых на малых высотах полета. При обработке данных, полученных на крейсерских высотах, осуществляется приведение к условиям полета на высоте, принятой за базовую. Например, параметры двигателя НК-8-2У, полученные в условиях полета, приводятся к САУ для  $H=11$  км;  $M=0,8$ ;  $T_H=244,2$  К;  $P_H=258,5$  мм рт. ст.

Необходимость приведения результатов испытания к заданному режиму работы двигателя объясняется тем, что при регистрации параметров в условиях полета режим работы не может задаваться произвольно, он определен условиями полета, а базовые значения зафиксированы на конкретных режимах (взлетном, номинальном). При наземных испытаниях режим работы чаще всего задается положением рычага управления двигателем ( $\alpha_{руд}$ ), поэтому при разных условиях испытания даже при одинаковых  $\alpha_{руд}$  результаты испытания окажутся несопоставимы друг с другом и с базовыми значениями.)

В качестве параметра, определяющего режим работы ГТД, чаще всего используется приведенная частота вращения ротора компрессора низкого давления —  $n_{нд\text{ пр}}$  и степень повышения давления в компрессоре —  $\lambda_k^*$ . Использование этих параметров в ка-

честве режимных объясняется тем, что они в основном определяют величину тяги двигателя.

Приведение в соответствие режимов данного испытания и базового осуществляется следующим образом: приведенные к САУ результаты испытания сравнивают со значениями параметров, определенными по базовой дроссельной характеристике двигателя для режима работы идентичного полученному при испытании (рис. 1).

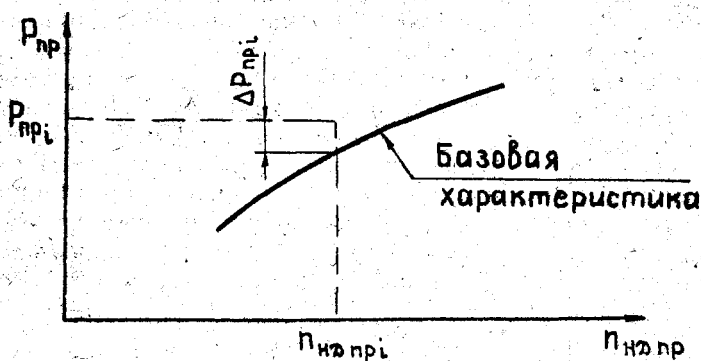


Рис. 1. Схема определения отклонений параметров от базовых значений

При наземных испытаниях параметры регистрируют обычно на нескольких режимах с последующим осреднением величины  $\Delta P$ , что повышает точность результатов:

$$\Delta P_{пр} = 1/n \sum_{i=1}^n \Delta P_{пр_i}$$

где  $n$  — число режимов.

Очевидно, что такой способ определения отклонений параметров требует построения дроссельной характеристики по формулярным данным двигателя.

Б [Нормы на допускаемые отклонения параметров  $\delta P_i$  определяются вероятностно-статистическим путем с учетом взаимосвязей между изменениями состояния двигателя и его параметрами, а также точности измерений.]

Существует три значения допуска на отклонения параметров —  $D_1, D_2, D_3$  ( $D_1 < D_2 < D_3$ ). Превышение величиной  $\delta P_i$  допуска  $D_1$  свидетельствует о случайном отклонении параметра  $P_i$ , превышение допуска  $D_2$  — о зарождении в двигателе неисправности, при превышении допуска  $D_3$  двигатель признается неисправным.

При превышении величиной  $\delta P_i$  любого допуска  $D_1, D_2$  или  $D_3$  необходимо провести диагностирование двигателя с целью определения причины отклонения параметра  $P_i$ .



### 2.3. ЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГТД

Математическими моделями ГТД называются системы уравнений, описывающих рабочий процесс двигателя. Они отражают взаимосвязи первичных и зависимых от них вторичных переменных. Использование математических моделей при диагностировании обусловлено тем, что первичные переменные, как отмечалось выше, являются параметрами состояния, а вторичные — признаками состояния изделия. Известные количественные соотношения между ними позволяют разрабатывать алгоритмы поиска неисправного узла.

Для удобства использования математические модели линеаризуются и представляются в виде таблиц (матриц) коэффициентов взаимного влияния параметров. Пример матрицы представлен в табл. П1.

Каждая строка матрицы представляет совокупность коэффициентов, отражающих зависимость одного из вторичных параметров от основных первичных величин, причем эти зависимости выражены через относительные изменения параметров  $(\delta P)$ . В качестве вторичных параметров в матрицу табл. П1 включены: расход воздуха через компрессор низкого давления, вентилятор второго контура и суммарный ( $G_{\text{кнд}}, G_{\text{вп}}, G_2$ ); степень повышения давления в компрессорах ( $\pi^*_{\text{кнд}}, \pi^*_{\text{квд}}, \pi^*_{\text{вп}}$ ); степень понижения давления в турбинах низкого и высокого давления ( $\pi_{\text{тнд}}, \pi_{\text{вд}}$ ); частота вращения ротора каскада высокого давления ( $n_{\text{вд}}$ ); температура за турбиной низкого давления ( $T^*_{\text{тнд}}$ ); расход топлива ( $G_f$ ). В качестве первичных использованы величины — параметры, характеризующие положение напорных линий компрессоров ( $G'_{\text{вп}}, G'_{\text{кнд}}, G'_{\text{квд}}$ ) и расходной характеристики турбины низкого давления ( $G'_{\text{тнд}}$ ), КПД всех компрессоров и турбин ( $\eta_{\text{вп}}, \eta_{\text{кнд}}, \eta_{\text{квд}}, \eta_{\text{вд}}, \eta_{\text{тнд}}$ ), а также площадь проходного сечения соплового аппарата ТВД ( $F_{\text{са}}$ ).

Физическую сущность взаимного влияния параметров можно проиллюстрировать на примере осевого компрессора.

Теоретический анализ и экспериментальные исследования показывают, что в случае появления дефектов лопаток компрессора (загрязнение, износ, обрывы и т. д.), приводящих к изменению их геометрических размеров, напорные линии 1—1 на характеристике компрессора смещаются вдоль линии рабочих режимов 2—2 (рис. 2) на величину  $\Delta G'_{\text{в пр}}$  (линия 1'—1') так, что точка А перемещается в положение А'. Вместе с напорными линиями в направлении уменьшения  $G_{\text{в пр}}$  смещаются характеристики КПД (линия 3—3). Одновременно последние смещаются в сторону уменьшения КПД на величину  $\Delta \eta_k$  (линия 3'—3'), что обусловлено ухудшением состояния компрессора. Вследствие уменьшения КПД про-

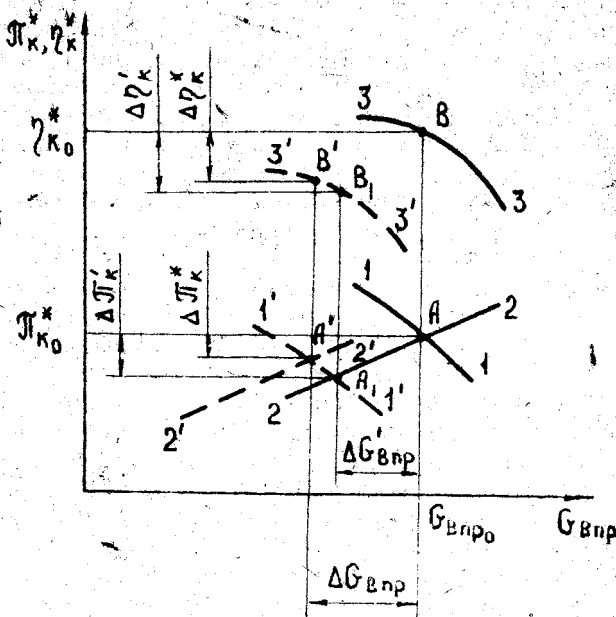


Рис. 2. Смещение характеристик и рабочих точек компрессора при изменении его технического состояния

процесса сжатия линия рабочих режимов 2—2 смещается вверх (т. е. в сторону большей температуры газа перед турбиной) — линия 2'—2'.

Одновременное смещение трех характеристик — напорной линии, характеристики КПД и рабочей линии приводит к перемещению рабочей точки в положение А' (на зависимости  $\eta_k = f(G_b)$  — точка В'). Итоговые изменения параметров рабочего процесса компрессора —  $\Delta G_{впр}$ ,  $\Delta \pi_k^*$  и  $\Delta \eta_k$  образуются как суммы величин смещения соответствующих характеристик и перемещения по ним рабочей точки. Следует специально подчеркнуть, что величины смещения характеристик ( $\Delta G_b$ ,  $\Delta \eta_k$ ) и итоговые изменения параметров ( $\Delta G_{впр}$ ,  $\Delta \pi_k^*$ ) — величины принципиально разные. Первые являются независимыми первичными переменными, а вторые — их функциями. Они могут существенно отличаться друг от друга по абсолютной величине (в зависимости от крутизны характеристик).

Количественные соотношения между первичными переменными  $\Delta \eta_k$  и  $\Delta G_b$  и всеми вторичными параметрами (коэффициента влияния) определяются подстановкой этих переменных в полную

систему уравнений рабочего процесса двигателя и решением этой системы. Аналогично находятся коэффициенты влияния на параметры характеристик турбин и других узлов ГТД. В итоге образуется представленная выше матрица коэффициентов взаимного влияния параметров (табл. III).

8. Величина коэффициента влияния показывает на сколько процентов изменится вторичный параметр при изменении первичного на 1%. Например, температура за ТНД изменится на 1,4% при смещении на 1% напорной линии вентилятора, на -0,3% при изменении на 1% КПД вентилятора и т. д. Знак «—» у коэффициента означает, что направления изменения первичных и вторичных параметров противоположны. Так в приведенном примере увеличение КПД вентилятора приведет к снижению температуры  $T^*_{\text{ТНД}}$  и наоборот.

Матрица составлена для конкретного режима работы двигателя ( $n_{\text{КНД пр}} = \text{const}$ ), поэтому частота вращения  $n_{\text{НД}}$  в числе переменных отсутствует.

Вследствие независимости первичных параметров их совместное влияние на вторичные суммируется:

$$\delta P_i = \sum_{j=1}^k a_{ji} \delta \Pi_j, \quad (6)$$

где  $P_i$  —  $i$ -й вторичный параметр;  
 $\Pi_j$  — первичный параметр ( $j=1, 2, \dots, k$ );  
 $a_{ji}$  — коэффициент влияния  $\Pi_j$  на  $P_i$ .

#### 24. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИСПРАВНЫХ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЯ

4. Самым простым методом определения узла двигателя «виновного» в изменении его параметров, является метод знаков. Он заключается в том, что неисправный узел определяют по соотношению направлений изменения параметров — увеличение («+»), уменьшение («—»), используя для этой цели матрицу коэффициентов взаимного влияния параметров. Например, установлено, что на двигателе НК-8-2У произошло увеличение параметров  $T^*_{\text{ТНД}}$  и  $G_T$  при одновременном уменьшении  $n_{\text{ВД}}$ . Из матрицы коэффициентов (табл. III) видно, что такое соотношение отклонений параметров возможно при уменьшении КПД компрессора высокого давления (КВД) или КПД турбины высокого давления (ТВД). Действительно, при уменьшении КПД КВД на 1% ( $\delta \eta_{\text{КВД}} = -1\%$ ) отклонения измеряемых параметров будут равны:  $\delta n_{\text{ВД}} = -0,4\%$ ,  $\delta T^*_{\text{ТНД}} = 0,6\%$ ,  $\delta G_T = 0,4\%$ . При условии  $\delta \eta_{\text{ТВД}} = -1\%$  будем иметь соответственно  $\delta n_{\text{ВД}} = -0,6\%$ ,  $\delta T^*_{\text{ТНД}} = 0,8\%$ ,  $\delta G_T = 0,5\%$ . Не

исправности всех остальных узлов приводят к изменениям параметров в одном направлении.

Приведенный пример показывает, что метод знаков не всегда дает однозначный результат, так как признаки неисправности некоторых узлов внешне похожи. Кроме того, метод не позволяет получить количественную оценку величины повреждения. Поэтому этот метод применяется для оперативной оценки или же предварительной. Следующим этапом анализа параметров является уточнение места неисправности одним из вычислительных методов.)

5. Наиболее распространенный на практике метод количественной оценки отклонения первичных параметров и поиска места неисправности — метод наименьших квадратов. Согласно этому методу неисправным признается узел, которому соответствует минимальное значение величины, называемой «невязка».)

9. Невязка для каждого узла представляет собой сумму квадратов разностей между отклонением измеренных параметров и их отклонением, рассчитанным по математической модели в предположении о неисправности данного узла. В случае абсолютно точных измерений и полностью адекватной модели отклонения параметров должны совпадать, при этом невязка будет равна нулю. Наличие погрешностей приводит к несовпадению указанных отклонений, но для действительно неисправного узла это несовпадение будет минимальным.

Невязка определяется следующим выражением:

$$N_j = (\delta n_{вд} - \delta n_{вд}^m)^2 + (\delta T_{гнд}^* - \delta T_{гнд}^{*m})^2 + (\delta G_T - \delta G_T^m)^2, \quad (7)$$

где  $N_j$  — невязка для  $j$ -го узла;

$\delta n_{вд}$ ,  $\delta T_{гнд}^*$ ,  $\delta G_T$  — значения отклонений параметров от их базы, полученные по результатам испытаний;

$\delta n_{вд}^m$ ,  $\delta T_{гнд}^{*m}$ ,  $\delta G_T^m$  — значения отклонений тех же параметров, рассчитанные по математической модели в предположении неисправности  $j$ -го узла.

Значения величин  $\delta P_{ij}^m$ , входящих в (7), в соответствии с уравнением (6),

$$\delta P_{ij}^m = a_{i\eta_j} \delta \eta_j + a_{iG_j} \delta G_j, \quad (8)$$

где  $a_{i\eta_j}$ ,  $a_{iG_j}$  — коэффициенты влияния КПД и производительности  $j$ -го узла на  $i$ -й параметр;

$\delta \eta_j$ ,  $\delta G_j$  — отклонения параметров состояния  $j$ -го узла.

Подставив в уравнение (7) значения  $\delta P_{ij}^m$  в соответствии с уравнением (8) и решив уравнение (7) при условии  $N_j \rightarrow \min$  (обычное исследование функции на экстремум), найдем значение невязки  $N_j$ , а также величины  $\delta \eta_j$ ,  $\delta G_j$  для  $j$ -го узла. Проведем эту проце-

дуру для всех узлов, по минимальному значению  $N_j$  определяем неисправный узел и его параметры состояния.

Данный метод можно проиллюстрировать графически на простейшем примере. Предположим, что неисправность  $j$ -го узла вызвала изменение его КПД ( $\delta \eta_j$ ). При этом отклонения двух измеряемых параметров по математической модели будут составлять

$$\delta T_{\text{тнд}j}^* = a_{T_{\text{тнд}}j} \delta \eta_j \quad \text{и} \quad \delta n_{\text{вд}}^* = a_{n_{\text{вд}}j} \delta \eta_j, \quad (9)$$

где  $a_{T_{\text{тнд}}j}$  и  $a_{n_{\text{вд}}j}$  — коэффициенты влияния  $\eta_j$  на  $T_{\text{тнд}}^*$  и  $n_{\text{вд}}^*$ .

Данное событие в системе координат  $\delta T_{\text{тнд}}^* = f(\delta n_{\text{вд}}^*)$  (рис. 3) можно изобразить некоторой точкой, координаты которой определяются соотношениями (9). Различные значения  $\delta \eta_j$  дадут множество точек, которые определяют прямую в данной системе координат. Естественно, каждому узлу двигателя соответствует своя линия, связывающая параметры  $T_{\text{тнд}}^*$  и  $n_{\text{вд}}^*$  при неисправности этого узла.

При идеально точных измерениях найденные при диагностировании значения  $\delta T_{\text{тнд}}^*$  и  $\delta n_{\text{вд}}^*$  должны совпадать с теоретическими, найденными по математической модели  $\delta T_{\text{тнд}j}^{*м}$  и  $\delta n_{\text{вд}j}^{*м}$ . В системе координат (см. рис. 3) «экспериментальная» точка должна лежать на одной из теоретических прямых, что и указывает на неисправный узел.

Однако в реальных условиях в результате погрешностей измерения эта точка не будет лежать ни на одной из прямых (т. А на рис. 3), и о неисправном узле судят по расстоянию (невязке) от экспериментальной точки до прямых. Для неисправного узла это расстояние будет минимальным.

Уравнения (7), (8) дают общее решение этой задачи для случая трех измеряемых параметров и двух параметров состояния узла. Величины  $\delta \eta_j$  и  $\delta G_j$  вычисляются следующим образом:

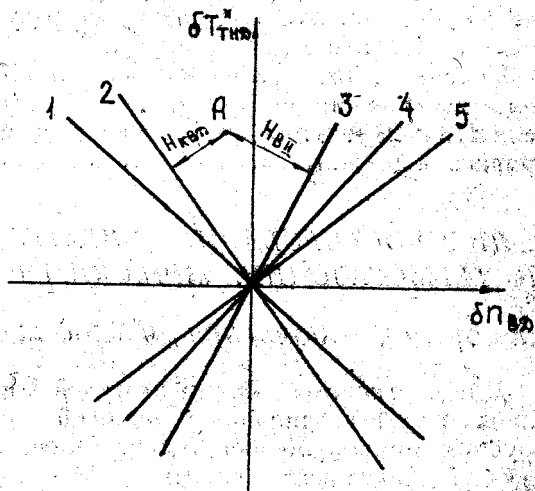


Рис. 3. Схема определения неисправного узла по «невязке»

$$\delta \eta_j = \frac{\sum_{i=1}^3 a_{iG_j}^2 \sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j} \delta P_i - \sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j} a_{iG_j} \sum_{i=1}^3 a_{iG_j} \delta P_i}{\sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j}^2 \sum_{i=1}^3 a_{iG_j}^2 - (\sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j} a_{iG_j})^2},$$

$$\delta G_j = \frac{\sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j}^2 \sum_{i=1}^3 a_{iG_j} \delta P_i - \sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j} a_{iG_j} \sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j} \delta P_i}{\sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j}^2 \sum_{i=1}^3 a_{iG_j}^2 - (\sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j} a_{iG_j})^2} \quad (10)$$

где  $\delta P_i$  — найденное при обработке результатов измерений отклонение  $i$ -го параметра.

Уравнение (8), а следовательно и (10), справедливы для случая измерения параметров  $n_{ВД}$ ,  $T_{ТНД}^*$  и  $G_T$  (в том числе и для двигателя НК-8-2У). При другом числе и номенклатуре параметров уравнения должны быть соответственно скорректированы.

### 3. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ НК-8-2У ПО ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

#### 3.1. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Для диагностирования двигателей НК-8-2У используются показания штатных приборов силовой установки, регистрируемые вручную при опробовании двигателей. Работу выполнять в следующей последовательности:

1. Подготовить самолет Ту-154 к запуску двигателей согласно инструкции «Запуск и проверка работоспособности двигателя НК-8-2У на самолете Ту-154» [4].

2. Подготовить протокол испытания (табл. П2).

3. Запустить и прогреть двигатели в соответствии с инструкцией [4].

4. Измерить и записать параметры на заданных режимах работы.

5. Выключить двигатели и выполнить заключительные работы на самолете.

6. Произвести обработку результатов измерений и определить отклонение параметров двигателя от их базовых значений. Рекомендации по регистрации и обработке параметров приведены ниже.

7. Пользуясь полученными отклонениями параметров и матрицей коэффициентов взаимного влияния (табл. П1), дать оценку технического состояния узлов прочной части двигателя.

8. Написать отчет о работе. В отчет включить результаты испытания, результаты обработки и анализ параметров.

### 3.2. РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

Опробование двигателя производить в соответствии с графиком (рис. 4). На режимах номинальном и взлетном измерить парамет-

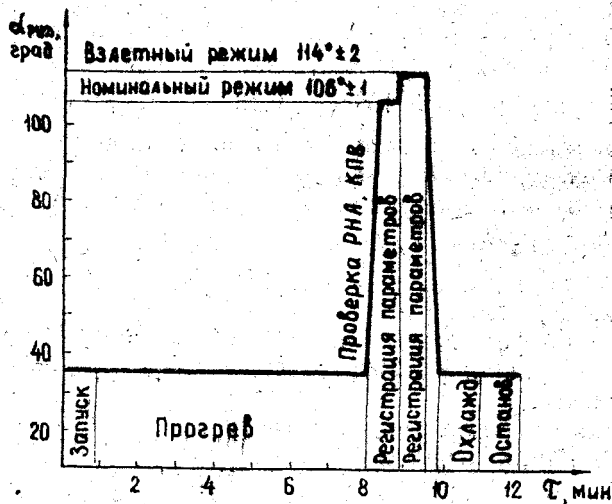


Рис. 4. График опробования двигателя

ры:  $n_{вд}$ ,  $n_{нд}$  — частоты вращения роторов компрессоров высокого и низкого давления;  $t_{гнд}$  — температуру газа за турбиной низкого давления;  $G_t$  — расход топлива;  $P_t$  — давление топлива перед форсунками. Результаты измерений, а также атмосферные условия испытаний  $t_n$ ,  $P_n$  занести в протокол испытания (табл. П2).

Измерение параметров двигателя производить при следующих условиях:

а) соседние с проверяемым двигатели должны быть выключены;

б) перед проведением опробования двигатель должен быть охлажден не менее 2-х часов после последнего запуска и останова;

в) скорость ветра со стороны сопла не должна превышать 10 м/с;

г) отборы воздуха от проверяемого двигателя должны быть выключены;

д) выдержка на режиме перед измерением параметров должна быть не менее 30 сек;

е) не превышать предельных значений параметров:

$n_{ВД \max} = 98,5\%$ ,  $n_{НД \max} = 101\%$ ,  $t_{ТНД}^* = 665^\circ\text{C}$ ,  
 $P_T = 60 \text{ кгс/см}^2$ ,  $V_{по} = 40 \text{ мм/с}$ ,  $V_{зо} = 40 \text{ мм/с}$ ,  
где  $V_{по}$ ,  $V_{зо}$  — уровень вибрации по передней и задней опорам.

### 3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Привести значения измеренных параметров  $n_{ВД}$ ,  $n_{НД}$ ,  $t_{ТНД}^*$ ,  $G_T$  к САУ по уравнениям (2), (3), (5). Поправочный коэффициент  $B_G$  в уравнении (5) определяется по эмпирическому выражению

$$B_G = 0,9947 + 0,3525 \cdot 10^{-3} t_H + 0,13 \cdot 10^{-5} t_H^2 + 0,1 \cdot 10^{-7} t_H^3.$$

2. Вычислить базовые значения параметров по уравнению дроссельной характеристики исправного двигателя, которая описывается аналитическим полиномом второй степени:

$$P_{0i} = a_i n_{НД \text{ пр}}^2 + b_i n_{НД \text{ пр}} + c_i,$$

где  $P_{0i}$  — базовое значение  $i$ -го параметра;

$a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  — коэффициенты полинома.

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  двигателей НК-8-2 самолета Ту-154, бортовой номер 85003 (учебный аэродром КуАИ) приведены в табл. ПЗ.

3. Определить отклонения параметров от их базовых значений на режимах номинальном и взлетном:

$$\Delta P_{i \text{ взл}} = P_{i \text{ пр взл}} - P_{0i \text{ взл}};$$

$$\Delta P_{i \text{ ном}} = P_{i \text{ пр ном}} - P_{0i \text{ ном}},$$

где  $P_{i \text{ пр}}$ ,  $P_{0i}$  — приведенные к САУ и базовые значения  $i$ -го параметра соответственно.

4. Сравнить между собой отклонения каждого параметра  $\Delta P_i$  на взлетном и номинальном режимах с целью проверки отсутствия грубых ошибок измерения; должны выполняться следующие требования:

$$|\Delta n_{ВД \text{ взл}} - \Delta n_{ВД \text{ ном}}| < 0,5\%;$$

$$|\Delta t_{ТНД \text{ взл}}^* - \Delta t_{ТНД \text{ ном}}^*| < 10^\circ\text{C};$$

$$|\Delta G_T \text{ взл} - \Delta G_T \text{ ном}| < 100 \text{ кг/ч}.$$

Если указанные условия не выполняются, повторить измерения. При этом, если условия не выполняются все одновременно, при повторном измерении обратить внимание на измерение  $n_{НД}$ .

5. Определить среднее значение отклонений параметров на номинальном и взлетном режимах

$$\Delta P_i = \frac{\Delta P_{i \text{ взл}} + \Delta P_{i \text{ ном}}}{2}.$$



6. Вычислить относительные отклонения параметров на взлетном режиме

$$\delta P_i = \frac{\Delta P_i}{P_{0i \text{ взл}}} 100\%$$

7. Сравнить относительные отклонения параметров с допустимыми пределами. Изменения параметров двигателя НК-8-2 в эксплуатации должны находиться в пределах:

$$-0,7\% \leq \delta n_{\text{ВД}} < 0,5\%;$$

$$-0,8\% \leq \delta T^*_{\text{ГНД}} < 1,6\%;$$

$$-2,4\% \leq \delta G_T < 3,2\%$$

Если отклонения параметров превышают предельные значения, произвести их анализ для выявления неисправного узла.

#### 3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕИСПРАВНОГО УЗЛА ДВИГАТЕЛЯ

Выявление неисправного узла двигателя осуществляется в два этапа:

1. Произвести предварительный анализ параметров по методу знаков так, как описано в п. 1.4, используя для этого матрицу коэффициентов (табл. П1).

2. Сделать расчет по методу наименьших квадратов для узлов, предварительно определенных как неисправные, для чего:

а) вычислить отклонения первичных параметров подозреваемых на неисправность узлов по уравнению (10);

б) определить отклонения диагностических параметров для каждого узла, соответствующих математической модели, подставив полученные отклонения первичных параметров в уравнение (8);

в) вычислить для каждого узла невязки по уравнению (7);

г) сравнить невязки между собой и выявить неисправный узел, которому соответствует минимальное значение невязки.

д) наметить мероприятия по выявлению конкретного дефекта, приведшего к возникновению неисправности узла, и его устранению.

Примечание. Вычисление отклонений первичных параметров [уравнение (10)] целесообразно выполнять в последовательности, отраженной в табл. П4.

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Краткая характеристика испытуемого двигателя и условий проведения испытаний.

2. Результаты измерения параметров (протокол испытания).
3. Приведение параметров к САУ (основные формулы, таблица результатов).
4. Определение отклонений параметров от базового значения.
5. Определение вида технического состояния двигателя.
6. Определение причины неисправности двигателя.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сущность метода диагностирования по термогазодинамическим параметрам.
2. Какие дефекты выявляются параметрическим методом диагностирования?
3. Зачем производится приведение результатов испытания к заданному режиму работы двигателя?
4. Сущность метода знаков.
5. Сущность метода диагностирования с использованием метода наименьших квадратов.
6. Какие нормы существуют на допускаемые отклонения параметров?
7. Какие параметры состояния используются при составлении математической модели?
8. Сущность коэффициентов взаимного влияния.
9. Что такое «невязка» и как она вычисляется?
10. Почему при уменьшении КПД компрессора высокого давления увеличивается температура за турбиной и уменьшается частота вращения ротора высокого давления?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сиратин Н. Н., Коровкин Ю. М. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1979. 272 с. § 4.3, с. 189—194.
2. Кеба И. В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Транспорт, 1980. 248 с. § 5.6, С. 173—179.
3. Солохин Э. Л. Испытания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1975. 356 с.
4. Запуск и проверка работоспособности двигателя НК-8-2 на самолете Ту-154: Метод. указания / Сост. Н. Н. Игонин, Е. А. Милов, С. Д. Стецгал; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1984. 32 с.

Приложение

Таблица III

Коэффициенты взаимного влияния параметров двигателя НК-8-2У при  $n_{\text{ндер}} = 5165 \text{ об/мин}$

	$\delta G_{\text{ВП}}$	$\delta \eta_{\text{ВП}}$	$\delta G'_{\text{кнд}}$	$\delta \eta'_{\text{кнд}}$	$\delta G'_{\text{квд}}$	$\delta \eta'_{\text{квд}}$	$\delta F_{\text{СА}}$	$\delta \eta'_{\text{ТВД}}$	$\delta G'_{\text{тнд}}$	$\delta \eta'_{\text{тнд}}$
$\delta G_{\text{кнд}}$	0,5	-0,1	0,8	0,0	0,0	0,4	-0,2	0,6	0,8	-0,2
$\delta G_{\text{ВП}}$	1,1	0,1	-0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,1
$\delta G_{\text{квд}}$	0,8	0,0	0,3	0,0	0,0	0,2	-0,1	0,2	0,3	0,0
$\delta \eta_{\text{кнд}}$	-0,4	0,1	1,2	0,0	0,0	-0,4	0,2	-0,6	-1,3	0,2
$\delta \eta_{\text{квд}}$	1,6	-0,4	-0,3	-0,3	0,0	0,6	-1,5	0,9	2,2	-0,7
$\delta \eta_{\text{ВП}}$	1,1	-0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	-0,2
$\delta \eta_{\text{ТВД}}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	-1,1	0,1	1,3	0,0
$\delta \eta_{\text{тнд}}$	-0,2	-0,1	0,3	-0,1	0,0	0,1	-0,1	0,2	-0,9	-0,1
$\delta \eta_{\text{ВД}}$	0,6	-0,1	0,1	-0,3	-1,0	0,4	-0,4	0,6	1,1	-0,3
$\delta T^*_{\text{тнд}}$	1,4	-0,3	0,1	-0,5	0,0	-0,6	0,3	-0,8	0,2	-0,8
$\delta G_r$	2,6	-0,6	0,7	-1,0	0,0	-0,4	0,2	-0,5	1,0	-1,2

### Таблица П2

Протокол испытания двигателя НК-8-2 № \_\_\_\_\_  
самолета Ту-154 от \_\_\_\_\_ при  $P_H =$  \_\_\_\_\_  $t_H$  \_\_\_\_\_

Режим	$\alpha^\circ \text{РУД}$	$n_{ВД}, \%$	$n_{НД}, \%$	$t^*_{ТНД}, ^\circ\text{C}$	$P_T, \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	$P_M, \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	$G_T, \text{кг/ч}$
Малый газ	25—40						
Номинальный	104						
Взлетный	113						

1. Температура масла,  $^\circ\text{C}$  \_\_\_\_\_
2. Частота вращения  $n_{НД}$  перестройки РНА, % \_\_\_\_\_
- $\Delta n_{НД}, \%$  \_\_\_\_\_,  $\Delta t_{ТНД}, ^\circ\text{C}$  \_\_\_\_\_
3. Частота вращения  $n_{ВД}$  закр. (откр.) КПП, % \_\_\_\_\_,  $\Delta n_{ВД}, \%$  \_\_\_\_\_
4. Максимальная  $t_{ТНД}$  в процессе запуска,  $^\circ\text{C}$  \_\_\_\_\_
5. Время запуска, с \_\_\_\_\_
6. Время выбег, с \_\_\_\_\_

### Таблица П3

Коэффициенты аппроксимирующих уравнений  
дроссельных характеристик двигателей

Параметр	Коэффициенты				
	а	в	с		
			1 дв.	2 дв.	3 дв.
$n_{ВД}$	—	0,56	42,5	42,4	42,9
$T^*_{ТНД}$	0,1513	—17,5	1190	1200	1210
$G_T$	1,876	—155,5	3326	3408	3502

### Таблица П4

Расчет отклонений первичных параметров

Параметр	$\delta P_i$	$a_{iG_i}$	$a^2_{iG_i}$	$a_{i\eta_j}$	$a_{i\eta_j} \delta P_i$	$a_{iG_j} a_{iG_i}$	$a_{iG_j} \delta P_i$	$a^2_{i\eta_j}$
$n_{ВД}$								
$T^*_{ТНД}$								
$G_T$								
$\Sigma$		$\sum_{i=1}^3 a^2_{iG_i}$		$\sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j} \delta P_i$	$\sum_{i=1}^3 a_{i\eta_j} a_{iG_j}$	$\sum_{i=1}^3 a_{iG_j} \delta P_i$	$\sum_{i=1}^3 a^2_{i\eta_j}$	

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ . . . . .	1
2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДЕ ДИАГНОСТИРОВА- НИЯ ГТД ПО ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРА- МЕТРАМ . . . . .	1
2.1. Общая характеристика метода . . . . .	1
2.2. Методика обработки параметров . . . . .	4
2.3. Линейная математическая модель ГТД . . . . .	7
2.4. Методика определения неисправных узлов двигателя . . . . .	9
3. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ НК-8-2У ПО ТЕР- МОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ . . . . .	12
3.1. Порядок выполнения диагностирования . . . . .	12
3.2. Регистрация параметров . . . . .	13
3.3. Обработка результатов измерений . . . . .	14
3.4. Определение неисправного узла двигателя . . . . .	15
4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА . . . . .	15
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ . . . . .	16
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК . . . . .	16
ПРИЛОЖЕНИЕ . . . . .	17