

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЁВА**

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

НК- 16СТ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Методические указания к практическим занятиям

САМАРА 2003

Составитель: Н.И.Епишев

УДК 629.7.036.3.

Контроль параметров газотурбинного двигателя НК16-СТ в процессе эксплуатации : Методические указания / Самарский гос. аэрокосмический ун-т. сост. Н.И.Епишев. Самара 2003. 18 с.

Приведены эксплуатационные характеристики двигателя НК16-СТ, изложены методики контроля параметров двигателя сравнением с формулярными данными, контроля настроечной характеристики и скольжения роторов. Приведены необходимые для расчета справочные материалы.

Методические указания предназначены для студентов пятого курса специализации 130311 при выполнении ими практических заданий по курсу «Техническая эксплуатация энергетических установок с авиационным газотурбинным приводом».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева.

Рецензент: В.А. Антипов

СОДЕРЖАНИЕ

1.Цель и порядок выполнения работы	5
2.Изменение состояния газотурбинных двигателей при длительной эксплуатации	5
3.Эксплуатационные характеристики двигателя НК-16СТ.....	7
4.Контроль параметров работы двигателя НК-16СТ.....	9
4.1.Экспресс-контроль параметров.....	9
4.2.Контроль параметров работы двигателя сравнением с формулярными данными	10
4.3.Контроль настроечной характеристики	11
4.4.Контроль состояния двигателя по параметру «скольжение роторов»	12
Библиографический список	12
Приложение	13

1. Цель и порядок выполнения работы.

Цель работы – закрепление знаний студентов по курсу «Техническая эксплуатация энергетических установок с авиационным газотурбинным приводом», в частности, по разделу «Эксплуатация газотурбинных приводов на режимах нагрузки» и приобретение практических навыков анализа параметров работы двигателей.

Порядок выполнения работы:

- изучить настоящие указания;
- по одному из вариантов заданий, приведенных в Приложении (по указанию преподавателя) произвести экспресс-контроль параметров двигателя, контроль параметров работы двигателя сравнением с формулярными данными, контроль скольжения роторов;
- проанализировать результаты контроля параметров;
- оформить отчёт;
- отчитаться по выполненной работе.

2. Изменение состояния газотурбинных двигателей при длительной эксплуатации.

Двигатели наземных энергетических установок эксплуатируются в местностях с большим разнообразием климатических и погодных условий – влажность и запыленности воздуха, давления и температуры, интенсивности осадков в виде дождя или снега. Для этих двигателей характерна длительная непрерывная работа, большая общая наработка, длительная работа на режимах, близких к максимальному.

Специфические условия работы ГТД энергетических установок приводят к возникновению ряда характерных для этих двигателей неисправностей.

Загрязнение компрессора образуется при длительной работе двигателя в условиях наличия в воздухе мелкой пыли с небольшим процентным содержанием кварца, органических частиц – мелких насекомых, пыльцы и мелких семян растений и т.п. Загрязнению подвержены, в основном, направляющие лопатки первых и средних ступеней компрессора. Образование отложений ускоряется при наличии в потоке паров и капель масла, попадающего в поток воздуха из лабиринтных уплотнений передней опоры ротора и из-за негерметичности наружных масло магистралей силовой установки. Явление загрязнения компрессора имеет место и на двигателях летательных аппаратов, но в гораздо меньшей степени, чем двигателях наземных установок.

Газоабразивная эрозия компрессоров двигателей происходит при попадании в проточную часть двигателей твёрдых частиц пыли крупных размеров (более 5мкм). Характерна при эксплуатации ГТД в местностях с песчаным грунтом. Наиболее подвержены газоабразивному износу двигатели вертолетов /1/ и наземных установок. В первом случае интенсивность износа вызывается большой концентрацией пыли под несущим винтом при взлёте с грунтовых аэродромов, во втором – длительной работой в условиях запыленного воздуха, хотя и с меньшей концентрацией пыли. Износу подвержены рабочие лопатки компрессоров, лопатки направляющих аппаратов, рабочие кольца ступеней и лабиринтных уплотнений. В отдельных случаях абразивный износ может быть весьма существенным.

Загрязнение и абразивный износ компрессоров приводит к ухудшению их характеристик – уменьшению расхода воздуха, степени повышения давления, к.п.д. процесса сжатия. В итоге снижается мощность и к.п.д. двигателя.

Кроме отмеченных, на двигателях энергетических установок появляются «традиционные» для ГТД неисправности, такие как повреждения компрессоров посторонними предметами, прогары, оплавления и др. неисправности элементов горячей части двигателей, нарушение регулировки систем автоматического регулирования (САР).

Повреждения компрессоров чаще всего происходит из-за попадания на вход в двигатель кусков льда при несвоевременном или неправильном удалении обледенения со входных устройств силовой установки.

Неисправности элементов горячей части двигателя – прогары сопловых аппаратов турбин, прогары и оплавления элементов жаровых труб камер сгорания и т.п. чаще всего происходят из-за деформации поля температур вследствие изменения состояния топливных форсунок при длительной эксплуатации.

Все отмеченные неисправности приводят к изменению параметров работы двигателей. Величина изменений параметров зависит от характера и степени развития неисправности. Оценка состояния двигателя в этих случаях осуществляется посредством контроля измеряемых в эксплуатации параметров. Ряд неисправностей, в том числе, загрязнение компрессора, нарушение регулировки САР могут быть устранены в эксплуатационных условиях. Необходимость проведения промывок двигателя, регулировок, а также качество этих работ также оценивается с помощью измеряемых термогазодинамических параметров.

В разделах 3,4 настоящих указаний изложены методы контроля параметров двигателя НК-16СТ и приведены характеристики этого двигателя, используемые при анализе параметров.

3. Эксплуатационные характеристики двигателя НК-16СТ

Эксплуатационными характеристиками газотурбинного двигателя называются зависимости мощности, удельного и часового расхода топлива, а также других параметров работы двигателя от условий эксплуатации. К условиям эксплуатации относятся параметры воздуха на входе в двигатель (давление, температура, влажность), режим работы двигателя. Режим работы определяется расходом топлива и оценивается частотой вращения роторов компрессоров и турбин, температурой газа перед турбиной. Наибольшее применение в практике эксплуатации двигателей энергетических установок находят дроссельные и настроечные характеристики.

Дроссельные характеристики – зависимости мощности, удельного или часового расхода топлива, температуры газов перед турбиной и др. параметров от частоты вращения ротора газогенератора при заданной программе регулирования. Для двигателей с двухроторным газогенератором (в том числе – двигателя НК16-СТ) дроссельные характеристики представляют зависимости параметров от частоты вращения ротора низкого давления ($n_{нд}$).

Дроссельные характеристики строятся в приведенных координатах. Приведение параметров к стандартным атмосферным условиям (САУ) осуществляется по известным формулам газодинамического подобия [2]:

$$\begin{aligned}n_{пр} &= n_{изм} \sqrt{288 / T_{вх}^*}; \\T_{пр}^* &= T_{изм}^* 288 / T_{вх}^*; \\P_{пр} &= P_{изм} 760 / P_{вх}; \\N_{пр} &= N_{изм} 760 / (P_{вх} \sqrt{288 / T_{вх}^*}),\end{aligned}$$

где n – частота вращения ротора;

T^* – полная температура воздуха, газа, К;

P – давление в проточной части двигателя;

N – мощность;

индексом «пр» отмечены приведенные к САУ значения параметров, индексом «изм» – измеренные значения, индексом «вх» – параметры воздуха на входе в двигатель.

На рис. 1 представлена одна из дроссельных характеристик – зависимость приведенной частоты вращения ротора высокого давления

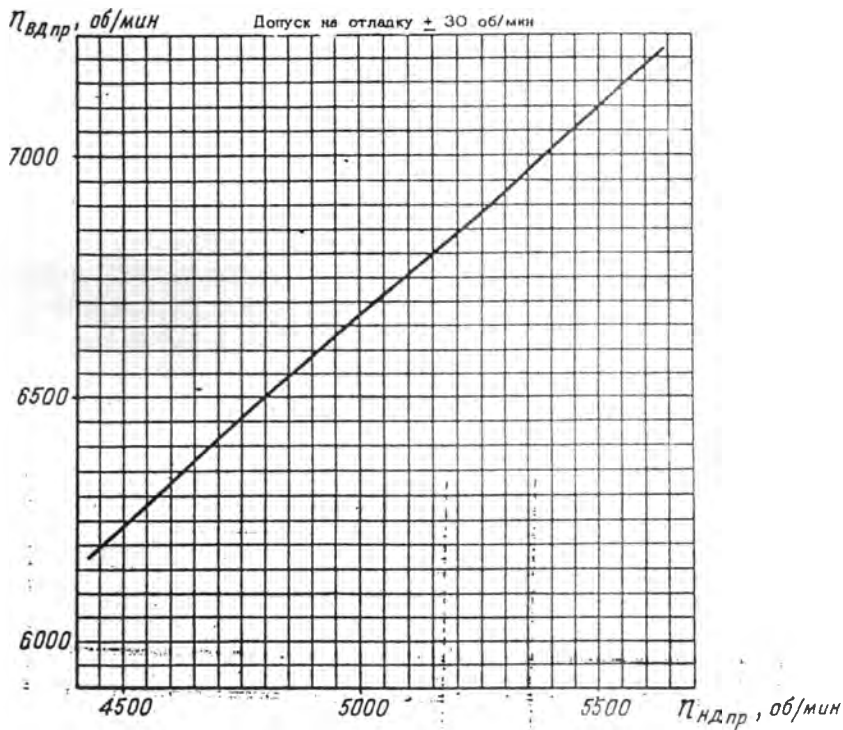


Рис. 1. Характеристика зависимости $\Pi_{ВД пр}$ от $\Pi_{НД пр}$

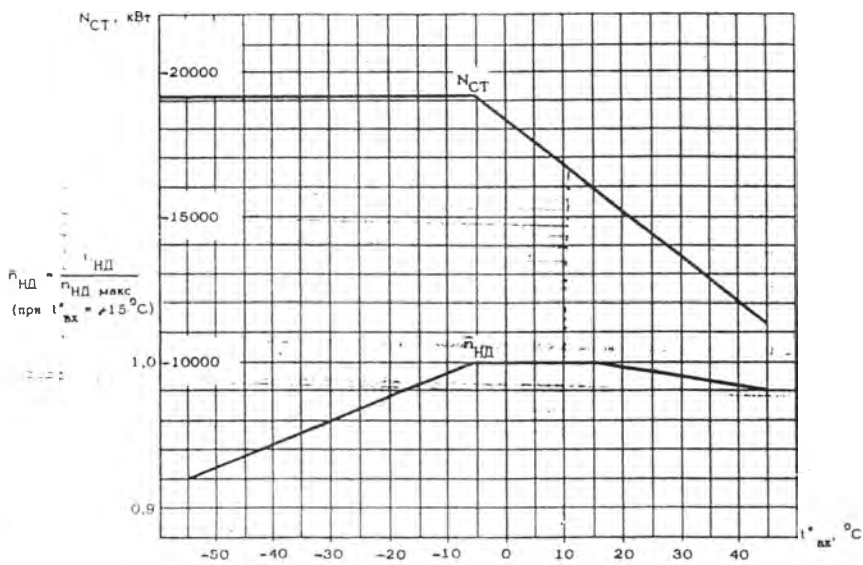


Рис. 2 Изменение мощности свободной турбины
 и относительной частоты вращения ротора НД
 на максимальном режиме в зависимости
 от температуры воздуха на входе в двигатель
 (при $\sigma_{всac} = 0,98$, $P_H = 1,033 \text{ кгс/см}^2$)

($n_{\text{вд пр}}$) от $n_{\text{нд пр}} - n_{\text{вд пр}} = f(n_{\text{нд пр}})$. Указанная характеристика линейна, так же как зависимости давления за компрессором

$P_{2 \text{ пр}} = f(n_{\text{нд пр}})$ и температуры газов перед свободной турбиной

$t_{\text{г ст пр}}^* = f(n_{\text{нд пр}})$.

Расчетным режимом работы двигателя НК16-СТ является режим максимальной мощности при САУ ($t_n = 15^\circ\text{C}$, $P_n = 760$ мм.рт.ст.). Значения основных эксплуатационных параметров на этом режиме :

$n_{\text{нд пр}} = 5270 \pm 50$ об/мин, $n_{\text{вд пр}} = 6910 \pm 70$ об/мин,

$t_{\text{г ст}}^* = 607^\circ\text{C}$,

$N_{\text{пр}} = 16$ МВт.

Зависимости параметров работы ГТД от внешних условий (P_n , t_n) определяется системой автоматического регулирования (САР), поэтому эти характеристики называются настроечными. САР осуществляет ограничение основных параметров работы двигателя таким образом, чтобы ни один из них во всём диапазоне возможных условий работы не превышал максимально допустимых значений.

Зависимость параметров работы двигателя НК16-СТ от температуры на входе в двигатель на максимальном режиме приведена на рис.2.

Диапазон возможных температур воздуха, в котором эксплуатируется двигатель от -60°C до $+50^\circ\text{C}$. Расчётные параметры, как указано выше, соответствуют стандартным условиям ($t_n = \pm 15^\circ\text{C}$,

$P_n = 760$ мм.рт.ст.). На максимальном режиме при этих условиях частота вращения $n_{\text{нд}}$ и температура газов $t_{\text{г ст}}^*$ достигают максимально значения.

В диапазоне температур $-5^\circ\text{C} \leq t_{\text{вх}}^* \leq 15^\circ\text{C}$ САР поддерживает частоту вращения $n_{\text{нд}}$ постоянной ($n_{\text{нд max}} = 5270 \pm 50$ об/мин). При снижении температуры воздуха плотность его увеличивается и, при условии $n_{\text{нд}} = \text{const}$, расход воздуха через двигатель увеличивается. Увеличиваются степень повышения давления π_k^* и расход топлива. Мощность двигателя растёт, а температура $t_{\text{г ст}}^*$ снижается. Регулирование по закону $n_{\text{нд}} = \text{const}$ при условии снижения $t_{\text{вх}}^*$ означает фактически увеличение режима работы двигателя по параметру $n_{\text{нд пр}}$.

При температуре $t_{\text{вх}}^* = -5^\circ\text{C}$ мощность достигает максимально допустимого значения и при дальнейшем понижении $t_{\text{вх}}^*$ САР поддерживает мощность постоянной ($N_e = 19$ МВт) ограничением расхода топлива. Параметры $n_{\text{нд}}$ и $t_{\text{г ст}}^*$ с уменьшением $t_{\text{вх}}^*$ снижаются, причём $t_{\text{г ст}}^*$ снижается более резко, чем на предыдущем участке характеристики.

В диапазоне температур $t_{\text{вх}}^* \geq +15^\circ\text{C}$ параметр $t_{\text{г ст}}^*$ должен оставаться на уровне не выше максимально допустимого значения. Уменьшение расхода воздуха через двигатель и π_k при увеличении $t_{\text{вх}}^*$ в этом

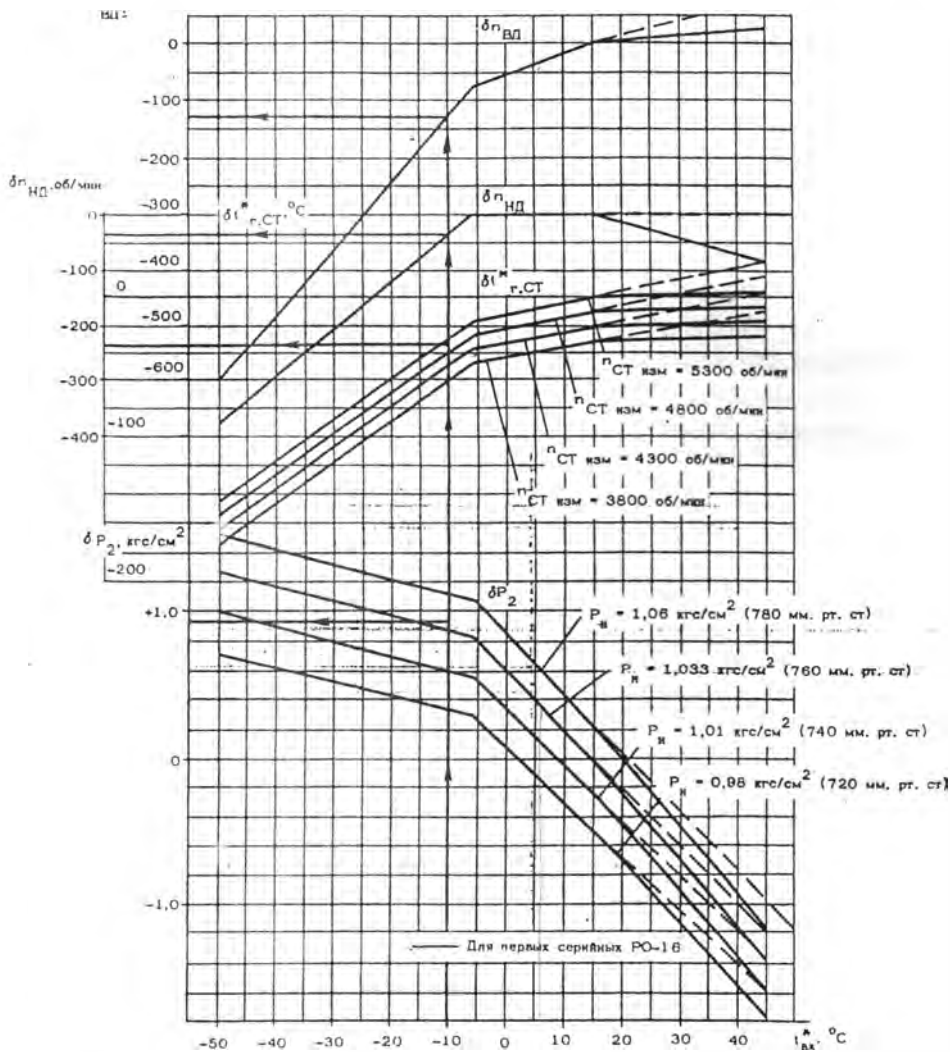


Рис. 3. Зависимость параметров на максимальном режиме от атмосферных условий

диапазоне настройки САР должно сопровождаться уменьшением расхода топлива, что приводит к снижению $n_{нд}$ и мощности двигателя.

На режимах работы двигателя ниже максимального программа регулирования аналогична описанной.

Эксплуатационные характеристики используются при контроле состояния двигателя по измеряемым параметрам. На основании зависимостей параметров двигателя от внешних атмосферных условий построены графики изменений параметров в зависимости от условий работы (рис.3). С помощью этих графиков осуществляется пересчет параметров, измеренных при различных условиях к нормальным условиям (см. п 4.2.). Правильность регулировки САР (настроечная характеристика) проверяется в эксплуатации (см. п.4.3.)

Дроссельные характеристики используются для приведения параметров, измеренных на различных режимах работы к одному режиму (п.4.2.), а также для контроля состояния двигателя по параметру «скольжение роторов» (п.4.4.)

4. Контроль параметров работы двигателя НК-16СТ

4.1.Экспресс – контроль параметров

В процессе эксплуатации двигателя через каждые 2 часа работы измеряют и регистрируют параметры:

- частоту вращения ротора низкого давления ($n_{нд}$);
- частоту вращения ротора высокого давления ($n_{вд}$);
- частоту вращения ротора свободной турбины ($n_{ст}$);
- температуру газа перед свободной турбиной ($t_{г ст}^*$);
- давление воздуха за компрессором высокого давления (P_2), а также давления (P_n) и температуру (t_n) атмосферного воздуха.

По измеренным параметрам выполняют экспресс-контроль работы двигателя, заключающейся в сравнении параметров $t_{г ст}^*$ и $n_{ст}$ с их максимально допустимыми значениями. Для этого по графику (рис.4) $t_{г ст max}^* = f(t_n)$ определяют значение $t_{г ст max}^*$, соответствующее температуре t_n в момент измерения параметров и сравнивают найденное значение $t_{г ст max}^*$ с измеренным $t_{г ст}^*$. Измеренное значение не должно превышать максимально допустимого.

Частота вращения ротора СТ не должна превышать максимально-допустимую $n_{ст max} = 5620$ об/мин. В случае, если один из параметров $t_{г ст}^*$, или $n_{ст}$ превышает максимальное значение, режим работы снижают и приводят дополнительное измерение всех параметров и, при необходимости, контроль по более сложной методике сравнением параметров с формулярными значениями.

На установившихся режимах может быть небольшое колебание оборотов ротора низкого давления. Колебание $n_{нд}$ в пределах ± 30 об/мин считается допустимым. Оно объясняется принципом работы регулятора оборотов.

4.2. Контроль параметров работы двигателя сравнением с формулярными данными

Проводится такой контроль один раз в сутки. В формулярах двигателей даны приведенные к САУ значения параметров для режима максимальной мощности — $n_{нд}$ пр.форм., $n_{вд}$ пр.форм., $t_{г ст}^*$ пр.форм., P_2 пр.форм. .

Последовательность анализа параметров:

- формулярные значения параметров пересчитываются на фактические атмосферные условия работы двигателя;
- определяется отклонение фактического режима работы двигателя от режима максимальной мощности (формулярные значения даны для последнего);
- на пересчитанные формулярные значения параметров вносятся поправка, учитывающая отклонение фактического режима работы от максимального. Получаются контрольные значения параметров ;
- с контрольными значениями параметров сравниваются измеренные ;
- с учетом допусков на отклонение измеренных параметров от контрольных делается заключение об исправности двигателя.

Пересчет формулярных значений параметров осуществляется введением поправок, найденных с помощью графиков (рис.3) изменения параметров ($\delta n_{нд}$, $\delta n_{вд}$, $\delta t_{г ст}^*$ и δP_2) в зависимости от $t_{вх}^*$, $n_{ст}$, P_n . При введении поправок получаются значения параметров на максимальном режиме при фактических атмосферных условиях работы двигателей:

$$\begin{aligned} n_{нд \max} &= n_{нд \text{ пр. форм}} + \delta n_{нд} ; \\ n_{вд \max} &= n_{вд \text{ пр. форм.}} + \delta n_{вд} ; \\ t_{г ст \max}^* &= t_{г ст \text{ пр. форм.}}^* + \delta t_{г ст}^* ; \\ P_{2 \max} &= P_2 \text{ пр. форм.} + \delta P_2 . \end{aligned}$$

Фактический режим работы двигателя, определяемый частотой $n_{нд}$ вращения ротора НД, отличается от максимального на величину:

$$\Delta n_{нд} = n_{нд \max} - n_{нд} .$$

Контрольные значения параметров определяются с учетом поправки на режим работы двигателя:

$$\begin{aligned} n_{вд к} &= n_{вд \max} - 0,92 \Delta n_{нд} ; \\ t_{г ст к}^* &= t_{г ст \max}^* - 0,24 \Delta n_{нд} ; \end{aligned}$$

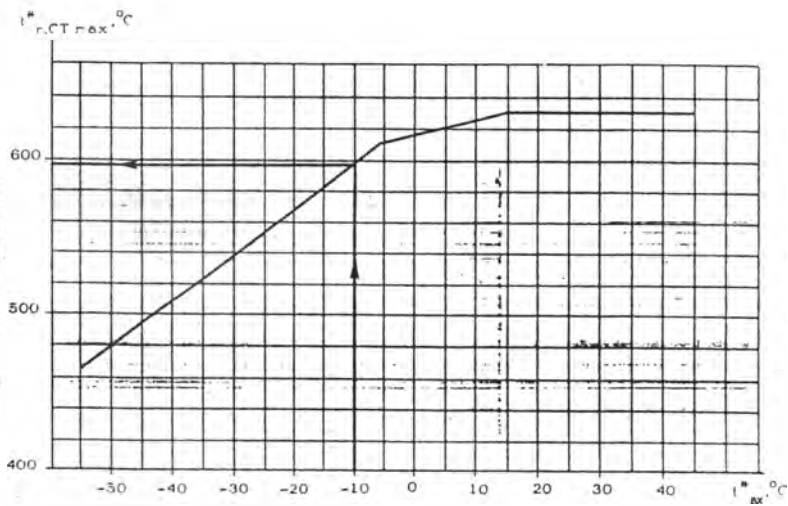


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры газа перед свободной турбиной от температуры воздуха на входе в двигатель

$$P_{2к} = P_{2\max} - 0,0041 \Delta n_{нд},$$

где коэффициенты 0,92; 0,24; 0,0041 – тангенсы углов наклона соответствующих дроссельных характеристик.

Последней операцией значения параметров снижаются вдоль дроссельных характеристик до их значений на фактическом режиме работы двигателя по $n_{нд}$.

Допуски на отклонения измеренных параметров от контрольных: для $n_{вд} + 100$ об/мин, для $t_{гст}^* \pm 30^\circ\text{C}$, для $P_2 \pm 0,3$ кгс/см² ($\pm 0,03$ МПа).

Совпадение измеренных и контрольных параметров с учетом допусков свидетельствует об исправности двигателя.

4.3. Контроль настроечной характеристики

Цель такого контроля – проверка правильности регулировки САР. Принцип проверки – сравнение настройки регулятора оборотов НД (РО) с эталонной. Проверка осуществляется на режиме максимальной мощности (РО_{max}).

Последовательность проверки:

- двигатель выводится на режим максимальной мощности (РО_{max}) и через 1 – 2 мин. работы на установившемся режиме регистрируют значение параметра $n_{нд}$;
- измеренное значение $n_{нд}$ сопоставляется с максимальным значением $n_{нд\max}$, вычисленным по формулярным данным с учетом поправки на условия работы двигателя (см. п.4.2.). Определяется отклонение :

$$\Delta n_{нд} = n_{нд\max} - n_{нд},$$

где $n_{нд\max} = n_{нд\text{ форм}} + \delta n_{нд}$,

$\delta n_{нд}$ – поправка на формулярные данные.

Поправка $\delta n_{нд}$ определяется по графикам $\delta n_{нд} = f(t_{вх}^*)$ (рис.3).

При $\Delta n_{нд} \leq \pm 100$ об/мин САР признается правильно функционирующей. В противном случае производится подрегулировки.

4.4. Контроль состояния двигателя по параметру «скольжение роторов»

Параметр «скольжение роторов» - отношение частот вращения роторов НД и ВД, весьма чувствителен к изменению состояния элементов проточной части двигателя. На этот параметр влияют изменение состояния компрессоров, турбин, настройка РНА. Контроль «скольжения» производится при отклонении параметров двигателя от контрольных (п.4.2.), замене агрегатов управления РНА и их регулировке.

Контроль осуществляется с использованием дроссельной характеристики $n_{вд пр} = f(n_{нд пр})$.

Измеренные при испытаниях значения $n_{нд}$ и $n_{вд}$ приводятся к САУ по известным зависимостям :

$$n_{пр} = n_{нзм} \sqrt{288 / T_{вх}^*},$$

где $T_{вх}^* = t_{вх}^* \cdot C + 273$.

Определенное таким образом $n_{вд пр}$ сравнивается со значением $n_{вд пр}$, найденным по зависимости $n_{вд пр} = f(n_{нд пр})$ (рис.1) при соответствующем значении $n_{нд пр}$. Если найденные значения $n_{вд пр}$ отличаются более чем на 30 об/мин, производят регулировку агрегата АУ /3/.

Библиографический список

1. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Транспорт, 1980. – 248с.
2. Солохин Э.А. Испытание реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1975.-356с.
3. Двигатель НК-16СТ. Руководство по технической эксплуатации.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Выписка из суточной ведомости работы ГПА ц-16
(Тольяттинская КС 05.99.)

Параметры	Значения параметров по вариантам							
	1	2	3	4	5	6	7	8
татм.возд.°С	0	1	0	0	1	1	1	3
ΔРвсас.кам. КПа	0,57	0,58	0,56	0,58	0,57	0,58	0,57	0,58
пнд об/мин	5125	5115	5125	5150	5125	5136	5142	5172
пвд-«-	6360	6320	6360	6380	6365	6396	6349	6411
пст-«-	4230	4210	4210	4210	4210	4199	4199	4211
tg перед.ст.°С	445	445	445	445	447	448	448	454
Рквд МПа	0,63	0,62	0,62	0,63	0,63	0,62	0,62	0,62
Рг перед нагн. МПа	5,43	5,44	5,45	5,49	5,50	5,51	5,51	5,49
Рг после нагн. МПа	7,00	6,99	7,01	7,04	7,08	7,07	7,06	7,03
tg перед нагн.°С	25	26	26	25	26	26	26	26
tg после нагн.°С	47	47	47	47	47	47	48	48
ΔР на конф.КПа	40,7	41,2	41,6	41,6	40,6	41,3	41,7	41,6

Выписка из суточной ведомости работы ГПА ц-16
(Тольяттинская КС 05.99) (продолжение)

Параметры	Значения параметров по вариантам							
	9	10	11	12	13	14	15	16
татм.возд.°С	6	6	5	4	4	4	3	2
ΔРвсас.кам. КПа	0,58	0,56	0,56	0,57	0,56	0,57	0,57	0,57
пнд об/мин	5183	5207	5190	5160	5160	5166	5166	5148
пвд-«-	6427	6458	6450	6396	6380	6396	6419	6380
пст-«-	4222	4234	4232	4211	4211	4211	4228	4222
tg перед.ст.°С	458	448	457	452	452	452	448	448
Рквд МПа	0,63	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Рг перед нагн. МПа	5,47	5,49	5,49	5,47	5,47	5,47	5,45	5,47
Рг после нагн. МПа	7,01	7,05	7,05	7,03	7,03	7,01	7,03	7,05
tg перед нагн.°С	26	26	26	26	26	26	26	26
tg после нагн.°С	48	48	48	48	47	47	48	48
ΔР на конф.КПа	41,2	38,3	40,7	39,2	39,9	38,5	40,2	40,2

Выписка из суточной ведомости работы ГПА ц-16
(Тольяттинская КС 05.99) (продолжение)

Параметры	Значения параметров по вариантам							
	17	18	19	20	21	22	23	24
t _{атм.возд.} °С	2	2	2	5	7	8	2	1
ΔP _{всас.кам.} КПа	0,58	0,58	0,56	0,56	0,56	0,56	0,58	0,58
пнд об/мин	5160	5160	5130	5150	5240	5250	5200	5200
пвд-«-	6396	6396	6350	6360	6450	6470	6440	6430
пст-«-	4222	4234	4200	4200	4370	4360	4360	4200
t _{г перед.ст.} °С	448	447	445	447	467	447	464	457
P _{квд} МПа	0,62	0,62	0,62	0,61	0,62	0,62	0,64	0,64
P _{г перед нагн.} МПа	5,47	5,45	5,47	5,45	5,35	5,35	5,33	5,33
P _{г после нагн.} МПа	7,05	7,05	7,03	7,05	7,09	7,07	7,05	7,05
t _{г перед нагн.} °С	26	26	26	26	26	27	27	26
t _{г после нагн.} °С	48	48	48	48	50	51	51	50
ΔP на конф. КПа	39,3	40,03	38,6	38,5	38,1	36,2	36,3	37,0

Учебное издание

**Контроль параметров газотурбинного двигателя НК-16СТ в
процессе эксплуатации**

Методические указания

Составитель: Епишев Николай Иванович

Самарский государственный аэрокосмический университет имени
академика С.П.Королёва

443086, г. Самара, Московское шоссе, 34