

СУЧАСНІ АВІАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 629.735.083.03(045)

А.А. Иноземцев, д-р техн. наук, проф. (РФ)
Н.С. Кулик, д-р техн. наук, проф.
А.В. Тарасенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
В.И. Чернов, зам. ген. констр. (РФ)

**КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
СТАРЕЮЩЕГО ПАРКА ДВИГАТЕЛЕЙ Д-30КП НА САМОЛЕТАХ ИЛ-76**

Рассмотрена проблема поддержания летной годности стареющего парка двигателей Д-30КП на самолетах Ил-76 для обеспечения безопасной эксплуатации двигателей Д-30КП после продления их ресурсных показателей. Предложена методика оценки технического состояния двигателей. Приведены основные принципы реализации методики обнаружения появившихся неисправностей и дефектов на ранней стадии их развития и предупреждение отказов двигателей Д-30КП в полете.

Розглянуто проблему підтримання льотної придатності старіючого парку двигунів Д-30КП на літаках Іл-76 для забезпечення безпечної експлуатації двигунів Д-30КП після продовження їх ресурсних показників. Запропоновано методику оцінки технічного стану двигунів. Наведено основні принципи реалізації методики виявлення несправностей і дефектів на ранній стадії їх розвитку та запобігання відмов двигунів Д-30КП у польоті.

A problem is maintenance of airworthiness of the Д-30КП engines senescent park installed on the Ил-76 airplanes. A purpose is providing of the Д-30КП engines safe operation after the prolongation of their life time indexes. A task is detection of appearing malfunctions and defects on the early stage of their development and warning of the Д-30КП engines failures in flight.

Постановка проблеми

Авиационные двигатели являются одной из основных функциональных систем самолета. От надежности и экономической эффективности их работы в значительной мере зависит безопасность полетов и стоимость воздушных перевозок. Поэтому при организации работ по поддержанию летной годности авиационной техники на каждом эксплуатационном предприятии особое внимание уделяется контролю технического состояния (ТС) авиационных двигателей.

Проблемы обеспечения безотказной работы авиационных двигателей в полете становятся особенно актуальными при эксплуатации в коммерческих условиях таких двигателей, ресурсные показатели которых уже достигли или приближаются к установленным ограничениям.

К таким двигателям в первую очередь следует отнести практически весь парк двигателей Д-30КП, эксплуатирующихся на всех типах самолетов Ил-76 на авиатранспортных предприятиях России, Украины и других стран СНГ [1].

Двигатель Д-30КП был создан в Пермском моторостроительном конструкторском бюро (ныне ОАО «Авиадвигатель») в начале 70-х годов прошлого столетия. Государственные испытания прошел в 1972 г., в эксплуатацию поступил в 1974 г. [2].

Всего было изготовлено более 4500 двигателей. За период эксплуатации двигатели Д-30КП показали высокую надежность.

Суммарная наработка двигателей Д-30КП с начала эксплуатации составляет более 32 млн. часов, наработка на один досрочный съем с самолета – 18 824 ч при нормативном показателе 6000 ч, а наработка на одно выключение в полете – 106 669 ч при норме 26 000 ч.

Высокая надежность двигателя Д-30КП в эксплуатации позволила поэтапно увеличивать его ресурсные показатели, которые в настоящее время достигли следующих значений:

календарный срок службы – 18 лет;
назначенный ресурс – 9000 ч (4620 полетных циклов);
межремонтный ресурс – 4000 ч (1540 полетных циклов).

Это достаточно высокие ресурсные показатели, но в настоящее время значительная часть парка эксплуатирующихся двигателей Д-30КП уже достигла указанных ограничений или приближается к ним. Так, со всего парка двигателей более 40% уже отработали установленные для них ресурсы и находятся в состоянии ремонта. Около 60% двигателей находятся в эксплуатации. Половина из них имеют наработку свыше 4000 ч, часть более 6500 ч. 75% парка двигателей уже проходили капитальный ремонт [3].

Высокие показатели эксплуатационной надежности двигателей Д-30КП свидетельствуют о значительных запасах их ресурсных возможностей и являются основанием для постановки и решения вопросов о поэтапном увеличении пределов допустимых наработок и календарных сроков службы этих двигателей.

В связи с этим в ОАО «Авиадвигатель», а также в ряде научно-исследовательских организаций и производственных предприятий были изучены возможности продления ресурсов и календарных сроков службы двигателям Д-30КП, разработаны технологии и программы оценки их ТС и сформулированы научно обоснованные рекомендации по продлению ресурсных показателей для каждого экземпляра двигателей Д-30КП.

Согласно разработанным требованиям право на выполнение работ по продлению ресурсных показателей двигателей Д-30КП предоставляется только специально сертифицированным предприятиям, укомплектованным специалистами, имеющими допуск для выполнения этих работ.

При положительных результатах оценки ТС конкретного экземпляра двигателя ему продлеваются ресурсные показатели на очередной этап, т.е. устанавливаются новые ограничения календарного срока службы или наработки часов налета и разрешается дальнейшая их эксплуатация до достижения вновь установленных ограничений. Обычно календарный срок службы продлевается на один год, а наработка двигателя на 300 ± 30 ч.

В соответствии с действующей практикой на этапе эксплуатации после продления ресурсных показателей до наработки вновь установленных ограничений контроль ТС двигателя осуществляется по показаниям штатных контрольно-измерительных приборов, установленных на борту самолета. Однако заметные отклонения контролируемых параметров от нормальных их значений из-за низкой точности и погрешностей систем измерения наблюдаются визуально только после существенных изменений ТС двигателя. Такой контроль ТС двигателя позволяет выявлять возникшие в нем дефекты и неисправности не на ранней стадии их развития, а только при достижении существенных, возможно угрожающих, значений.

Это особенно опасно для стареющих двигателей, так как появление дефектов и скорость их развития тесно связаны с процессами старения, накопления повреждений и усталостью материала конструктивных элементов этих двигателей.

Поэтому сложившаяся практика поэтапного продления ресурсных показателей двигателей Д-30КП с периодической оценкой их ТС не позволяет своевременно выявлять опасные дефекты на ранней стадии их развития, а значит, не может гарантировать безотказную работу двигателей во время полетов до следующего периодического технического обслуживания (ТО).

В связи с этим для обеспечения безопасной эксплуатации двигателей с большой наработкой и большим календарным сроком службы, особенно после продления этих показателей, необходимо создать такую систему поддержания летной годности этих двигателей, которая позволит осуществлять объективный и достоверный контроль ТС каждого двигателя с повышенной частотой контроля. Желательно осуществлять такой контроль не реже одного раза во время каждого полета.

Только при таком подходе можно реализовать стратегию эксплуатации авиационных двигателей по ТС, т.е. эксплуатировать их до полного исчерпания ресурсных возможностей с высокой вероятностью безотказной работы в полете.

Концепцию непрерывного мониторинга ТС двигателя с частотой контроля не реже одного раза за полет можно реализовать только при условии автоматизированной компьютерной обработки параметрической информации о работе каждого экземпляра двигателя.

С целью реализации такой концепции в ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь) совместно с Национальным авиационным университетом (г. Киев) на протяжении более 20 лет выполняются исследования по разработке методов и алгоритмов автоматизированного контроля ТС двигателей по параметрам, зарегистрированным в полете.

Одним из результатов выполненных совместных научных исследований является созданная и проверенная в эксплуатации автоматизированная система (АС) оценки ТС двигателей Д-30КП на самолетах Ил-76 (АС «Алгоритм Д-30КП») [4].

Методика оценки технического состояния двигателей Д-30КП

Основной составляющей математического и методического обеспечения АС «Алгоритм Д-30КП» является специально разработанная методика оценки ТС и сопровождения эксплуатации двигателей Д-30КП (в дальнейшем «методика Д-30КП»), утвержденная Генеральным конструктором ОАО «Авиадвигатель» [5].

В методике Д-30КП для определения ТС реализована неявная диагностическая модель, которая обеспечивает решение следующих основных задач:

- построение математической модели исправного состояния двигателя Д-30КП, работающего на установившихся режимах;
- разработку методов и способов распознавания ТС двигателя, отличающихся от исправного;
- разработка правил принятия решений о ТС и дальнейшей эксплуатации двигателей Д-30КП.

Исправным принято считать такой реальный двигатель, в котором при сопоставлении с виртуальным исправным двигателем, описанным математической моделью исправного состояния, соблюдается геометрическое подобие элементов проточной части и обеспечивается подобие течений газовых потоков на подобных стационарных режимах работы двигателя.

Для определения подобия режимов работы двигателей на стационарных режимах в качестве основного критерия подобия для двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД) в методике Д-30КП используется скольжение роторов S :

$$S = \frac{n_{H0}}{n_{B0}}, \quad (1)$$

где n_{H0} – частота вращения ротора турбокомпрессора низкого давления, приведенная к стандартным атмосферным условиям (САУ);

n_{B0} – частота вращения ротора турбокомпрессора высокого давления, приведенная к САУ.

Для диагностирования газотурбинных двигателей чрезвычайно важное значение имеют характеристики газодинамически подобных режимов двигателя, поскольку любые безразмерные соотношения параметров газового потока в соответствующих сечениях при газодинамически подобных режимах работы, остаются постоянными [6]:

$$\begin{aligned} \frac{P_i^*}{P_H} &= \text{const}; \\ \frac{T_i^*}{T_H} &= \text{const}; \\ \frac{C_i}{\sqrt{T_H^*}} &= \text{const}; \\ M_i &= \text{const}; \\ h_z &= \text{const}, \end{aligned} \quad (2)$$

где i – произвольное сечение проточной части двигателя;

P_i^* – полное давление воздуха в i -м сечении, кг/см²;

P_H^* – полное атмосферное давление, кг/см²;

T_i^* – полная температура в i -м сечении, К;

T_H^* – полная температура наружного воздуха, К;

C_i – скорость потока в i -м сечении, м/с;

M_i – число Маха в i -м сечении;

h_z – коэффициент полезного действия (КПД) любого z -го элемента двигателя.

Используя основные характеристики работы двигателя, в частности, соотношения (2), можно определить связь между основными показателями работы двигателя на подобных режимах:

$$R_0 = \frac{R}{P_H^*} = \text{const};$$

$$R_{уд.0} = \frac{R_{уд}}{\sqrt{T_H^*}} = \text{const};$$

$$G_{B0} = G_B \frac{\sqrt{T_H^*}}{P_H} = \text{const};$$

$$G_{R0} = \frac{G_R}{\sqrt{T_H^*}} = \text{const};$$

$$G_{T0} = \frac{G_T}{P_H^* \sqrt{T_H^*}} = \text{const},$$

где R_0 – приведенная к САУ сила тяги, кН;

$R_{уд.0}$ – приведенная к САУ удельная сила тяги, кН·с/кг;

G_{B0} – массовый расход воздуха через двигатель, приведенный к САУ, кг/с;

G_{R0} – приведенный удельный расход топлива, кг/(ч·Н);

G_{T0} – приведенный часовой расход топлива, кг/ч.

Представленные соотношения называются параметрами подобия и для исправного двигателя при его работе на подобных режимах остаются постоянными.

Они являются функциями скольжения роторов, т.е. функциями основного критерия подобия режимов работы двигателя.

На основании изложенного можно сформулировать следующие положения:

- изменение подобных параметров на подобных режимах работы двигателя свидетельствуют об изменении ТС элементов проточной части или КПД узлов двигателя;

– двигатель находится в исправном состоянии, если на подобных режимах его работы сохраняется подобие течений газовых потоков.

При этом отмеченные основные показатели работы двигателя остаются неизменными (const).

В общем виде математическая модель исправного состояния ТРДД представляет собой некоторое множество функций приведенных к САУ параметров рабочего процесса.

Аргументом этих функций служит критерий подобия режимов работы двигателя, т.е. скольжение роторов S .

В функциональном виде математическая модель исправного состояния двухконтурного газотурбинного двигателя может быть выражена множеством зависимостей вида

$$X_{j0} = f(S), \quad (3)$$

где X_{j0} – j -й измеряемый и регистрируемый параметр работы двигателя, приведенный к САУ.

Поскольку, согласно выражению (1), скольжение роторов S выступает в роли функции двух параметров n_{H0} и n_{B0} , то графическая интерпретация выражения (3) в трехмерных прямоугольных координатах представляет собой трехмерную дроссельную характеристику двигателя (рис. 1)

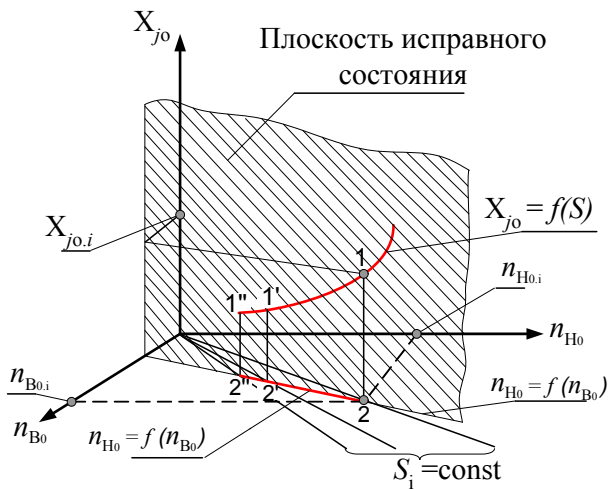


Рис. 1. Трехмерная дроссельная характеристика двигателя

Таким образом, математическая модель исправного состояния ТРДД, выраженная в виде зависимости (3), представляет собой описание его трехмерных дроссельных характеристик, где $X_{j0} = (T_{T.0}^*; G_{T.0}; G_{T.0}/P_{Ф.0}; n_{H0}/\sqrt{T_{T.0}^*})$ и т.д.) являются j -ми параметрами подобия или их соотношениями.

Как видно из рис. 1, проекция всех измененных значений любого параметра подобия X_{j0} на плоскость $n_{B0} - n_{H0}$ представляет собой линию

$$n_{H0} = f(n_{B0}).$$

Если через эту линию провести плоскость, нормальную к плоскости $n_{B0} - n_{H0}$, то на ней будет расположено все множество зависимостей (3).

Поскольку математическая модель строится для исправного двигателя, то эту плоскость можно определить как плоскость исправного состояния.

Если с начала координат в плоскости $n_{B0} - n_{H0}$ провести линии равных скольжений роторов на i -х режимах, т.е.

$$S_i = \frac{n_{H0,i}}{n_{B0,i}} = \text{const},$$

то в каждой точке пересечения этих линий с линией

$$n_{H0} = f(n_{B0})$$

можно определить скольжение роторов, соответствующее исправному состоянию двигателя.

Поскольку S является функцией двух аргументов n_{B0} и n_{H0} , то можно записать:

$$S = f(n_{H0}) = S_H \text{ или } n_{H0} = f(S); \quad (4)$$

$$S = f(n_{B0}) = S_B \text{ или } n_{B0} = f(S). \quad (5)$$

Из рис.1 видно, что для исправного состояния значения S_H и S_B определяются одной и той же точкой 2, которая лежит на линии $n_{H0} = f(n_{B0})$.

Это значит, что для исправного состояния двигателя всегда выполняется равенство

$$S_H = S_B.$$

Следовательно, когда S_H не равно S_B ($S_H \neq S_B$), т.е. когда точка 2 не лежит на линии равных скольжений ($S_i = \text{const}$), диагностируемый двигатель находится в неисправном состоянии.

Это значит, что зависимости (4), (5) наравне с зависимостями (3) входят в состав математической модели исправного состояния ТРДД.

Зависимости (3), (4), (5), которые характеризуют исправное состояние двигателя и размещаются в плоскости исправного состояния, в методике Д-30КП принято называть эталонными. Эти зависимости на режимах работы двигателя, превышающих режимы срабатывания механизации компрессора, представляют собой монотонные (убывающие или возрастающие) функции, которые описываются полиномами n -й степени.

Математическая модель исправного состояния двухвального ТРДД в аналитическом виде представляет собой множество функций приведенных к САУ параметров его рабочего процесса:

$$S_{Hi} = a_{10} + a_{11}n_{H0} + a_{12}n_{H0}^2 + \dots = \sum a_{1n}n_{H0}^n;$$

$$S_{Bi} = a_{20} + a_{21}n_{B0} + a_{22}n_{B0}^2 + \dots = \sum a_{2n}n_{B0}^n;$$

$$n_{H0i} = a_{30} + a_{31}S_i + a_{32}S_i^2 + \dots = \sum a_{3n}S_i^n;$$

$$n_{B0i} = a_{40} + a_{41}S_i + a_{42}S_i^2 + \dots = \sum a_{4n}S_i^n;$$

$$X_{j0i} = a_{50} + a_{51}S_i + a_{52}S_i^2 + \dots = \sum a_{5n}S_i^n;$$

$$X_{j0Hi} = a_{60} + a_{61}S_{Hi} + a_{62}S_{Hi}^2 + \dots = \sum a_{6n}S_{Hi}^n;$$

$$X_{j0Bi} = a_{70} + a_{71}S_{Bi} + a_{72}S_{Bi}^2 + \dots = \sum a_{7n}S_{Bi}^n;$$

где i – этап диагностирования (полета);

j – параметр работы двигателя.

В зависимости от источников информации, на базе которых строится математическая модель исправного состояния двигателя, она может быть среднестатистической или индивидуальной.

Среднестатистическая математическая модель строится по данным сводных дроссельных характеристик или по среднестатистическим данным стендовых испытаний исправных двигателей данного типа, а индивидуальная – по формулярным данным конкретного экземпляра двигателя.

В методике Д-30КП с учетом высотно-скоростных и дроссельных характеристик разработана среднестатистическая математическая модель исправного состояния двигателя Д-30КП, которая имеет вид:

$$n_{H_{\text{пр}i}} = f(S_i) = -776,1543 + 1533,5444S_i - 620,1782S_i^2; \quad (6)$$

$$n_{B_{\text{пр}i}} = f(S_i) = -1282,9514 + 2891,7586S_i - 1489,6727S_i^2; \quad (7)$$

$$S_H = f(n_{H_{\text{пр}i}}) = 0,59495 + 0,004112n_{H_{\text{пр}i}} - 0,00001118n_{H_{\text{пр}i}}^2; \quad (8)$$

$$S_B = f(n_{B_{\text{пр}i}}) = -0,08989 + 0,01535n_{B_{\text{пр}i}} - 0,00005883n_{B_{\text{пр}i}}^2; \quad (9)$$

$$T_{\text{ТР}i}^* = f(S_i) = -10742,766 + 25144,32S_i - 13469,495S_i^2; \quad (10)$$

$$\frac{n_{H_{\text{пр}i}}}{\sqrt{T_{\text{ТР}i}^*}} = f(S_i) = -1,30418 + 4,72898S_i - 0,098703S_i^2; \quad (11)$$

$$G_{\text{ТР}i} = f(S_i) = -13813,568 + 12819,198S_i + 9601,427S_i^2; \quad (12)$$

$$\frac{G_{\text{ТР}i}}{T_{\text{ТР}i}^*} = f(S_i) = 21,846998 - 61,6973S_i + 48,5383S_i^2; \quad (13)$$

$$\frac{G_{\text{ТР}i}}{P_{\text{Фпр}i}} = f(S_i) = -524,919 + 725,034S_i + 12,5773S_i^2. \quad (14)$$

Исходными данными для построения представленной модели послужили формулярные данные двадцати двигателей Д-30КП на пяти режимах работы;

– взлетном;

– номинальном;

– 0,9 номинального;

– 0,7 номинального;

– 0,6 номинального.

Полученные уравнения (6)–(14), описывающие исправное состояние двигателей Д-30КП, по мере поступления дополнительной информации могут уточняться.

Для распознавания отличия фактического состояния контролируемых двигателей от их исправного (исходного) состояния, т.е. для решения задач диагностирования, в разработанной методике Д-30КП определены диагностические признаки, которыми являются параметры работы двигателей, зарегистрированные в полете и приведенные к САУ.

Исходя из реальных возможностей регистрации полетной информации на самолетах Ил-76 для оценки ТС двигателей Д-30КП в методике Д-30КП могут быть использованы только следующие приведенные к САУ параметры [7]:

– приведенное значение частоты вращения ротора турбокомпрессора низкого давления, 1/мин:

$$n_{H_{0,i}} = n_{H_i} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_{H_i}^*}}; \quad (15)$$

– приведенное значение частоты вращения ротора турбокомпрессора высокого давления, 1/мин:

$$n_{B_{0,i}} = n_{B_i} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_{H_i}^*}}; \quad (16)$$

– приведенное значение температуры газа за турбиной, К:

$$T_{T_{0,i}}^* = (273 + t_{T_i}^*) \cdot \frac{288}{T_{H_i}^*}; \quad (17)$$

– приведенное значение часового расхода топлива, кг/ч:

$$G_{T_{0,i}} = G_{T_i} \cdot \frac{101325}{p_{H_i}^*} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_{H_i}^*}}; \quad (18)$$

– приведенное значение давления топлива перед форсунками, кг/см²:

$$p_{\Phi_{0,i}} = p_{\Phi_i} \frac{101325}{p_{H_i}^*}. \quad (19)$$

В приведенных формулах (15)–(19) значение полной температуры атмосферного воздуха на входе в двигатель К определяется как:

$$T_{H_i}^* = 279,1 + 1,022t_{\text{Нприб}},$$

где $t_{\text{Нприб}}^*$ – полная температура наружного воздуха, замеренная по прибору, °С.

Полное давление воздуха на входе в двигатель определяется, в зависимости от высоты полета H , по следующим формулам:

– для $H < 11\,000$ м

$$p_{H_i}^* = 101325(1 - 0,022569 \cdot H_i \cdot 10^{-3})^{5,255878} \times \\ \times (1 - 0,2M^2);$$

– для $H > 11\,000$ м

$$p_{H_i}^* = 22611,5 \cdot 10^{-0,068483(H_i \cdot 10^{-3} - 11)} \times \\ \times (1 + 0,2M^2)^{3,5}.$$

Как известно, в процессе технической эксплуатации с увеличением наработки летных часов и полетных циклов, а также при возникновении случайных повреждений в авиационных двигателях появляются разного вида неисправности и дефекты, следствием которых является нарушение подобия течения газовых потоков и (или) перераспределение вносимой в двигатель энергии между роторами турбокомпрессоров низкого и высокого давлений.

В результате этого происходит изменение скольжения роторов, т.е. изменение основного критерия подобия режимов работы двигателя (1), что в свою очередь приводит к отклонению диагностических признаков, характеризующих фактическое ТС двигателя.

Для определения точки отсчета начала изменения диагностических признаков в процессе начального периода сопровождения эксплуатации конкретного экземпляра двигателя по данной методике формируется математическая модель его исходного состояния.

Таким эталоном обычно служит период эксплуатации исправного двигателя с момента начала его диагностирования до набора необходимого статистического материала, достаточного для описания этого этапа.

Достаточной выборкой для формирования модели исходного состояния принимается информация о работе двигателя за 20 полетов.

Для формирования достоверной математической модели исходного ТС двигателя необходимо убедиться в объективности определения его исправного состояния. Это очень важно потому, что принятое решение о признании исходного состояния двигателя за его исправное состояние во многом определяет достоверность и объективность диагностирования.

В практической деятельности авиационных предприятий достоверность исправного состояния двигателя подтверждается результатами работ по контролю его ТС при ТО на земле с использованием инструментальных и визуальных методов неразрушающего контроля.

Для своевременного определения отклонений фактического ТС контролируемого двигателя от его исходного состояния в методике Д-30КП подробно изложены принципы и методы определения диагностических отклонений (ДО), которые предполагают выполнение последовательного ряда математических операций.

1. Определение *абсолютных отклонений* диагностических признаков Δ , которые представляют собой алгебраическую разность между фактическим и эталонным значениями приведенного параметра работы двигателя на i -м этапе диагностирования:

$$\Delta(n_{H0})_i = n_{H0,i} - n_{H0,i}^{\varepsilon};$$

$$\Delta(n_{B0})_i = n_{B0,i} - n_{B0,i}^{\varepsilon};$$

$$\Delta(X_{j0})_i = X_{j0,i} - X_{j0,i}^{\varepsilon};$$

$$\Delta(X_{j0})_{Hi} = X_{j0,Hi} - X_{j0,Hi}^{\varepsilon};$$

$$\Delta(X_{j0})_{Bi} = X_{j0,Bi} - X_{j0,Bi}^{\varepsilon};$$

где ε – значения параметров, какими они были бы в случае исправного состояния двигателя при фактическом значении скольжения роторов S_i .

Такие значения параметров называются эталонными.

2. Определение *относительных отклонений* диагностических признаков δ , под которыми подразумевается отношение абсолютных отклонений к значениям приведенных параметров, рассчитанных по математической модели для значения скольжения роторов на стандартном режиме диагностирования S^C , например:

$$\delta(X_{j0}) = \delta_{ji} = \frac{\Delta(X_{j0})_i}{X_{j0,S^C}^{\varepsilon}} \quad (20)$$

В качестве S^C принимается математическое ожидание скольжения роторов на режиме работы двигателя, принятого для диагностирования. Для диагностирования двигателей Д-30КП/КП-2 по данным информации, зарегистрированной в полетных картах, – это математическое ожидание скольжения роторов на постоянном режиме работы двигателя в крейсерском полете самолета при $n_B = 88\%$.

3. Определение *нормированных отклонений* диагностических признаков N , которые представляют собой отношение относительного отклонения к коэффициенту нормирования. Например, для формулы (20) нормированное отклонение будет иметь вид:

$$N(X_{j0})_i = N_{ji} = \frac{\delta_{ji}}{\sigma(\delta_{ji})_{20}}, \quad (21)$$

где $\sigma(\delta_{ji})_{20}$ – коэффициент нормирования, который равен среднеквадратичному отклонению относительного отклонения δ_{ji} , определенному по математической модели исходного (исправного) состояния конкретного двигателя.

4. Определение *центрированного отклонения* диагностических признаков d , которое представляет собой нормированное отклонение, определенное по формуле (21), из которого вычтено значение математического ожидания этого отклонения, определенное по математической модели исходного состояния конкретного двигателя:

$$d(X_{j0})_i = d_{ji} = N_{ji} - \bar{N}_{j20}, \quad (22)$$

где \bar{N}_{j20} – математическое ожидание нормированных отклонений N_{ji} , вычисленное по математической модели исходного состояния двигателя. Определенное по формуле (22) центрированное отклонение диагностических признаков принято называть диагностическим. В дальнейшем оно используется для оценки ТС двигателей.

Для практической реализации изложенных теоретических подходов формула (22) в разработанной методике Д-30КП может быть представлена в виде:

$$d(X_{j0})_i = \frac{X_{j0i} X_{j0i}^{\dot{Y}}}{X_{j0S^C}^{\dot{Y}} \cdot \sigma[\delta(X_{j0})]_{20}} - \overline{N(X_{j0})_{20}}. \quad (23)$$

Рассчитанные по формуле (23) ДО позволяют:

- сравнивать изменения параметров разной физической природы;
- устанавливать единые допуски на их изменения;

- определять диагностическую ценность отклонений конкретных неисправностей;
- исключать систематические погрешности, возникающие при их определении.

Для реализации изложенного подхода в методике Д-30КП использованы все существующие на самолете Ил-76 возможности получения информации о параметрах, характеризующих работу двигателей Д-30КП/КП-2 в полете.

Расчет отклонений диагностических признаков $d(X_{j0})_i$ осуществляется для всех регистрируемых на самолете параметров работы двигателей и для всех возможных их соотношений.

Однако при расчете отклонений диагностических признаков из-за всевозможных случайных погрешностей их определения существует разброс полученных значений, что влияет на объективность анализа ТС контролируемых двигателей и на достоверность принимаемых решений о дальнейшей их эксплуатации.

Для уменьшения разбросов расчетных значений ДО в методике Д-30КП предусмотрено сглаживание пиковых значений результатов расчета.

Наиболее помехоустойчивым методом сглаживания является метод скользящих медиан по пяти значениям, либо метод скользящей полосы, а наименее трудоемким методом – α -сглаживание.

С целью обеспечения возможности раннего обнаружения появившихся в двигателе неисправностей и дефектов, а также для отслеживания характера и динамики их развития и принятия обоснованных решений о фактическом ТС двигателя в методике Д-30КП разработаны и представлены три типа диагностических допусков на изменение по наработке ДО (рис. 2).

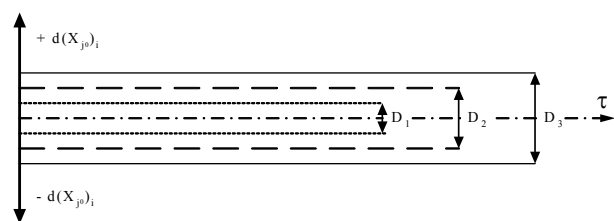


Рис. 2. Диагностические допуски на отклонение диагностических признаков

Допуски устанавливаются на основании теории толерантных границ [8]:

- *допуск на погрешность* определения сглаженных значений ДО D_1 :

$$D_1 = \bar{N}_{j20} \pm K_1 \sigma(N_{ji})_{20},$$

где $K_1 = 1,5$ – коэффициент толерантных границ [9] при наработке $n = 20$, доверительной вероятности границ $\gamma = 0,95$, вероятности неперевышения границ генеральной выборки $P = 0,95$;

– профилактический допуск на изменение сглаженных значений отклонения диагностических признаков (ДО) D_2 :

$$D_2 = \bar{N}_{j20} \pm K_2 \sigma(N_{ji})_{20},$$

где $K_2 = 2,00$ при $\gamma = 0,95$ и $P = 0,985$;

– контрольный допуск на изменение сглаженных значений отклонения диагностических признаков (ДО) D_3 :

$$D_{31} = \bar{N}_{j20} \pm K_3 \sigma(N_{ji})_{20},$$

где $K_3 = 3,00$ при $\gamma = 0,95$ и $P = 0,997$.

Установленные допуски служат основанием для признания факта отклонения ТС контролируемого двигателя от его исходного (исправного) состояния и для формирования рекомендаций по дальнейшей его эксплуатации.

Для автоматизированного анализа характера изменений ДО в предлагаемой методике используется ряд критериев. Анализ отклонений начинается с пятого полета и до набора однородной выборки данных из 20 полетов выполняется по среднестатистическим характеристикам математической модели исходного состояния, основными из которых являются:

– коэффициенты нормирования $\sigma [\delta(X_{j0})]_{20}$;

– математические ожидания $D(X_{j0})_{20}$;

– допуски D_1, D_2, D_3 .

Затем анализу подвергается текущая выборка, которая состоит из 20 полетов. До набора выборки ($i = 20$) для анализа ДО используются среднестатистические значения допусков:

$$D_1 = \pm 1,5;$$

$$D_2 = \pm 2,0;$$

$$D_3 = \pm 3,0.$$

Для оценки однородности анализируемой выборки и определения аномальных значений ДО используется критерий Н.В. Смирнова [10].

Для оценки изменения величины дисперсии анализируемой выборки относительно какой-либо предыдущей используется критерий Фишера.

Для оценки изменения математического ожидания анализируемой выборки относительно предыдущего используется критерий равенства двух средних совокупностей [10].

Для повышения достоверности оценки постепенного и перемежающегося характера изменения

ДО выполняется сглаживание анализируемых выборок методом скользящих медиан, который обладает чрезвычайно важным свойством помехоустойчивости.

Для выявления тренда изменения сглаженных значений ДО используются параметрические критерии серий или инверсий и параметрический критерий Аббе [11].

Для оценки стохастической независимости анализируемой выборки сглаженных значений ДО используется критерий квадратов последовательных различий [12].

Разработанное и изложенное в методике Д-30КП математическое обеспечение решения задач диагностирования ТС двигателей Д-30КП по полетной информации предполагает выполнение большого объема достаточно сложных расчетов и графических построений, которые могут быть реализованы при условии использования имеющихся только у разработчика двигателя расчетных и экспериментальных данных о его дроссельных, высотно-скоростных и эксплуатационных характеристиках.

Поэтому коррекция математического обеспечения АС «Алгоритм Д-30КП» в процессе эксплуатации, а также мониторинг ТС авиационных двигателей согласно изложенным подходам может осуществляться только под непосредственным контролем и методическим руководством разработчика данного типа двигателей.

Программное обеспечение автоматизированной системы «Алгоритм Д-30КП»

С целью реализации изложенных подходов в АС, выполненных на основе современной вычислительной техники, в АС «Алгоритм Д-30КП» было разработано специальное программное обеспечение, которое позволяет решать в автоматизированном режиме такие задачи:

– ввод и хранение результатов расшифровки информации с магнитных лент бортовых регистров МСРП-64;

– ввод и хранение информации, зарегистрированной в полетных картах;

– ввод, корректировка и хранение информации о составе парка самолетов и двигателей;

– ввод, корректировка и хранение информации о результатах работ по оценке ТС двигателей, выполненных при ТО на земле;

– автоматическая обработка введенной полетной информации и формирование отклонений диагностических признаков;

– оценка диагностических параметров по полетной информации;

– хранение полученных результатов для дальнейшего анализа изменений ТС контролируемого парка двигателей;

– анализ тенденций и прогнозирование изменения диагностических признаков за несколько полетов;

– локализация неисправностей, выявленных по результатам обработки полетной информации.

В методике Д-30КП разработаны и с помощью программного обеспечения в АС «Алгоритм Д-30КП» реализованы принципы формирования правил принятия решений по результатам оценки ТС контролируемого двигателя по полетной информации.

Для локализации причин, вызвавших отклонения диагностических признаков, а также для определения возможных неисправностей в АС «Алгоритм Д-30КП» в первую очередь анализируется характер изменения ДО в поле установленных для каждого контролируемого двигателя допусков D_1, D_2, D_3 .

При появлении сигналов о выходе диагностических признаков за пределы установленных допусков D_1, D_2, D_3 в АС «Алгоритм Д-30КП» с целью локализации появившихся неисправностей разработаны правила принятия решений о ТС контролируемых двигателей и о возможности их дальнейшей эксплуатации.

Для обеспечения комплексного подхода к диагностированию двигателей в АС «Алгоритм Д-30КП» кроме полетной предусмотрена обработка и другой дополнительной информации, полученной на земле с использованием инструментальных средств визуального и неразрушающего контроля при ТО. Поэтому для обеспечения объективности и достоверности принимаемых решений о фактическом ТС подконтрольных двигателей Д-30КП необходимо, чтобы в информационную базу АС «Алгоритм Д-30КП» своевременно и в полном объеме поступала вся необходимая информация, которую можно классифицировать следующим образом:

– параметрическая информация о работе каждого двигателя в полете, регистрируемая членами экипажа вручную в специальных полетных картах;

– полетная информация о работе двигателей, регистрируемая бортовыми системами объективного контроля МСРП-64, установленными на самолетах Ил-76;

– информация, получаемая на земле в результате выполнения работ по оценке ТС двигателей с использованием средств визуально-оптического и инструментального неразрушающего контроля

во время очередного ТО самолетов и при продлении ресурсных показателей двигателей;

– результаты контроля работы двигателей при их опробованиях на земле;

– данные о проведенных регулировках и заменах агрегатов во время планового ТО двигателя и в период его эксплуатации между формами периодического ТО;

– формулярные данные о каждом экземпляре двигателя;

– информация, зафиксированная в нормативно-технической документации (НТД).

Таким образом, программное обеспечение разработанной АС «Алгоритм Д-30КП» позволяет осуществить анализ и оценку ТС двигателей Д-30КП в процессе их эксплуатации не только по зарегистрированным в полете данным, но и по информации, полученной при ТО на земле, т.е. используется комплексный подход.

Организационное обеспечение автоматизированной системы «Алгоритм Д-30КП»

Порядок формирования и передвижения информационных потоков, а также общая схема функционирования АС «Алгоритм Д-30КП» показаны на рис. 3, из которого видно, что организационная структура АС состоит из двух основных функциональных подсистем, обозначенных на рис. 3 как подсистемы *A* и *B*.

Функциональные подсистемы *A* и *B* могут быть удалены друг от друга на значительные расстояния, поэтому оперативная связь между ними может осуществляться только с помощью современных средств электронной связи.

Согласно представленной функциональной схеме в производственно-диспетчерском отделе каждого эксплуатационного предприятия *A* осуществляется сбор всей необходимой информации, которая отображает ТС каждого подконтрольного двигателя. Полученная в производственно-диспетчерском отделе информация формируется в виде файлов и передается в аналитический компьютерный центр *B*, который состоит из двух структурных подразделений:

C – участок компьютерной обработки информации;

D – группа экспертных оценок ТС двигателей.

В компьютерном участке *C* осуществляется обработка полученной информации в соответствии с руководством и инструкциями по эксплуатации АС «Алгоритм Д-30КП». В результате обработки и анализа параметрической информации составляется технический отчет, в котором делается заключение о ТС двигателя.

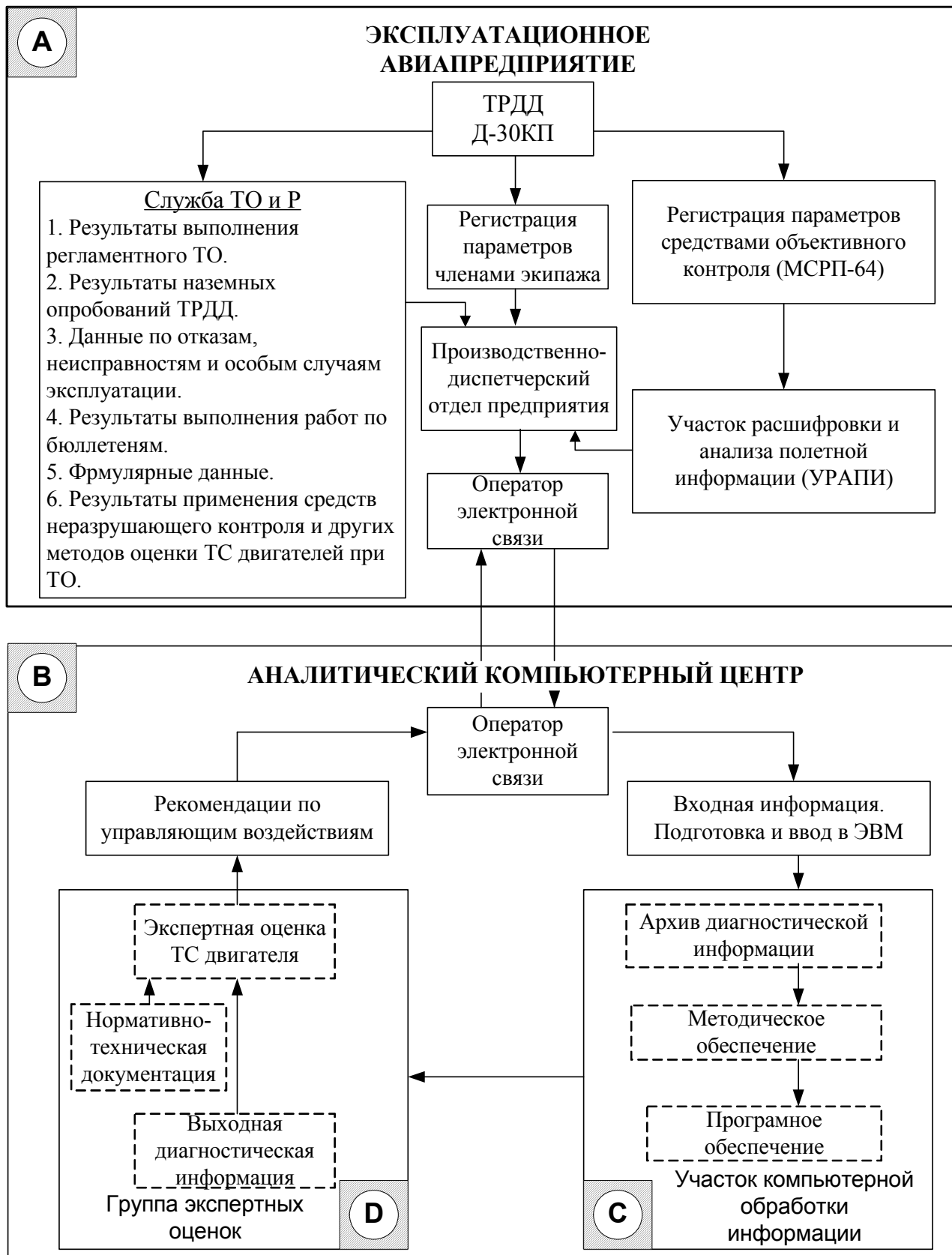


Рис. 3. Организационная структура АС сопровождения эксплуатации парка авиационных двигателей «Алгоритм Д-30КП»

По результатам компьютерной обработки информации предусмотрена фиксация одного из следующих трех видов ТС двигателя:

- исправный;
- подозрение на неисправность;
- неисправный.

Если двигатель классифицируется как исправный, то принимается решение о продолжении его эксплуатации в обычном режиме без ограничений. Если в результате обработки и анализа информации ТС двигателя классифицируется как подозрение на неисправность или неисправный, тогда все рабочие материалы компьютерного анализа передаются в группу экспертных оценок ТС двигателей *D*.

В состав группы *D* входят специалисты, имеющие большой опыт эксплуатации двигателей Д-30КП на самолетах Ил-76, профессиональную теоретическую подготовку, специальную подготовку для оценки ТС двигателя по методике Д-30КП, а также допуск к выполнению работ с АС сопровождения эксплуатации двигателей «Алгоритм Д-30КП».

В случае возникновения специфических вопросов в состав экспертной группы могут привлекаться узкопрофильные специалисты нужного направления.

Экспертная группа исследует входную и выходную диагностическую информацию, изучает условия эксплуатации, анализирует требования действующей НТД и производит экспертную оценку ТС подконтрольного двигателя.

На основании экспертной оценки результатов компьютерного анализа с учетом требований НТД и накопленного опыта эксплуатации делается заключение о ТС конкретного двигателя и разрабатываются рекомендации по управляющим воздействиям и о дальнейшей его эксплуатации, которые при необходимости согласовываются с разработчиком двигателя и с помощью электронной связи передаются на эксплуатационное предприятие для выполнения назначенных контрольно-восстановительных работ.

Опыт эксплуатации и рекомендации по совершенствованию автоматизированной системы «Алгоритм Д-30КП»

Опыт использования АС «Алгоритм Д-30КП» показал высокую чувствительность разработанной системы к изменению ТС двигателей Д-30КП в процессе их эксплуатации на самолетах Ил-76.

Реализованные в АС «Алгоритм Д-30КП» методы обработки и анализа зарегистрированной в полете и на земле информации позволяют своевременно и с высокой достоверностью определять появление в двигателе опасных дефектов и неисправностей на ранней стадии их развития. Это дает реальную возможность надежно и своевременно выявлять предотказные состояния двигателей Д-30КП и обеспечивать безопасную их эксплуатацию до исчерпания физических ресурсных возможностей.

Однако на достоверность результатов диагностирования ТС подконтрольных двигателей, выполненного с использованием АС «Алгоритм Д-30КП», значительное влияние оказывает объективность считывания и регистрации полетной информации, а также своевременность ее представления в необходимом объеме.

В настоящее время в связи с отсутствием технических возможностей регистрации необходимого количества параметров работы двигателей Д-30КП с помощью установленной на борту самолета системы объективного контроля МСРП-64 регистрация необходимых для АС «Алгоритм Д-30КП» параметров осуществляется членами экипажа вручную. Для этого используется разработанная в ГосНИИ ГА и введенная в эксплуатацию в 1979 г. карта регистрации значений параметров наработки двухконтурных двигателей при выполнении рейсов (в дальнейшем «полетная карта»).

Согласно действующей инструкции измерение и запись в полетную карту контролируемых параметров двигателей производится бортинженером один раз за полет на эшелоне $H = 8000-12000$ м при установившейся скорости полета и на установившемся режиме работы двигателя при $n_B = 88$ %. Причем частота вращения роторов турбокомпрессоров высокого давления n_B для всех четырех двигателей Д-30КП самолета Ил-76 должна быть одинаковой.

Точность и достоверность регистрируемой таким образом информации в значительной степени зависит от профессиональных способностей операторов и от их отношения к служебным обязанностям, т.е. имеет субъективный характер.

Для исключения влияния субъективного фактора на результаты оценки ТС двигателей в ОАО «Авиадвигатель» совместно с АНТК им. С.В. Ильюшина была проведена исследовательская и опытно-конструкторская работа по изучению возможностей изменения перечня параметров работы двигателей Д-30КП, регистрируемых системой объективного контроля МСРП-64 на борту самолетов Ил-76.

Основным недостатком действующей на самолете Ил-76 АС регистрации, который не позволяет реализовать методику Д-30КП, является отсутствие в перечне регистрируемых параметров значения частоты вращения ротора турбокомпрессора низкого давления n_H , без которого невозможно определить скольжение роторов S , – основного диагностического признака, без которого невозможна реализация неявной диагностической модели, изложенной в методике Д-30КП.

В результате проведенной совместной научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы был пересмотрен существующий перечень регистрируемых с помощью МСРП-64 параметров и введена регистрация частоты вращения роторов низкого давления n_H всех четырех двигателей Д-30КП, установленных на самолете Ил-76.

После этого перечень параметров, необходимых для реализации методики Д-30КП, регистрируемых системой МСРП-64 на самолете Ил-76, стал следующим:

- частота вращения ротора турбокомпрессора низкого давления n_H , об/мин;
- частота вращения ротора турбокомпрессора высокого давления n_B , об/мин;
- полная температура газов за турбиной t^*_T , °С;
- мгновенный массовый расход топлива G_T , кг/ч;
- определенная по прибору полная температура наружного воздуха t^*_H , °С;
- высота полета H , м;
- число Маха M .

В результате этой доработки была впервые реализована возможность использования АС «Алгоритм Д-30КП» для оценки ТС двигателей Д-30КП по полетной информации, зарегистрированной бортовыми средствами объективного контроля.

Эксплуатационная проверка доработанной на самолете Ил-76 бортовой системы МСРП-64 не только подтвердила повышение достоверности и объективности регистрации диагностических параметров, но и показала возможность увеличения частоты контроля ТС двигателей за время продолжительности полета. В связи с тем, что на магнитных носителях МСРП-64 сохраняется непрерывный график изменения значений регистрируемых параметров работы двигателей в продолжение всего полета, то для осуществления контроля его ТС можно выбрать установившийся режим работы двигателя на любом участке полета. В принципе, можно даже реализовать разработанные методы контроля ТС двигателя на переходных режимах его работы, что позволяет существенно повысить объективность и достоверность контроля.

В АС «Алгоритм Д-30КП» для анализа межполетных трендов диагностических признаков считывание параметров работы двигателей с магнитной ленты МСРП-64 в настоящее время в экспериментальной программе исследований осуществляется на следующих этапах полета:

- на взлете через 6 с после сигнала уборки шасси (взлетный режим работы двигателей);
- при достижении высоты 5000 м (номинальный режим работы двигателей);
- через 20 мин после набора высоты полета (крейсерский режим работы двигателей);
- за 10 мин до начала снижения (крейсерский режим работы двигателей).

При выборе указанных точек считывания полетной информации с магнитных носителей исходили из условия снижения разброса значений параметров, характеризующих работу двигателей и внешние условия полета.

Таким образом, полученные результаты эксплуатационной проверки доработанной системы МСРП-64 показали значительное преимущество автоматической регистрации на магнитных носителях полетной информации, необходимой для реализации методики Д-30КП, по сравнению с ручной регистрацией членами экипажей самолетов Ил-76 в полетных картах.

На основании полученных результатов можно рекомендовать всем авиатранспортным предприятиям, эксплуатирующим самолеты Ил-76, с целью обеспечения безопасной эксплуатации двигателей Д-30КП до исчерпания их физических ресурсных возможностей произвести доработку систем регистрации параметров МСРП-64 на всех приписных бортах самолетов Ил-76 и обеспечить внедрение контроля ТС стареющего парка двигателей Д-30КП по полетной информации с использованием АС «Алгоритм Д-30КП».

Выводы

1. В настоящее время на самолетах Ил-76 эксплуатируется большой парк двигателей Д-30КП, значительная часть которых уже исчерпала установленные ресурсы или приближается к их граничным значениям.
2. За длительное время эксплуатации, с начала 70-х годов прошлого столетия, двигатели Д-30КП показали высокий уровень надежности, который значительно превышает нормативные значения, что свидетельствует о наличии в них существенных запасов неисчерпанных ресурсных возможностей.

3. Рыночные (коммерческие) условия выполнения воздушных грузовых перевозок самолетами Ил-76 стимулируют безопасную эксплуатацию установленных на них двигателей Д-30КП до полного исчерпания их физических ресурсных возможностей. Авиационные предприятия, эксплуатирующие самолеты Ил-76, заинтересованы в продлении установленных ресурсов и календарных сроков службы двигателей Д-30КП до полного исчерпания их физических возможностей, но при этом они озабочены организацией надежного контроля ТС этих двигателей с целью предупреждения их отказов в воздухе во время полета.

4. В соответствии с действующей эксплуатационно-технической документацией в настоящее время на авиационных предприятиях, эксплуатирующих самолеты Ил-76, контроль ТС двигателей Д-30КП осуществляется периодически при их ТО на земле. Периодичность контроля ТС двигателей определяется регламентом ТО самолета. Работы по продлению ресурсов и календарных сроков службы двигателей, как правило, приурочиваются к очередному сроку выполнения регламентных работ. Но несмотря на то, что при выполнении этих работ применяются самые современные средства инструментального неразрушающего контроля, периодическая оценка ТС двигателей не гарантирует их безотказную работу на этапе до следующей очередной формы периодического ТО самолета.

Особенно это касается стареющих двигателей, которые эксплуатируются после продления их ресурсных показателей.

Для обеспечения безопасной эксплуатации стареющих двигателей Д-30КП, особенно после продления их ресурсных показателей, необходимо обеспечить контроль их ТС во время работы в полете с частотой контроля не реже одного раза в каждом полете.

5. Для осуществления контроля ТС двигателей Д-30КП по параметрам их работы, зарегистрированным в полете, в ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь) совместно с Национальным авиационным университетом (г. Киев) разработана методика Д-30КП, на основании которой создана АС сопровождения эксплуатации этих двигателей «Алгоритм Д-30КП».

6. В зависимости от организационного обеспечения регистрация необходимой полетной информации в АС «Алгоритм Д-30КП» может осуществляться вручную членами экипажа в полетных

картах или автоматически бортовыми регистраторами МСРП-64. В случае регистрации параметров в полетных картах контроль ТС двигателя может осуществляться только один раз за полет, а в случае регистрации полетной информации на магнитных носителях МСРП-64 количество контролируемых участков полета неограничено. При этом регистрация параметров с помощью МСРП-64 позволяет существенно повысить достоверность и объективность контроля ТС двигателей.

7. С целью обеспечения возможности регистрации параметров работы двигателей в полете, необходимых для оценки их ТС с использованием АС «Алгоритм Д-30КП», была выполнена доработка системы объективного контроля МСРП-64 на одном самолете Ил-76. Эксплуатационная проверка доработанной системы не только подтвердила повышение достоверности и объективности регистрации диагностических параметров, но и показала возможность увеличения частоты контроля ТС за время полета.

Доработка бортовых регистраторов МСРП-64 на всех приписных бортах самолетов Ил-76 обеспечит безопасную эксплуатацию стареющего парка двигателей Д-30КП под контролем АС «Алгоритм Д-30КП».

8. Методическое обеспечение АС «Алгоритм Д-30КП» разработано на основании имеющихся только у разработчика двигателя Д-30КП необходимых расчетных и экспериментальных данных о закономерностях изменения газодинамических параметров рабочего процесса двигателя. В связи с этим необходимая в процессе эксплуатации периодическая коррекция математического аппарата предлагаемой АС, разработка алгоритмов оценки ТС двигателей и правил принятия решений о дальнейшей их эксплуатации могут осуществляться только под методическим руководством и при непосредственном участии разработчика двигателя.

9. Накопленный опыт сопровождения эксплуатации двигателей Д-30КП под контролем АС «Алгоритм Д-30КП» показал высокую чувствительность предложенного метода контроля ТС двигателя к появлению неисправностей и дефектов на ранней стадии их развития, что позволяет своевременно выявлять предотказные состояния контролируемых двигателей и не допускать их отказов во время полета.

Таким образом, разработанная АС «Алгоритм Д-30КП» позволяет реализовать концепцию безопасной эксплуатации стареющего парка двигателей Д-30КП до исчерпания их физических

ресурсных возможностей и положительно решать вопросы о практическом внедрении стратегии эксплуатации этих двигателей по их ТС.

10. Из опыта организации работ по практическому применению разработанной АС в отдельных эксплуатационных предприятиях следует, что наиболее эффективно она может быть использована только в специально созданных хозрасчетных аналитических компьютерных центрах мониторинга эксплуатации авиационных двигателей (в дальнейшем компьютерный центр).

Компьютерные центры должны быть организационно независимыми от эксплуатантов авиационной техники и работать под методическим руководством и при непосредственном участии разработчиков авиационных двигателей. Территориально они могут быть государственными или региональными, т.е. обеспечивать сопровождение эксплуатации парка двигателей всех авиатранспортных предприятий конкретной страны или отдельных ее регионов.

Компьютерные центры должны в обязательном порядке проходить сертификацию и лицензирование в государственных авиационных администрациях и являться неотъемлемой частью общегосударственных систем поддержания летной годности авиационной техники и обеспечения безопасности полетов.

11. Решения о продлении ресурсных показателей авиационных двигателей Д-30КП должны приниматься только на основании заключений, сделанных в компьютерных центрах по результатам комплексного анализа ТС конкретного экземпляра двигателя с использованием АС «Алгоритм Д-30КП». Дальнейшая эксплуатация двигателей Д-30КП после продления их ресурсных показателей должна продолжаться только под контролем компьютерных центров мониторинга эксплуатации авиационных двигателей с частотой оценок их ТС по методике Д-30КП не реже одного раза в каждом полете.

Литература

1. *Тарасенко А.В.* Особенности эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей в условиях коммерческой деятельности авиапредприятий // *Вісн. КМУЦА.* – 1998. – № 1. – С. 99–101.
2. *Авиационные двухконтурные двигатели Д-30КУ и Д-30КП (конструкция, надежность и опыт эксплуатации) / Л.П. Лозицкий, М.Д. Авдошко, Л.П. Ступников и др.* – М: Машиностроение, 1988. – 224 с.
3. *Двигатели 1944-2000 (авиационные, ракетные, морские, промышленные) // Сер. Отечественная авиация и ракетно-космическая техника.* – М: АКС – Конверсалт, 2000. – С. 10–11.
4. *Автоматизированная система контроля технического состояния и сопровождения эксплуатации двигателей Д-30КП на самолетах Ил-76 (АС «Алгоритм Д-30КП») / А.А. Иноземцев, Н.С. Кулик, А.Г. Кучер и др. // Техническое описание и руководство по эксплуатации.* – К: НАУ, 2003. – 90 с.
5. *Методика оценки технического состояния и сопровождения эксплуатации двигателей Д-30КП / А.А. Иноземцев, Н.С. Кулик, А.В. Тарасенко и др. // Методическое и математическое обеспечение АС «Алгоритм Д-30КП».* – К: НАУ, 2003. – 141 с.
6. *Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М.* Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 2. – М.: Машиностроение, 1978. – 336 с.
7. *Теория реактивных двигателей. / Б.С. Стечкин и др. Ч. 2.* – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1954. – 495 с.
8. *Химмельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами. – М.: Мир, 1973. – 958 с.
9. *Устойчивые статистические методы оценки данных / пер. с англ. Ю.И. Малахова.* – М.: Машиностроение, 1984. – 232 с.
10. *Степнов М.Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1985. – 231 с.
11. *Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1971. – 408 с.
12. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика. Основы моделирования и первичной обработки данных. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

Стаття надійшла до редакції 26.06.08.