

УДК 629.7.036.3

А. С. ГИШВАРОВ, И. В. ПРИБ**МЕТОД ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД**

Рассматривается методика выбора оптимальных условий проведения диагностирования состояния авиационного ГТД, основанного на идентификации математической модели рабочих процессов двигателя, позволяющая повысить вероятность распознавания состояния двигателя. *Газотурбинный двигатель ; контролируемые параметры ; параметрическое диагностирование ; математическая модель рабочих процессов ; идентификация ; параметры состояния ; оптимизация ; диагностические матрицы ; обусловленность ; погрешность ; компрессор ; камера сгорания ; турбина*

В настоящее время в практике технической диагностики авиационных ГТД используется целый ряд методов: физические, механические, параметрические, которые в равной степени могут быть применены для диагностирования ГТД [1, 2, 3, 5].

Среди множества возникающих неисправностей и отказов значительную часть составляют параметрические, заключающиеся в несоответствии значений контролируемых на двигателе диагностических параметров нормам технических условий.

Параметрическим методам диагностирования, основанным на анализе термогазодинамических параметров, присущи некоторые характерные отличия, которые в совокупности определяют особое место этих методов в системе контроля состояния двигателя [1].

Диагностическая информация, содержащаяся в указанных параметрах двигателя, собирается на работающем двигателе. При достаточной (по количеству и составу) номенклатуре этих параметров, при непрерывном или достаточно частом измерении и регистрации их значений в ходе испытаний или эксплуатации двигателя и умении извлечь диагностическую информацию открывается возможность обнаружить ряд неисправностей в ранней стадии их развития, проследить историю их развития и прогнозировать дальнейшие тенденции. Рассматривая методы обработки исходной информации в целях составления и применения алгоритмов параметри-

ческой диагностики, можно выделить два основных подхода к такой обработке.

Первый из них состоит в том, что измеренные значения параметров диагностируемого двигателя сразу же сравниваются со значениями тех же параметров, измеренных ранее на том же двигателе (или на таком же исправном двигателе) и в том же режиме. В результате сравнения вычисляются отклонения измеряемых параметров, и все дальнейшие операции диагностики с привлечением соответствующих моделей, алгоритмов и т. д. проводятся лишь с указанными отклонениями. Состояние двигателя определяется по разности между эталонными значениями параметров и результатам измерений, а также на основе анализа тенденций изменений параметров по наработке. Недостатком данного метода параметрического диагностирования является то, что при анализе и прогнозировании изменения диагностического признака по наработке двигателя невозможно определить причину тренда (локализовать неисправность) и не учитывается возможный характер дефекта.

Второй подход состоит в том, что по измеренным на диагностируемом двигателе значениям параметров вычисляются с помощью математической модели двигателя значения других, не измеряемых непосредственно параметров состояния элементов двигателя. Эти методы диагностирования основываются на современных достижениях в области математического моделирования рабочих процессов ГТД.

Возможность диагностирования состояния двигателя по отклонениям его термогазодинамических параметров основывается на том фак-

те, что появление какого-либо дефекта в газоз-воздушном тракте связано с изменением геометрических размеров тех или иных деталей, которое приводит к изменению характеристик узлов двигателя и его термогазодинамических параметров.

Эффективность данных методов параметрического диагностирования зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- уровень сложности и адекватности математической модели двигателя;
- конструктивная схема двигателя;
- количество и номенклатура контролируемых параметров;
- точность контроля параметров;
- режим диагностирования;
- вид дефекта и степень его развития.

Исследование, проведенное в работах [3, 4], показало, что в условиях ограниченного объема исходной информации (что характерно для условий эксплуатации) данные методы обладают низкой эффективностью при параметрическом диагностировании состояния авиационных ГТД.

Ограниченность исходной информации в данном случае обусловлена следующим:

- малым числом контролируемых на двигателе диагностических параметров;
- низкой точностью регистрации контролируемых параметров;
- недостаточной информативностью контролируемых параметров.

Авторами предлагается метод диагностирования, позволяющий повысить вероятность распознавания состояния ГТД за счет оптимального выбора перечня контролируемых параметров, режима диагностирования и метода идентификации математической модели двигателя.

В качестве методов идентификации рассматриваются:

- метод диагностических матриц (метод А);
- диагностирование, основанное на решении системы нормальных уравнений (метод Б);
- диагностирование, основанное на нелинейной оптимизации критерия, характеризующего технического состояние двигателя (метод В);
- метод уравнивания по квадратичной целевой функции (метод Г);
- метод уравнивания по модульной целевой функции (метод Д);
- модифицированный метод диагностических матриц (метод Е).

Моделью является детерминированная много-режимная математическая модель рабочих процессов двигателя второго уровня сложности.

Факт наличия и уровень развития неисправности(ей) в узле(ах) двигателя определяется по значениям отклонений параметров состояния от исходных значений, соответствующих исправному состоянию двигателя.

В отличие от существующих методов, формирование перечня контролируемых параметров проводится дифференцированно для каждого параметра состояния с учетом:

- информативности и точности регистрации контролируемых параметров;
- числа контролируемых параметров;
- критерия обусловленности решаемой системы уравнений;
- режима диагностирования.

В качестве исходной информации при реализации методики используются результаты опробования двигателя, а также априорные данные, необходимые для формирования математической модели двигателя и выбора перечня идентифицируемых параметров.

Общая структура методики приведена в виде блок-схемы на рис. 1.

1. На первом этапе проводится анализ априорной информации по рассматриваемому двигателю, включая:

- описание конструктивной схемы двигателя, программ регулирования и режимов работы с учетом особенностей эксплуатации на данном воздушном судне;

• перечень контролируемых на двигателе диагностических параметров $G_P = [P_1, \dots, P_k]^T$, способы и точность их регистрации $\sigma(P_j)$;

• значения параметров состояния $X^{\text{испр}} = [x_1, \dots, x_n]^T$ и контролируемых параметров $G_P^{\text{испр.}} = [P_1, \dots, P_k]^T$, соответствующих исправному состоянию двигателя;

• задаются диапазоны возможных значений контролируемых параметров ($\min P_j \leq P_j \leq \max P_j$) и параметров, характеризующих режим работы двигателя ($\min r_i \leq r_i \leq \max r_i$);

• задаются диапазоны возможных значений параметров состояния двигателя $\min x_i \leq x_i \leq \max x_i$.

2. На втором этапе формируется математическая модель двигателя:

2.1. В общем виде, детерминированная математическая модель второго уровня сложности представляет собой систему трансцендентных уравнений, которая может быть записана следующим образом:

$$F_j = (P_j, x_i, R_\xi) = 0,$$

где $J = \overline{1, k}$, k – число уравнений в системе; P_j – контролируемые параметры (признаки); $j = \overline{1, m}$, m – число контролируемых параметров; x_i – параметры состояния узлов газозвдушного тракта; $i = \overline{1, n}$, n – число параметров состояния; R_ξ – параметры, определяющие режим работы

двигателя и внешние условия; $\xi = \overline{1, r}$, r – число параметров, определяющих режим работы и внешние условия.

Параметрам состояния узлов двигателя присваиваются значения, соответствующие исправному состоянию: $X = X_{испр}$.

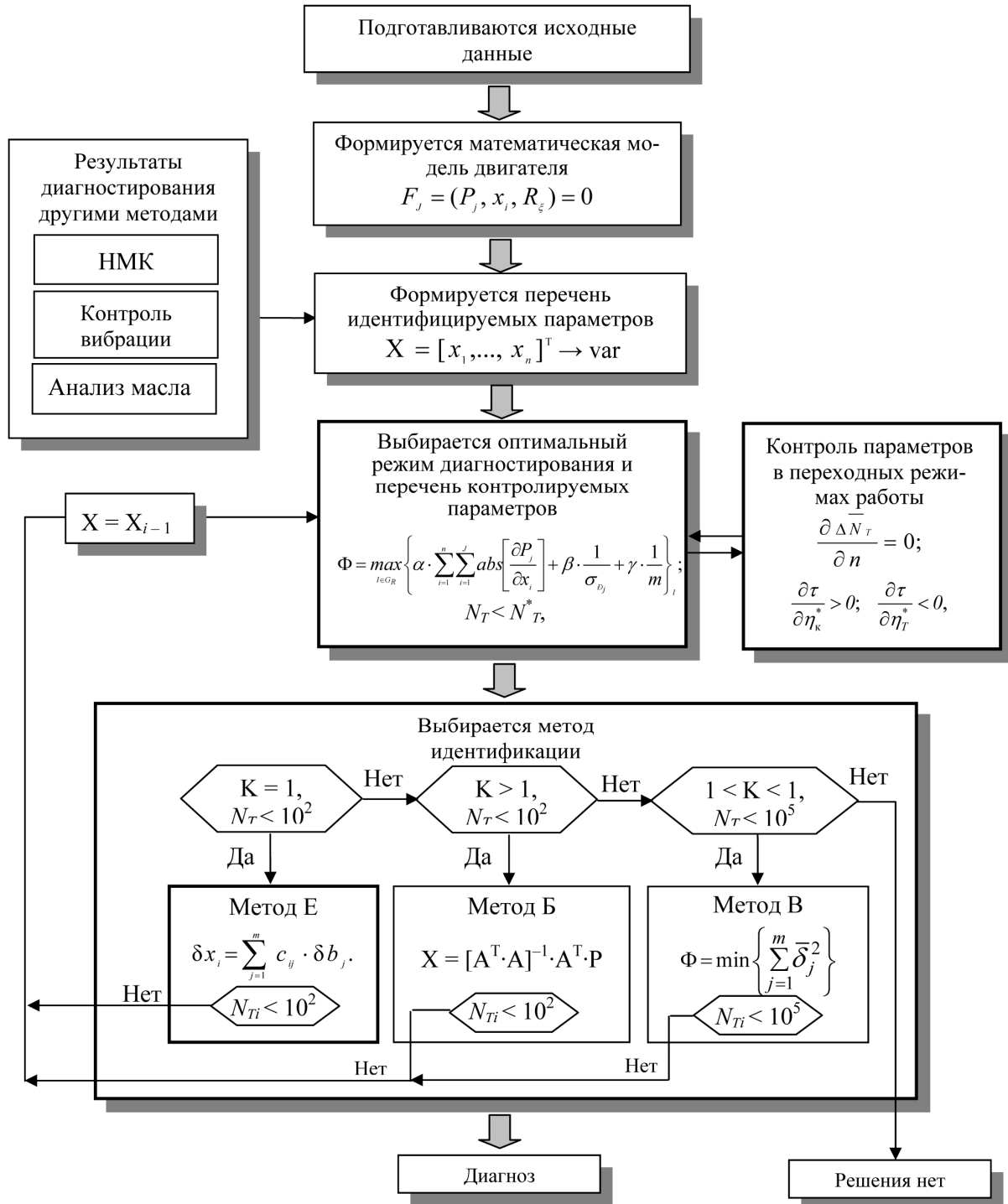


Рис. 1. Блок-схема выбора оптимальных режимов диагностирования, перечня контролируемых параметров и метода идентификации: НМК – неразрушающие методы контроля

Задаются характеристики компрессоров $\pi_k^* = f(G_{\text{в пр}}, n_{\text{пр}})$; $\eta_k^* = f(G_{\text{в пр}}, n_{\text{пр}})$ и турбин $\pi_T^* = f(G_{\text{э пр}}, n_{\text{пр}})$; $\eta_T^* = f(G_{\text{э пр}}, n_{\text{пр}})$ в виде аппроксимирующих полиномов.

Задается программа регулирования: $n = \text{const}$, $G_T = \text{const}$, $p_k^* \leq p_{k \text{ max}}^*$, $T_T^* \leq T_{T \text{ max}}^*$ и т. д. Математическая модель должна обеспечивать возможность учета работы топливорегулирующей аппаратуры двигателя:

- изменение программы регулирования двигателя в зависимости от атмосферных условий и режима работы;

- воздействие на работу двигателя систем, обеспечивающих его газодинамическую устойчивость: перекладка лопаток направляющего аппарата, срабатывание клапанов перепуска воздуха и т. д.;

- воздействие на работу двигателя систем, ограничивающих максимальные значения его параметров: ограничитель максимального давления воздуха за компрессором, всережимный предельный регулятор температуры газов за турбиной и т. д.

2.2. Производится расчет по математической модели. Результаты расчета должны соответствовать формулярным данным двигателя с допуском равным статистическому разбросу параметров.

3. На третьем этапе проводится формирование перечня идентифицируемых параметров $X = [x_1, \dots, x_n]^T$ с учетом:

- показаний применяемых на двигателе непараметрических методов диагностирования: физических, вибрационных, анализа масла и др.;

- результатов последнего опробования двигателя: наличия признаков неисправностей в виде отклонений контролируемых параметров.

Выбранный перечень идентифицируемых параметров должен включать в себя параметры, характеризующие состояние узлов двигателя, которые могут являться дефектными.

В качестве параметров состояния узлов двигателя используются: коэффициент восстановления полного давления; степень повышения (понижения) давления; коэффициент полноты сгорания; площадь соплового аппарата и сопла; коэффициент изменения массового расхода в сопле μ_c ; коэффициент скорости реактивного сопла φ_c ; механический коэффициент полезного действия.

4. На четвертом этапе проводится выбор режима диагностирования и перечня контролируемых параметров для перечня идентифици-

руемых параметров, определенного на этапе 3. Выбор перечня контролируемых параметров и режима(ов) работы двигателя проводится с учетом:

- коэффициентов влияния $\frac{\partial P_j}{\partial x_i}$, характери-

зующих информативность выбираемых для диагностирования параметров (K_{bi} , $i = \overline{1, n}$);

- погрешности контроля параметров ГТУ $\sigma(P_j)$;

- числа параметров m , используемых для идентификации;

- показателя обусловленности N_T решаемой системы уравнений.

Данные показатели по-разному влияют на эффективность режима диагностирования, включая случаи, когда один показатель противоречит другому. Поэтому окончательное решение носит характер компромиссного. Область компромиссных решений можно получить проведением многократной оптимизации указанных показателей при разных значениях весовых коэффициентов α , β и γ с применением функционала вида:

$$\Phi = \max \left\{ \alpha \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J \text{abs} \left[\frac{\partial P_j}{\partial x_i} \right] + \beta \frac{1}{\sigma_{P_j}} + \gamma \frac{1}{m} \right\}_i; \quad (1)$$

$$N_T < N_T^*; \quad \alpha + \beta + \gamma = 1,$$

где α , β , γ – весовые коэффициенты, характеризующие значимость показателей эффективности; n – число идентифицируемых параметров; J – число параметров, выбранных для x_i -го параметра состояния; где N_T^* – критическое значение обусловленности, индивидуальное для метода идентификации M_i .

Окончательный выбор коэффициентов α , β , γ проводится из условия максимальной вероятности распознавания технического состояния ГТД.

Для группы режимов $Q_R = [R_1, \dots, R_k]^T$ из множества режимов $G_R = [R_1, \dots, R_\xi]^T$ формируются оптимальные перечни контролируемых параметров путем реализации функционала (1).

Выбор группы режимов $Q_R = [R_1, \dots, R_k]^T$ осуществляется варьированием режимом работы двигателя во всем диапазоне множества $G_R = [R_1, \dots, R_\xi]^T$ с шагом, обеспечивающим возможность контроля тенденций изменения критериев информативности и обусловленности.

Из группы режимов $Q_R = [R_1, \dots, R_\xi]^T$ выбирается оптимальный режим диагностирования $R_\xi = [r_1, \dots, r_k]^T$, соответствующий максимуму

функционала (1). В качестве оптимального принимается перечень контролируемых параметров $Q_p = [P_1, \dots, P_m]^T = \text{opt}$, соответствующий оптимальному режиму диагностирования $R_\xi = [r_1, \dots, r_k]^T = \text{opt}$.

Проводится опробование двигателя на оптимальном режиме диагностирования с регистрацией оптимального перечня контролируемых параметров. Результаты замеров проверяются на соответствие диапазонам возможных значений контролируемых и режимных параметров, заданных на первом этапе.

5. На пятом этапе проводится выбор метода диагностирования. Исследования, проведенные в работах [3, 4], показали, что наиболее эффективными являются методы диагностирования Б, В и Е. Поэтому выбор осуществляется из этих трех методов диагностирования с учетом соотношения числа контролируемых и идентифицируемых параметров двигателя $K = m/n$ и значения критерия обусловленности N_T . Совмещенная оценка параметров состояния несколькими методами идентификации в каждом конкретном случае позволяет получить наилучший результат в оценке состояния за счет применения наиболее эффективного метода.

5.1. Если $K = \frac{m}{n} = 1$ и $N_T \leq 10^2$, диагностирование проводится модифицированным методом диагностических матриц (метод Е) в следующей последовательности:

5.1.1) производится численная линеаризация математической модели двигателя методом однофакторного эксперимента;

5.1.2) рассчитываются относительные отклонения для оптимального перечня контролируемых параметров и режима диагностирования:

$$\delta \bar{b}_j = \frac{P_j - P_j^o}{P_j^o}; \quad j = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где P_j^o – значения контролируемых параметров, соответствующие исправному состоянию двигателя, рассчитанные по математической модели на оптимальном режиме работы.

5.1.3) Формируется диагностическая матрица двигателя [С] путем умножения обращенной линейной матрицы [А] на матрицу коэффициентов контролируемых параметров [В] по формуле:

$$[C] = [A]^{-1} \times [B]; \quad (3)$$

5.1.4) определяются поправки к идентифицируемым параметрам по формуле:

$$\delta x_i = \sum_{j=1}^m c_{ij} \cdot \delta \bar{b}_j; \quad (4)$$

5.1.5) вносятся изменения в математическую модель двигателя. Идентифицируемым параметрам состояния узлов двигателя присваиваются новые значения соответствующие найденным поправкам:

$$x_i = x_i^{\text{исп.}} + \delta x_i. \quad (5)$$

5.1.6) расчет повторяется с п. 5.1.1 до тех пор, пока в процессе последовательных приближений происходит уменьшение суммарной величины относительных отклонений (невязок) контролируемых параметров:

$$\left(\sum_{j=1}^m \delta \bar{b}_j \right)_{N-1} - \left(\sum_{j=1}^m \delta \bar{b}_j \right)_N \leq 0,1 \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

где N – номер приближения.

5.1.7) В процессе последовательных приближений происходит изменение коэффициентов влияния линейной системы уравнений, что может привести к ее плохой обусловленности. Поэтому в каждом приближении производится оценка критерия обусловленности и проверка выполнения условия $N_T < 10^2$. Если условие не выполняется, то идентифицируемым параметрам присваиваются значения поправок, определенные в предыдущем приближении и для измененной модели двигателя повторяется процедура выбора режима диагностирования, и перечня контролируемых параметров с п. 4.1, а затем процедура выбора метода идентификации с п. 5.1.

5.1.8) Проводится локализация дефектов по значениям отклонений параметров состояния узлов двигателя от исходных значений, соответствующих исправному состоянию.

Если $K > 1$ и $N_T \leq 10^2$, идентификация проводится методом Б, основанным на решении системы нормальных уравнений [1]. Производится локализация дефектов по значениям отклонений параметров состояния узлов двигателя от исходных значений соответствующих исправному состоянию.

Если $1 < K < 1$ и $N_T \leq 10^5$, идентификация проводится методом В, основанным на нелинейной оптимизации критерия, характеризующего техническое состояние двигателя. Определяются значения идентифицируемых параметров состояния двигателя путем реализации функционала вида:

$$\Phi = \min \left\{ \sum_{j=1}^m \frac{1}{p_j^3(X)} [p_j^p(X) - p_j^3(X)]^2 \right\}. \quad (7)$$

5.3.2. Для новых значений идентифицируемых параметров производится оценка критерия обусловленности и проверка выполнения условия $N_T < 10^5$. Если условие не выполняется, то повторяется процедура выбора режима диагностирования и перечня контролируемых параметров начиная с п. 4.1., а затем процедура выбора метода идентификации с п. 5.1.

Исследование влияния режима работы, числа и номенклатуры контролируемых параметров на вероятность распознавания состояния двигателя, проведенное на примере одновального газотурбинного двигателя с отбором воздуха за компрессором, показало следующее.

Для перечня варьируемых параметров ($\sigma_{\text{вх}}$, η_k^* , σ_{kc} , η_T^* , μ_c) и режима работы ($G_{\text{отб}} = 1,35$ кг/с) наиболее информативными для идентификации состояния являются расход топлива G_T и температура газа за турбиной T_T^* .

В условиях погрешности контролируемых параметров исключение из рассмотрения слабоинформативных параметров позволяет повысить точность диагностирования. Например, результаты идентификации, полученные при $\pm 3\sigma(G_T, T_T^*, T_k^*) = 1,5\%$, показывают, что максимальная вероятность распознавания состояния входного устройства ГТД обеспечивается при идентификации по параметру T_T^* , а совместное использование всех трех параметров (G_T, T_T^*, T_k^*) снижает достоверность диагностирования в 1,15 раза.

Очевидно, что при одинаковой информативности параметров, используемых для идентификации, диагностически наиболее ценным является параметр с меньшей погрешностью контроля. Максимальная вероятность распознавания состояния входного устройства ($\text{Вер}(\sigma_{\text{вх}}) = 1,0$) обеспечивается при повышении точности контроля наиболее информативного диагностического параметра T_T^* с $\sigma(T_T^*) = 1,5$ до $\sigma(T_T^*) = 0$, в то время как повышение точности контроля слабоинформативных параметров G_T и T_k^* , не дает никакого эффекта. Аналогичная ситуация наблюдается и при диагностировании состояния турбины ГТД.

Это объясняется тем, что идентификация, основанная на минимизации «невязок» между фактическими и расчетными значениями кон-

тролируемых параметров, проводится, в первую очередь, по наиболее информативным параметрам, наиболее сильно реагирующим на неисправности ГТД.

Таким образом, повысить вероятность распознавания состояния ГТД при наличии погрешности контроля параметров возможно как исключением при идентификации состояния слабоинформативных параметров, так и повышением точности контроля наиболее информативных параметров. Например, при оценке состояния турбины ГТД вероятность распознавания повышается с 0,68 до 1,0. Необходимо отметить, что уменьшение числа контролируемых параметров оправдано только в том случае, если это не приводит к ухудшению обусловленности системы нормальных уравнений, решением которой проводится оценка параметров состояния. Следовательно, формирование перечня параметров необходимо проводить с учетом показателя обусловленности решаемой системы уравнений.

Повышению вероятности распознавания состояния ГТД способствует также выбор режима работы ГТД, на котором проводится идентификация состояния. Для рассматриваемого ГТД изменение его режима работы (уменьшением отбора воздуха за компрессором с 1,35 кг/с до 0,8 кг/с) позволяет:

- в 7 раз повысить информативность расхода топлива при диагностике состояния входного устройства;
- в 1,4 раза повысить информативность температуры газа за турбиной при диагностике состояния турбины T_T^* ;
- в 1,2 раза повысить информативность расхода топлива при диагностике состояния турбины.

При диагностике состояния входного устройства изменение режима с $G_{\text{отб}} = 1,35$ кг/с до $G_{\text{отб}} = 0,8$ кг/с позволяет в 2,6 раза повысить вероятность его распознавания.

При неизменном перечне идентифицируемых и контролируемых параметров ГТД обусловленность решаемой системы уравнений можно менять выбором режима диагностирования. Диагностирование входного устройства и турбины ГТД на различных режимах работы показало, что изменение режима работы двигателя (от $G_{\text{отб}} = 0,8$ кг/с до $G_{\text{отб}} = 1,35$ кг/с) позволяет уменьшить погрешность оценки $\sigma_{\text{вх}}$ с 5% до 0,08%, а η_T^* – с 3% до 0,06%.

Выбор оптимального перечня контролируемых параметров проводился для шести различ-

ных режимов работы двигателя, задаваемых расходом отбираемого воздуха. В таблице приведены значения функционала (1) и соответствующие им оптимальные перечни контролируемых параметров.

Из таблицы видно, что оптимальным является режим, соответствующий $G_{отб} = 0,8$ кг/с (отбор воздуха выключен), при котором функционал (1) принимает максимальное значение. Минимальное значение критерия обусловленности системы уравнений также соответствует режиму работы $G_{отб} = 0,8$ кг/с.

Изменение режима работы двигателя путем выключения отбора воздуха позволяет в среднем на 5% повысить информативность контролируемых параметров.

Режим работы $G_{отб}$, кг/с	Значение целевого функционала Φ	Оптимальный перечень контролируемых параметров	Критерий обусловленности N_T
1,35	1,72	G_T, T_G^*, p_k^*	194
1,2	1,73	G_T, T_G^*, p_k^*	174
1,1	1,74	G_T, T_G^*, p_k^*	164
1,0	1,76	G_T, T_G^*, p_k^*	154
0,9	1,79	G_T, T_G^*, p_k^*	143
0,8	1,82	G_T, T_G^*, p_k^*	138

В соответствии с условиями по соотношению числа контролируемых и идентифицируемых параметров $K > 1$ и значению критерия обусловленности $N_T \leq 10^5$ в качестве метода диагностирования выбирается метод, основанный на нелинейной оптимизации критерия состояния двигателя (метод В).

Оценка достоверности диагностирования проводится путем определения вероятности правильного распознавания состояния двигателя. Для i -го узла двигателя:

$$P(\alpha \leq x_i \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2} dx. \quad (8)$$

Вычисление данного интеграла проводится по методике, изложенной в [6]:

$$P(\alpha < x < \beta) = \frac{1}{2} \Phi(u_2) - \frac{1}{2} \Phi(u_1), \quad (9)$$

где α и β – пределы интегрирования, определяемые рассеянием параметров состояния x_i , обусловленным ошибкой расчета по модели;

$\Phi(u)$ – функция Лапласа, где $u_1 = \frac{\alpha - \bar{x}}{\sigma(x_i)}$,

$u_2 = \frac{\beta - \bar{x}}{\sigma(x_i)}$; \bar{x} – математическое ожидание идентифицируемого параметра; $\sigma(x_i)$ – среднеквадратичное отклонение идентифицируемого параметра, обусловленное погрешностями контролируемых параметров.

Вероятность распознавания состояния двигателя принимается максимальной, если отклонение идентифицированного значения параметра состояния от истинного не превышает граничного значения.

Для определения достоверности распознавания состояния двигателя в целом использовался обобщенный критерий в виде произведения вероятностей:

$$P_n = \prod_{i=1}^n P(x_i). \quad (10)$$

В рассматриваемом примере вероятность достоверного диагностирования компрессора:

$$P(\eta_k^*) = \int_{0,775}^{0,785} \frac{1}{0,0033\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(\eta_k^* - 0,78)^2}{2 \cdot 0,0033^2} dx = 0,87.$$

Вероятность достоверного диагностирования камеры сгорания:

$$P(\sigma_{kc}) = \int_{0,965}^{0,975} \frac{1}{0,0031\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(\sigma_{kc} - 0,97)^2}{2 \cdot 0,0031^2} dx = 0,89.$$

Вероятность достоверного диагностирования турбины:

$$P(\eta_T^*) = \int_{0,795}^{0,805} \frac{1}{0,0005\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(\eta_T^* - 0,8)^2}{2 \cdot 0,0005^2} dx = 0,999.$$

Общая вероятность достоверного диагностирования двигателя в целом:

$$P_n = \prod_{i=1}^n P(x_i) = 0,87 \cdot 0,89 \cdot 0,999 = 0,773.$$

Для сравнительного анализа эффективности рассмотренной методики выбора режима диагностирования, перечня контролируемых параметров и метода идентификации был проведен выбор перечня контролируемых параметров по методике, приведенной в работе [5]. В качестве наиболее диагностически ценных были выбраны контролируемые параметры: G_T, T_G^* и T_T^* .

В качестве метода идентификации использовался метод В, поскольку методы Б и Е имели

в данном случае нулевую эффективность по причине критической обусловленности системы уравнений ($N_T = 250$).

В данном случае вероятности достоверного диагностирования узлов двигателя распределились следующим образом:

$$P(\eta_k^*) = \int_{0,775}^{0,785} \frac{1}{0,0033\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(\eta_k^* - 0,78)^2}{2 \cdot 0,0033^2} dx = 0,87;$$

$$P(\sigma_{kc}) = \int_{0,965}^{0,975} \frac{1}{0,0098\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(\sigma_{kc} - 0,97)^2}{2 \cdot 0,0098^2} dx = 0,39;$$

$$P(\eta_T^*) = \int_{0,795}^{0,805} \frac{1}{0,0005\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(\eta_T^* - 0,8)^2}{2 \cdot 0,0005^2} dx = 0,999.$$

Вероятность достоверного диагностирования двигателя в целом:

$$P_n = \prod_{i=1}^n P(x_i) = 0,87 \cdot 0,39 \cdot 0,999 = 0,338,$$

то есть для рассматриваемого случая представилось возможным в 2,3 раза повысить вероятность достоверного диагностирования состояния двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ахмедзянов, А. М.** Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам / А. М. Ахмедзянов, Н. Г. Дубравский, А. П. Тунаков. М. : Машиностроение, 1983. 206 с.
2. **Адгамов, Р. И.** Обработка и анализ информации при автоматизированных испытаниях ГТД / Р. И. Адгамов, В. О. Боровик [и др.]. М. : Машиностроение, 1987. 216 с.
3. **Гишваров, А. С.** Математическое моделирование рабочих процессов газотурбинных энергетических установок / А. С. Гишваров, И. В. Приб, В. С. Жернаков // Машиноведение, конструкционные материалы и технологии : сб. науч. тр. Уфа : Гилем, 2002. С. 212–229.
4. **Гишваров, А. С.** Эффективность методов параметрической оценки технического состояния двигателей на основе термогазодинамических моделей / А. С. Гишваров, И. В. Приб // Сб. тр. СГАУ, 2002. С. 74–79.
5. **Юлдыбаев, Л. Х.** Метод определения диагностической ценности признаков состояния ГТД / Л. Х. Юлдыбаев, Х. С. Гумеров, А. М. Ахмедзянов // Испытания авиационных двигателей. Уфа, УАИ, 1978. № 6. С. 46–50.
6. **Калинина, В. Н.** Математическая статистика / В. Н. Калинина, В. Ф. Панкин. М. : Высш. шк., 1998. 336 с.

ОБ АВТОРАХ



Гишваров Анас Саидович, проф., зав. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1993). Теорет. и эксперим. иссл. в обл. надежности, ресурса и испытаний техн. систем.



Приб Игорь Владимирович, аспирант каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УГАТУ, 2001).