УДК 629.735.083.03 (045)

Казак В. Н., д-р техн. наук,
Бельская А. А.

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ГТУ

Аэрокосмический інститут
Национального авиационного университета

Предложена методика организации технического обслуживания ГТУ по состоянию, основанная на непрерывном контроле определяющих параметров, полной их статистической обработке и прогнозировании значений этих параметров на последующий период эксплуатации. Переход от стратегии технического обслуживания по наработке к стратегии технического обслуживания по состоянию позволит уменьшить материальные затраты на эксплуатацию ГТУ и повысить стабильность значений выходных показателей эффективности ГТУ.

Введение

Переход от традиционной системы планово-предупредительных ремонтов к эксплуатации газотурбинных установок (ГТУ) по техническому состоянию позволяет уменьшить вероятность отказов и тем самым повысить безопасность функционирования, увеличить ресурс ГТУ до ремонта, а следовательно сократить общие затраты на ремонт в течение всего срока эксплуатации, уменьшить потребность в запасных частях и повысить качество ремонта, повысить стабильность значений выходных показателей эффективности ГТУ.

Анализ существующих систем и средств эксплуатации по состоянию [1 - 3] подтверждает необходимость в первую очередь обеспечения непрерывного контроля определяющих параметров (ОП), характеризующих техническое состояние объекта, и прогнозирование значений этих параметров на некоторый период времени.

ОП и упреждающие допуски для них назначаются разработчиком изделия и указываются в плане технического обслуживания и ремонта, который прилагается к изделию.

В настоящей статье в качестве ОП, характеризующих техническое состояние ГТУ, предлагается использовать параметры (коэффициенты усиления и постоянные времени) линейной динамической модели ГТУ [4]. В связи с этим возникает необходимость построения адаптивной системы непрерывного мониторинга ОП, статистической обработки результатов наблюдения и прогнозирования значений

ОП на некоторый интервал прогнозирования. Решению этих задач и посвящена настоящая статья.

Линейные динамические модели ГТУ

Характерной особенностью математических моделей ГТУ, устанавливающих зависимости между параметрами проточной части (давления и температуры рабочего тела, частоты вращения роторов, расход топливного газа и др.) является превышение размерности вектора выходных (регулируемых) параметров по отношению к размерности вектора входных (регулирующих) параметров [4]. В частности, для упрощенной модели ГТУ, регулирующими параметрами являются расход топливного газа, угол установки направляющих аппаратов компрессора, площадь сечения выходного сопла, а координатами выходного вектора являются частоты вращения валов, температуры и давления рабочего тела в различных сечениях. Относительный расход топливного газа, как обязательная координата входного вектора, в отличие от остальных параметров проточной части, как правило, измеряется косвенными методами [5], что ограничивает достижение необходимой точности его измерения. Поэтому при выборе метода идентификации ОП предпочтение следует отдать такому из них, который либо вообще не использует информацию о текущем значении относительного расхода топливного газа, либо использует эту информацию частично. В альтернативной форме представления линейная динамическая модель (ЛДМ) ГТУ имеет вид [6]

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{T}_x\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_x\mathbf{U}, \\ \mathbf{Z} &= \mathbf{T}_z\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_z\mathbf{U}, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\mathbf{X} = (x_1, ..., x_s)^T$ – координаты выходного вектора, относительно которых могут быть составлены дифференциальные уравнения, $\mathbf{Z} = (z_1, ..., z_{n-s})^T$ – остальные координаты выходного вектора, $\mathbf{U} = (u_1, ..., u_m)^T$ – вектор управления, $\mathbf{T}_x$ – обобщенная постоянная времени по вектору $\mathbf{X}$, $\mathbf{T}_z$ – обобщенная постоянная времени по вектору $\mathbf{Z}$, $\mathbf{K}_x$ – матрица коэффициентов усиления по вектору $\mathbf{X}$, $\mathbf{K}_z$ – матрица коэффициентов усиления по вектору $\mathbf{Z}$. Обозначим $\mathbf{Y} = (x_1, ..., x_s, z_1, ..., z_{n-s})^T = (y_1, ..., y_n)^T$ и перейдем в область изображений по Лапласу. Тогда

$$\mathbf{Y}(p) = \mathbf{W}(p)\mathbf{U}(p), \qquad (2)$$

где $\mathbf{U}(p)$ – изображение по Лапласу m-мерного входного вектора $\mathbf{U}(t)$, $\mathbf{Y}(p)$ – изображение по Лапласу n-мерного выходного вектора $\mathbf{Y}(t)$ ($\mathbf{Y}(0)=0$), причем $m < n$, $\mathbf{W}(p)$ – матрица передаточных функций размера $n \times m$ и $rang\mathbf{W}(p) = m$.

Из соотношений (1) следует, что матрица передаточных функций $\mathbf{W}(p)$ распадается на две подматрицы $\mathbf{W}_1(p)$ и $\mathbf{W}_2(p)$, причем

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(p) &= \mathbf{W}_1(p)\mathbf{U}(p), \\ \mathbf{Z}(p) &= \mathbf{W}_2(p)\mathbf{U}(p). \end{aligned} \qquad (3)$$

Очевидно, что

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_1(p) &= (\mathbf{E} - p\mathbf{T}_x)^{-1}\mathbf{K}_x, \\ \mathbf{W}_2(p) &= p\mathbf{T}_z\mathbf{W}_1(p) + \mathbf{K}_z. \end{aligned} \qquad (4)$$

Соотношения (4) показывают, что каждый элемент матрицы $\mathbf{W}(p)$ – это дробно-рациональная функция относительно переменной p, степень числителя которой не превышает степень знаменателя, а коэффициенты при степенях p выражаются через элементы матриц $\mathbf{T}_x$, $\mathbf{T}_z$, $\mathbf{K}_x$, $\mathbf{K}_z$. Это дает основание в качестве ОП, характеризующих техническое состояние ГТУ, рассматривать коэффициенты усиления и постоянные времени передаточных функций, образующих матрицу $\mathbf{W}(p)$.

На рис. 1 представлена структурная схема адаптивной системы непрерывного мониторинга определяющих параметров, позволяющая осуществлять непрерывный контроль этих параметров.

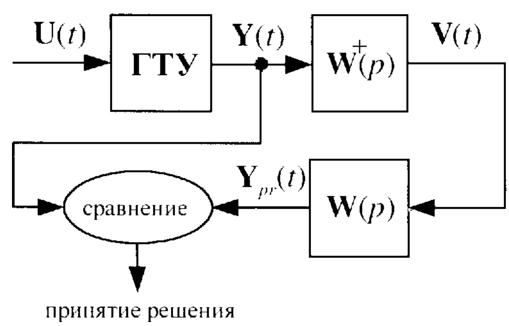

Рис. 1. Структурная схема оценки текущего технического состояния ГТУ

В структурной схеме на рис. 1:

$$\mathbf{W}^{+}(p) = (\mathbf{W}^T(p)\mathbf{W}(p))^{-1}\mathbf{W}^T(p). \qquad (5)$$

Так как $\mathbf{W}(p)$ есть матрица полного ранга, то $\mathbf{W}^{+}(p)$ может быть условно названа псевдообратной матрицей передаточных функций по отношению к $\mathbf{W}(p)$ [7].

Если ЛДМ, определяемая матрицей передаточных функций $\mathbf{W}(p)$, соответствует текущему техническому состоянию ГТУ, то без учета ошибок моделирования и измерения, должно иметь место совпадение выходного вектора управляемых параметров ГТУ $\mathbf{Y}(t)$ и выходного вектора модели $\mathbf{Y}_{pr}(t)$ в каждый момент времени t [8]. Если же в некоторый момент времени t_1 $\mathbf{Y}(t_1) \neq \mathbf{Y}_{pr}(t_1)$, то это свидетельствует о том, что некоторые параметры матрицы передаточных функций $\mathbf{W}(p)$ не соответствуют реальному техническому состоянию ГТУ в этот момент.

Существенным преимуществом предлагаемой схемы является то, что вывод об адекватности модели объекту можно сделать при полном отсутствии информации о координатах входного вектора, в том числе и об относительном расходе топливного газа, и без какого-либо вмешательства в штатный режим работы ГТУ.

Для того чтобы учесть ошибки моделирования и измерения выходного вектора рассмотрим $\mathbf{Q}(p)$=$\mathbf{W}(p)\mathbf{W}^{+}(p)$. Матрица $\mathbf{Q}(p)$ является матрицей передаточных функций синтезированной системы непрерывного контроля ОП и имеет размер $n \times n$. Нетрудно показать, что при любом p $\mathbf{Q}^2(p)$=$\mathbf{Q}(p)$ и $\mathbf{Q}^T(p)$=$\mathbf{Q}(p)$, т. е. матрица $\mathbf{Q}(p)$ является симметричной матрицей, соответствующей оператору проектирования в евклидовом пространстве размерности n на m - мерную гиперплоскость. Более того, при $p=0$ $\mathbf{Q}(0)$ является матрицей оператора ортогонального проектирования и, следовательно, евклидова норма $\|\mathbf{Q}(0)\| = 1$. Каждый элемент этой матрицы есть дробно-рациональная функция относительно переменной p, степень числителя которой не превосходит степени знаменателя. Пусть $\mathbf{H}(t)$ – это матрица импульсных переходных функций, соответствующая матрице передаточных функций $\mathbf{Q}(p)$.

Обозначим $\Theta = \int\limits_0^{\infty} \|\mathbf{H}(\tau)\| d\tau$. Тогда, если ε_0 есть суммарная ошибка моделирования и измерения, то несоответствие некоторых параметров ЛДМ реальному техническому состоянию ГТУ в момент времени t_1 будет определяться выполнением неравенства

$$\left\|\mathbf{Y}(t_1) - \mathbf{Y}_{pr}(t_1)\right\| > (1+\Theta)\varepsilon_0. \qquad (6)$$

Для установившегося режима в соотношении (6) $\Theta = 1$, поэтому условие, определяющее необходимость идентификации и последующей корректировки параметров ЛДМ принимает вид

$$\left\|\mathbf{Y}(t_1) - \mathbf{Y}_{pr}(t_1)\right\| > 2\varepsilon_0. \qquad (7)$$

Методы параметрической идентификации ЛДМ рассматриваются в [9].

На рисунке 2 представлена структурная схема идентификации параметров ЛДМ по методу обучающейся модели

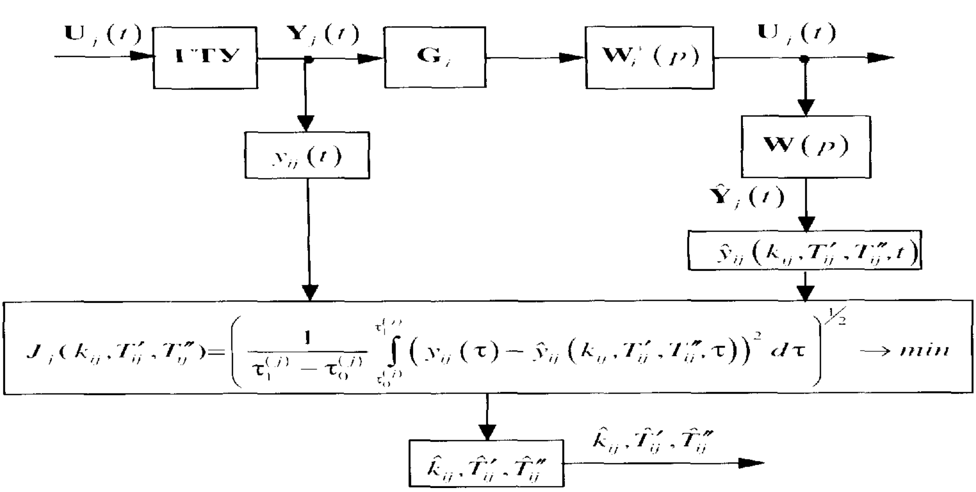

Рис. 2. Структурная схема идентификации параметров передаточных функций, образующих i-тую строку матрицы $\mathbf{W}(p)$

В структурной схеме на рис. 2:

$\mathbf{U}_j(t)$, $j=\overline{1,m}$ – штатное значение управляющего вектора, отличающееся от $\mathbf{U}(t)$ значением только j- той координаты, $\mathbf{U}_j(t)=\left(u_1,...,u_j+\Delta u_j,...,u_m\right)^T$; $\mathbf{G}_i$ – это матрица размера $n\times n$, отличающаяся от соответствующей единичной матрицы тем, что в i- той строке (i-том столбце) вместо единицы стоит нуль;

$$\mathbf{W}_i^+(p)=(\mathbf{W}^T(p)\mathbf{G}_i\mathbf{W}(p))^{-1}\mathbf{W}^T(p)\mathbf{G}_i;$$

k_{ij},T'_{ij},T''_{ij} – идентифицируемые параметры передаточной функции

$$w_{ij}(p)=\frac{k_{ij}(T''_{ij}\,p+1)}{T'_{ij}\,p+1}.$$

Следует отметить, что в отличие от традиционного использования метода обучающейся модели, предполагающего подачу известных пробных воздействий на вход объекта и модели с последующим сравнением их реакций, процедура представленная на рис. 2 не требует информации о пробных воздействиях.

Состоятельные и несмещенные точечные оценки идентифицируемых параметров передаточных функций, входящих в матрицу $\mathbf{W}(p)$, могут быть получены стандартными методами математической статистики [10]. Надежность, полученных значений идентифицируемых параметров передаточных функций стоящих в i- той строке матрицы передаточных функций повышается с увеличением объема выборки, по которой проводится их оценивание. В случае нормального закона распределения оцениваемых параметров задаваясь значением доверительной вероятности и величиной доверительного интервала можно получить объем выборки, обеспечивающий заданную надежность результатов оценки. Полная статистическая обработка результатов идентификации определяющих параметров, характеризующих техническое состояние ГТУ, не содержит существенных отличий от общепринятой, и поэтому в настоящей статье не приводится.

После замены параметров передаточных функций, образующих i - тую строку матрицы на вновь вычисленные оценки $\tilde{k}_{ij},\tilde{T}'_{ij},\tilde{T}''_{ij}$ получим адаптированную к новому техническому состоянию ГТУ матрицу передаточных функций, в i- той строке которой стоят передаточные функции $\tilde{w}_{ij}(p)$, имеющие в качестве параметров вновь вычисленные оценки. Заменяя в структурной схеме на рис. 1 $\mathbf{W}(p)$ на $\tilde{\mathbf{W}}(p)$ (следовательно, и $\mathbf{W}^+(p)$ на $\tilde{\mathbf{W}}^+(p)$) без учета ошибок моделирования и измерения получим выполнение равенства

$$\mathbf{Y}(t)=\mathbf{Y}_{pr}(t) \tag{8}$$

для $t>t_1$.

Нарушение равенства (8) в некоторый момент времени $t_2>t_1$ определяет необходимость очередной коррекции ЛДМ ГТУ по процедуре изложенной для момента времени t_1.

Обозначим $\mathbf{X}_i^{(o)}=\left(x_{1i},...,x_{\nu i}\right)$ – вектор составленный из оценок ОП, полученных при i- той коррекции модели, ν – число определяющих параметров.

Прогнозирование каждой координаты вектора $\mathbf{X}^{(o)}$ выполняется индивидуально. В момент времени t_k для координаты x_j в базе данных накоплены значения оценок этой координаты, полученные в моменты $t_1,...,t_k$.

Таблица 1. Динамический ряд

t	t_1	...	t_k
x_j	x_{1j}	...	x_{kj}

Представим данные, приведенные в таблице, в виде линейной зависимости $x_j(t)=\alpha_j t+\beta_j$, $j=\overline{1,\nu}$. Следуя общей идеи метода средних, определим $\Delta_{ij}=x_{ij}-\alpha_j t_i-\beta_j$, $i=\overline{1,k}$, $j=\overline{1,\nu}$. Определение коэффициентов α_j, β_j по методу средних предполагает, что $\sum_{i=1}^{k}\Delta_{ij}=0$.

Рассматривая Δ_{ij} как различные реализации случайной величины Δ_j, можно стандартными приёмами выполнить их статистическую обработку. В частности предполагая, что случайные величины Δ_j распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием, и учитывая, что доверительный интервал для оценки их математических ожиданий, так же, как и точность измерения самого параметра x_j, определяется точностью измерения функциональных параметров ГТУ, будем увеличивать объем выборки k до тех пор, пока значение доверительной вероятности не будет равно $0{,}999$. Таким образом, в результате последовательных итераций, будет определён необходимый объем выборки. Практика показывает, что объем выборки $k \approx 10$.

При поступлении очередного значения $x_{k+1,j}$ в базу данных значение x_{1j} отбрасывается, и объем выборки, таким образом, не возрастает, а коэффициенты α_j, β_j, пересчитываются по новой сместившейся выборке.

Предположим, что прямая $x_j(t)=\alpha_j t+\beta_j$ на интервале $[0,t_k]$ получена, причем

$$x_j(t_k)=x_{kj}. \qquad (9)$$

Условие (9) совместно со скольжением выборки объема k обеспечивают придание большего веса последним во времени значениям j- той координаты вектора определяющих параметров $\mathbf{X}^{(o)}$. Так как значение x_{kj} находится в пределах интервала упреждающего допуска для данного параметра x_j, то прогнозируемый интервал практической безотказности по этому параметру определяется временем выхода параметра $x_j(t)$ на границу интервала упреждающего допуска. Вышеизложенное иллюстрирует рис. 3.

На рис. 3:

$$t_{прогн.} = t_k + T,$$

где T – интервал прогнозирования.

Выбор величины ε_j определяется уровнем желаемой практической безотказности параметра x_j. Так, если $\varepsilon_j = 3\sigma_j$, то значение практической безотказности определяется значением вероятности $p = 0{,}99865$, для $\varepsilon_j = 4\sigma_j$ получим $p = 0{,}999968$. Здесь σ_j – точечная оценка среднего квадратического отклонения для координаты x_j в момент времени t_k.

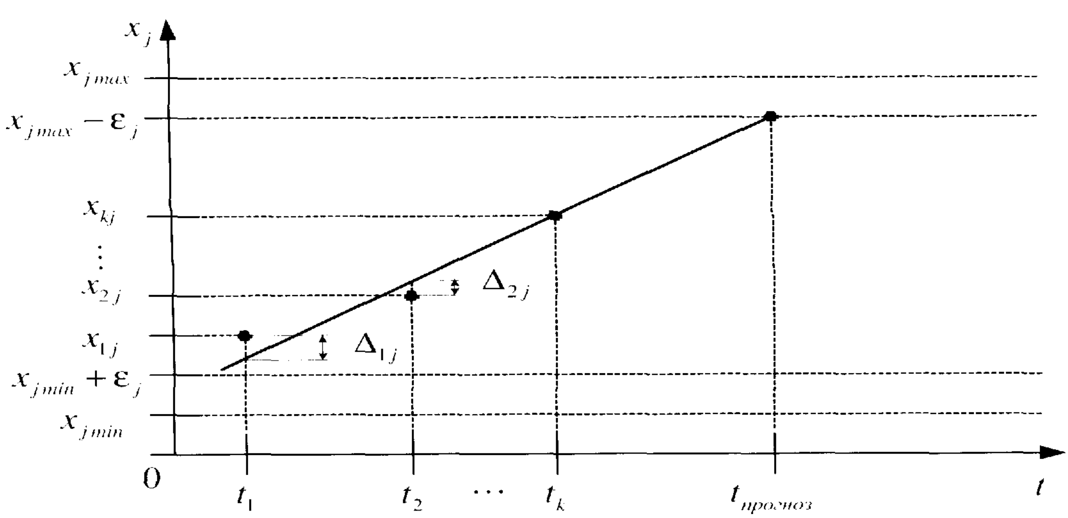

Рис. 3. Определение интервала прогнозирования практической безотказности при индивидуальном прогнозировании параметра

Суммируя все вышеизложенное, сформируем общую структуру интегральной информационно-вычислительной системы, которая осуществляет оценивание и прогнозирование технического состояния ГТУ (рис. 4), при условии, что предварительная обработка измерений параметров проточной части выполнена (проведена фильтрация, обеспечивающая максимальную достоверность измерений).

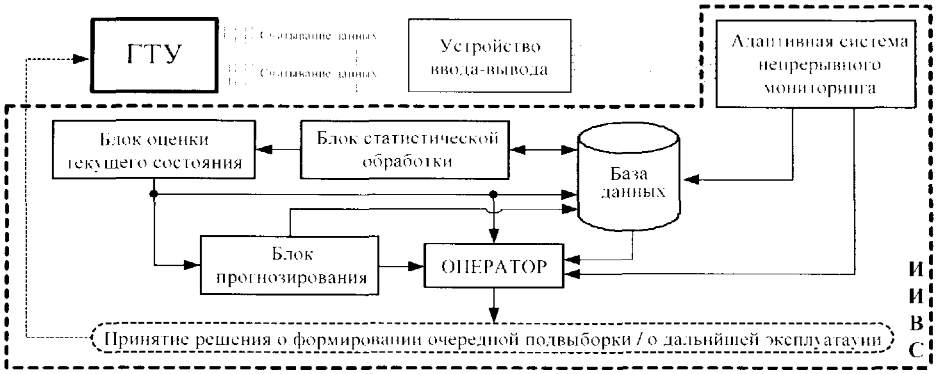

Рис. 4. Структурно-функциональная схема интегральной информационно-вычислительной системы (ИИВС) обработки определяющих параметров ГТУ

Выводы

Предложена методика организации технического обслуживания ГТУ по состоянию, что по сравнению с применяемой в настоящее время системой планово-предупредительных ремонтов повысит процент использования фактического ресурса с 30-70 % до полного использования. Методика позволяет оценить текущее техническое состояние ГТУ и выполнить прогноз значений ОП на некоторый интервал прогнозирования с заданной доверительной вероятностью, что дает возможность исключить отказ ГТУ при штатном режиме функционирования.

В качестве ОП предложено использовать параметры передаточных функций, образующих матрицу передаточных функций, моделирующую зависимость между параметрами проточной части ГТУ. Предложена методика оценивания текущего состояния параметров ГТУ, позволяющая адаптировать математическую модель к изменившемуся техническому состоянию ГТУ. Данная методика базируется на свойствах псевдообратных матриц. Предложен метод обработки результатов коррекции модели ГТУ, позволяющий осуществить прогноз практически безотказного функционирования ГТУ.

Список литературы

1. Зарицкий С. П. Диагностика ГПА с газотурбинным приводом. – М.: Недра, 1987. – 199 с.

2. Техническая эксплуатация авиационного оборудования / Под ред. В. Г. Воробьева. – М.: Транспорт, 1990. – 296 с.

3. Смирнов Н. Н., Ицкович А. А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.

4. Шевяков А. А. Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. – М.: Машиностроение, 1970. – 548 с.

5. Лобода И. И., Горячий А. А. Диагностический анализ отклонений контролируемых параметров ГТУ / Вестник двигателестроения №2/05.– С.161 – 168.

6. Синтез систем управления и диагностирования ГТД / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. М. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.

7. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1967. – 576 с.

8. Асланян А.Э., Бельская А.А. Локализация неисправностей в линейных динамических системах ВВТ / Вип.18: збірник наук. праць ЦНДІ ОВТ ЗС України. – К.: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2007.– С. 3 – 8.

9. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: ВШ, 1977. – 479 с.