

УДК 629.7.08

## ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

© 2014 Н.А. Зотин

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва

Поступила в редакцию 09.09.2014

В статье автор обозначает проблемы оценки технического состояния динамических объектов и предъявляет требования к системам оценки технического состояния. В качестве примера рассматривается разработанный программный комплекс диагностирования и прогнозирования газотурбинных двигателей. Полученные оценки могут быть положены в основы формирования упреждающих технологий эксплуатации.

Ключевые слова: *оценка, техническое состояние, динамический объект, диагностирование, газотурбинный двигатель*

В настоящее время наблюдается сопряжённая с интенсивным развитием науки и техники тенденция повышения сложности систем антропогенной природы. Разработка и создание таких систем является трудоёмким и материально затратным процессом. Проведение мероприятий по поддержанию, продлению и восстановлению ресурса этих систем является актуальной задачей, требующей возможности определять и оценивать их техническое состояние.

Работы, проведение которых необходимо при определении и оценки технического состояния сложных систем ввиду своих значительных объёмов требует высокой степени автоматизации. Следовательно, возникает необходимость в формализации процесса оценки технического состояния, выявлении проблем, возникающих при этом, определении, исходя из состава проблем, требований к устройствам диагностирования и прогнозирования, а также в разработке с учётом поставленных требований этих систем, основанных на введённом формализме.

**Математический формализм задачи определения и оценки технического состояния.** Сложная техническая система, переходящая в процессе своего жизненного цикла из одного технического состояния в другое, формально является динамическим объектом – объектом, структура (устройство) которого может изменяться [1, 2]. Графически с общих позиций динамический объект выглядит следующим образом (рис. 1). На рисунке  $x(t) = \langle x_3(t), x_c(t) \rangle$  – известный изменяющийся во времени входной сигнал, который складывается из сигналов, задаваемых субъектом  $x_3(t)$ , а также сигналов, которые субъект не контролирует  $x_c(t)$ ;  $y(t)$  – измеряемый выходной сигнал;  $v(t)$  – помеха, то есть неизвестный сигнал, влияющий на  $y(t)$ .

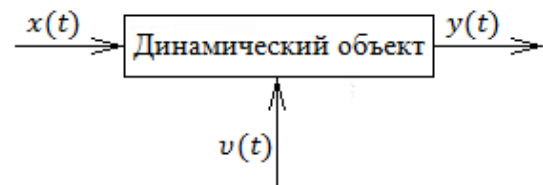


Рис. 1. Динамический объект

Структура объекта определяет зависимость  $f = f(x(t), y(t), v(t), \{c_i\})$  между входным и выходным сигналом, а также помехой. Функция  $f$  называется функцией связи;  $\{c_i\}$  – множество коэффициентов функции. Очевидно, что при изменении структуры объекта изменяется и функция связи. Определить техническое состояние динамического объекта – значит классифицировать функцию связи, то есть определить

$$F_k: f \in F_k, F_k \in \mathbf{F} = \{F_i\}_{i=1}^{n_F},$$

где  $F_k$  – класс функций связи;  $f$  – данная (определённая) функция связи;  $\mathbf{F} = \{F_i\}_{i=1}^{n_F}$  – множество классов функций связи;  $n_F$  – количество классов функций связи. Признаками, используемыми при классификации функций, то есть признаками технических состояний, являются коэффициенты этих функций  $\{c_i\}$ .

Оценить техническое состояние объекта – значит определить, насколько эффективно при известных условиях внешней среды будет выполнять объект поставленные задачи с классифицированной функцией связи, то есть определить

$$E: f_{F \times N}^E(F_k, N) = E,$$

где  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_{n_E}\}$  – множество, характеризующее эффективность от использования объекта;  $e_i$  – параметр, характеризующий эффективность;  $N = \{n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_{n_N}\}$  – множество, характеризующее воздействия внешней среды;  $n_i$  – параметр, характеризующий воздействие внешней среды;  $f_{F \times N}^E$  – сюръекция,

$$f_{F \times N}^E: F \times N \xrightarrow{sur} E,$$

где  $F$  – множество классов функций связи;  $E$  – область значений;  $N$  – область значений  $N$ ;

$$N = \prod_{i=1}^{n_N} n_i, E = \prod_{i=1}^{n_E} e_i,$$

где  $e_i$  – область значений  $e_i$ , параметра характеризующего эффективность от использования объекта;  $n_i$  – область значений  $n_i$ , параметра характеризующего воздействия внешней среды. Под внешней средой мы будем понимать любые воздействия на объект извне, следовательно,  $N(t) = \{n_i(t)\} = \langle x(t), v(t) \rangle$ . Таким образом, для оценки технического состояния динамического объекта необходимо знать функцию связи  $f$ ; систему классификаций функций связи; множество, характеризующее воздействие внешней среды  $N$ ; и сюръекцию  $f_{F \times N}^E$ .

**Проблемы определения и оценки технических состояний сложных технических систем (динамических объектов).** При определении всех необходимых для оценки технического состояния вышеперечисленных компонентов возникает ряд трудностей:

1. Сложные системы, представляемые динамическими объектами, как правило, являются плохо подающимися аналитическому описанию, следовательно, функцию связи динамического объекта можно определить только при построении его модели идентификации, что требует наличие объёмных баз данных.

2. Для определения функции связи динамического объекта при построении его модели идентификации необходимо определить форму функции, что часто бывает затруднительно ввиду отсутствия точного обоснования выбора и противоречивых экспертных рекомендаций.

3. В процессе оценки ввиду изменчивости своей структуры динамический объект может перейти из одного своего состояния в другое, что повлияет на объективность результатов оценки. Следовательно, возникает проблема выбора временного интервала, в течение которого объект можно считать квазистатическим. Такой интервал будем называть актом работы.

4. Как правило, большинство существующих систем классификации, применяемых при диагностировании, не отражают адекватно внутреннюю структуру объекта, а, следовательно, и его техническое состояние. Это связано с тем, что признаками в этих системах являются непосредственно измеряемые параметры, к одним и тем же отклонениям которых могут вести различные изменения в структуре объекта.

5. Заблаговременно предопределить множество, характеризующее внешнюю среду  $N$ , не представляется возможным, а, следовательно, эффективность от использования объекта определяют на основании функции связи, ориентируясь на одни и

те же обобщённые значения множества  $N$ , следовательно

$$E: f_F^E(F_k) = E,$$

где  $E$  – множество, характеризующее эффективность от использования объекта;  $F_k$  – класс функций связи;  $f_F^E$  – сюръекция,

$$f_F^E: F \xrightarrow{sur} E,$$

где  $F$  – множество классов функций связи;  $E$  – область значений  $E$ . Таким образом, задача оценки технического состояния зачастую является задачей его определения.

6. Устройство динамических систем бывает настолько сложным, что точное создание двух объектов с одинаковой структурой становится неосуществимым. Следовательно, при использовании абсолютных значений признаков технического состояния необходимо создавать индивидуальные системы классификации для каждого экземпляра системы, так как обобщённые системы классификации не обеспечивают достаточную точность диагноза и прогноза в ряде случаев.

7. Изменение функции связи некоторых объектов зависит не от их перехода от одного технического состояния в другое, а от изменения режима функционирования, предусмотренного при штатной работе системы.

8. Проведение над объектом испытаний с целью оценки его технического состояния может быть сопряжено со значительными материальными затратами. В этом случае диагностику и прогнозирование системы осуществляют на основании данных, полученных с регистрационных устройств и записанных при штатном функционировании системы.

**Требования к системам диагностики и прогнозирования.** На основании проблем определения и оценки технических состояний динамических объектов к системам диагностирования и прогнозирования предъявляют следующие требования:

1. В основе систем определения и оценки технического состояния динамического объекта должен быть анализ его параметров, постоянно регистрируемых в процессе штатной работы.

2. Ввиду уникальности динамических объектов в качестве признаков технических состояний необходимо использовать не абсолютные значения признаков технического состояния, а их относительные отклонения от значений, как правило, соответствующих исправному техническому состоянию объекта.

3. Для обеспечения определения технического состояния динамических объектов до окончания их актов работы системы диагностики и прогнозирования должны иметь возможность применяться часто и оперативно.

4. Системы диагностики и прогнозирования наряду с задачей определения значений признаков

технического состояния должны обладать способность формировать критерии его оценки на основании базы зарегистрированных данных множества экземпляров объекта в процессе их работы.

Исходя из сформулированных требований, автор предлагает частный пример системы определения технического состояния динамических объектов – программный комплекс, разработанный в среде LabView, обеспечивающий диагностику и прогнозирование технического состояния газотурбинного двигателя (ГТД). Работа комплекса основана на обработке полётных файлов, зарегистрированных бортовой автоматизированной системой контроля.

В рамках данной статьи рассмотрим методику, которую реализует данный комплекс.

1. Определение признаков функции связи динамического объекта (ГТД). Формально значения параметров ГТД и внешних условий, записанных в полётный файл бортовой автоматизированной системы контроля, можно представить мультимножеством  $U$ ,

$$U = \{k(u_i) \cdot u_i\}_{i=1}^{n_U}$$

где  $k(u_i) \cdot u_i$  – компонента мультимножества  $U$ , содержащая все измеренные за полёт  $k(u_i)$  раз значения параметра  $u_i$ ;  $n_U$  – число регистрируемых параметров.

Внешними условиями, необходимыми для построения функции связи, в данном случае являются регистрируемые параметры атмосферы и параметр задающий режим работы двигателя. В случае, если задающий режим параметр измеряется недостаточно точно, то следует выбрать тесно коррелированный с ним параметр, то есть тот, который определяет режим работы. В таком случае функция связи представляет собой набор моделей дроссельных характеристик регистрируемых параметров, значения которых приведены к стандартным атмосферным условиям (САУ) [3]:

$$u_{i,np}(q_{np}) = \sum_{j=0}^{n_{A_i}} A_{i,j} \cdot (q_{np})^j$$

где  $A_{i,j}$  –  $j$ -тый коэффициент полинома дроссельной характеристики параметра  $u_i$  ГТД;  $n_{A_i}$  – степень полинома;  $q_{np}$  – приведённое к САУ значение режимного параметра.

Признаками классов функций связи, то есть кандидатами в диагностические и прогностические признаки, являются множество коэффициенты моделей дроссельных характеристик:

$$\left\{ \{A_{i,j}\}_{j=0}^{n_{A_i}} \right\}_{i=1}^{n_U - (n_R - 1)},$$

где  $A_{i,j}$  –  $j$ -тый коэффициент полинома дроссельной характеристики параметра  $u_i$ ;  $n_{A_i}$  – степень полинома моделирующего дроссельную характеристику;  $n_U - (n_R - 1)$  – число регистрируемых

параметров за исключением одного режимного и  $n_R$  параметров атмосферы, необходимых для приведения значений параметров к САУ.

Ввиду допущения о том, что при переходе из одного технического состояния в другое функция связи не может изменять свою кривизну, а только параллельно перемещается вдоль оси ординат, то в качестве более компактного множества кандидатов в признаки технического состояния было выбрано множество определённых по моделям дроссельных характеристик значений параметров ГТД  $u_{i,np}(q_{np})$  соответствующих одному и тому же режимному параметру:

$$\{u_{i,np}(q_{np}^*)\}_{i=1}^{n_U - (n_R - 1)},$$

где  $u_{i,np}(q_{np}^*)$  – значение приведённое к САУ параметра  $u_i$  ГТД, соответствующее значению  $q_{np}^*$  режимного параметра. В дальнейшем значения  $u_{i,np}(q_{np}^*)$  будем называть приведёнными.

2. Формирование набора данных для определения критериев технического состояния.

Формируемые наборы данных представляют собой ряды динамики [4,5] приведённых значений параметров  $u_i$  ГТД

$$\begin{aligned} & \{u_{i,np,j,1}(q_{np}^*)\}_{j=1}^{N_1}, \\ & \{u_{i,np,j,2}(q_{np}^*)\}_{j=1}^{N_2}, \\ & \dots \\ & \{u_{i,np,j,l}(q_{np}^*)\}_{j=1}^{N_l}, \\ & \dots \\ & \{u_{i,np,j,n_W}(q_{np}^*)\}_{j=1}^{N_{n_W}}. \end{aligned}$$

где  $u_{i,np,j,l}(q_{np}^*)$  – приведённое значение параметра  $u_i$   $l$ -того экземпляра ГТД, соответствующее  $j$ -тому полёту;  $N_l$  – количество полётов ГТД за период эксплуатации, начиная с выпуска двигателя (или его капитального ремонта) и заканчивая списанием ГТД (или его капитальным ремонтом);  $n_W$  – число экземпляров ГТД.

Порядок уровней в рядах соответствует порядку ранжированных по времени полётов, на основании анализа которых были получены значения этих уровней  $u_{i,np,j,l}(q_{np}^*)$ . Часть рядов динамики соответствует ГТД, в течение эксплуатации которых наблюдался переход в техническое состояние  $s_i$ , образует множество

$$\left\{ \{u_{i,np,j,l(+)}(q_{np}^*)\}_{j=1}^{N_l} \right\}_{l(+)=1}^{N_{n_W(+)}},$$

где  $n_{W(+)}$  – число экземпляров ГТД, которые перешли в течение периода эксплуатации в техническое состояние  $s_k$ .

Другая часть рядов динамики соответствует ГТД, в течение эксплуатации которых не наблюдался переход в техническое состояние  $s_i$ , образует множество

$$\left\{ \left\{ u_{i,np,j,l(-)}(q_{np}^*) \right\}_{j=1}^{N_l} \right\}_{l(-)=1}^{n_{W(-)}}$$

где  $n_{W(-)}$  – число экземпляров ГТД, которые не перешли в течение периода эксплуатации в техническое состояние  $s_k$ .

**3. Определение приведённых значений параметров ГТД соответствующих исправному техническому состоянию.** Данная процедура основана на предположении об исправности технического состояния ГТД после его капитального ремонта или производства. Таким образом, приведённое значение параметра ГТД, соответствующее исправному техническому состоянию определяется как математическое ожидание уровней наибольшего интервала ряда, на котором не обнаружен тренд значений, и начало которого совпадает с началом ряда динамики:

$$M[u_{i,np,l}] = \frac{\sum_{j=1}^m u_{i,np,j,l}(q_{np}^*)}{m},$$

где  $m$  – максимальное число первых уровней ряда  $\{u_{i,np,j,l}(q_{np}^*)\}_{j=1}^{N_l}$ , среди которых не замечена тенденция изменения приведённого значения параметра  $u_i$ ;  $M[u_{i,np,l}]$  – математическое ожидание множества значений  $\{u_{i,np,j,l}(q_{np}^*)\}_{j=1}^m$ . В работе предложена методика обнаружения тренда, изложенная в [4, 5].

**4. Определение относительных значений кандидатов в признаки технического состояния.** Относительные значения кандидатов в признаки определяют как отношение значений приведённых параметров к их значениям, соответствующим исправному техническому состоянию объекта:

$$\tilde{u}_{i,np,j,l} = \frac{u_{i,np,j,l}(q_{np}^*)}{M[u_{i,np,l}]},$$

где  $\tilde{u}_{i,np,j,l}$  – относительное приведённое значение параметра  $u_i$   $l$ -того экземпляра ГТД (относительное значений кандидатов в признаки технического состояния);  $u_{i,np,j,l}(q_{np}^*)$  – приведённое значение параметра  $u_i$   $l$ -того экземпляра ГТД, соответствующее  $j$ -тому полёту.

Определяя относительные значения кандидатов в признаки, преобразуем множество рядов динамики приведённых параметров

$$\left\{ \left\{ u_{i,np,j,l}(q_{np}^*) \right\}_{j=1}^{N_l} \right\}_{l=1}^{n_W}$$

в множество рядов динамики относительных приведённых параметров

$$\left\{ \left\{ \tilde{u}_{i,np,j,l} \right\}_{j=1}^{N_l} \right\}_{l=1}^{n_W}$$

где  $u_{i,np,j,l}(q_{np}^*)$  – приведённое значение параметра  $u_i$   $l$ -того экземпляра ГТД, соответствующее  $j$ -тому

полёту;  $N_l$  – количество полётов ГТД за период эксплуатации, начиная с производства двигателя (или его капитального ремонта) и заканчивая списанием ГТД (или его капитальным ремонтом);  $n_W$  – число экземпляров ГТД;  $\tilde{u}_{i,np,j,l}$  – относительное приведённое значение параметра  $u_i$   $l$ -того экземпляра ГТД.

**5. Определение области значений относительных приведённых параметров, которая соответствует техническому состоянию  $s_k$ .** Осуществляется исходя из двух предположений: во-первых, переход ГТД в техническое состояние  $s_k$  является причиной появления тенденции изменения уровней рядов  $\left\{ \left\{ \tilde{u}_{i,np,j,l(+)} \right\}_{j=1}^{N_l} \right\}_{l=1}^{n_{W(+)}}$ , соответствующих ГТД, которые перешли в течение периода эксплуатации в техническое состояние  $s_k$ ; во-вторых, эта тенденция описывается линейной моделью и начинается за  $h$  полётов до момента наступления технического состояния  $s_k$ . Для определения интервалов  $\{d(\tilde{u}_{i,np,l(+)})\}_{l=1}^{n_{W(+)}}$  относительных приведённых параметров  $\tilde{u}_{i,np,l}$ , соответствующих моменту времени, в котором ГТД перешёл в техническое состояние  $s_k$ , используется методика интервального прогнозирования [4]. Число  $h$  полётов определяется исходя из компромисса между точностью прогноза (малостью интервала прогнозирования) и его актуальностью, то есть удалённостью по времени первой точки  $\tilde{u}_{i,np,j,l(+)}$  в ряду наблюдений от момента времени перехода ГТД в техническое состояние  $s_k$ . Объединение множеств интервалов относительных приведённых значений параметров  $u_i$  различных экземпляров ГТД даст область  $D(\tilde{u}_{i,np(+)}),$

$$D(\tilde{u}_{i,np(+)} ) = \bigcup_{l(+)=1}^{n_{W(+)}} d(\tilde{u}_{i,np,l(+)}),$$

где  $n_{W(+)}$  – число экземпляров ГТД, которые перешли в течение периода эксплуатации в техническое состояние  $s_k$ .

**6. Определение области значений относительных приведённых параметров, которая не соответствует техническому состоянию  $s_k$ .** Для этого в каждом ряду динамики из множества  $\left\{ \left\{ \tilde{u}_{i,np,j,l(-)} \right\}_{j=1}^{N_l} \right\}_{l(-)=1}^{n_{W(-)}}$  определим последовательности уровней ряда на которых не обнаруживается тренд. Методика обнаружения тренда изложена в [4]. Затем вычислим для этих последовательностей математическое ожидание уровней ряда и его доверительный интервал [6, 7]. Объединим полученные интервалы для каждого ряда динамики  $\left\{ \tilde{u}_{i,np,j,l(-)}(q_{np}^*) \right\}_{j=1}^{N_l}$  в один  $d(\tilde{u}_{i,np,l(-)})$  и получим множество  $\{d(\tilde{u}_{i,np,l(-)})\}_{l=1}^{n_{W(-)}}$ , где  $n_{W(-)}$  – число экземпляров ГТД, которые не перешли в течении периода эксплуатации в техническое состояние  $s_k$ ;  $N_l$  – количество полётов ГТД за период эксплуатации.

Объединение множества интервалов относительных приведённых значений параметров  $u_i$  различных экземпляров ГТД даст область  $D(\tilde{u}_{i,np(-)})$ ,

$$D(\tilde{u}_{i,np(-)}) = \bigcup_{l(-)=1}^{n_{w(-)}} d(\tilde{u}_{i,np,l(-)}),$$

Разность множеств

$$D(\tilde{u}_{i,np(k)}) = D(\tilde{u}_{i,np(+)} ) \setminus D(\tilde{u}_{i,np(-)})$$

является областью значений относительного приведенного значения параметра ГТД  $u_i$ , которая соответствует техническому состоянию  $s_k$ . При попадании в неё значения признака  $\tilde{u}_{i,np}$  определённого при прогнозировании, следует считать, что ГТД перейдёт в техническое состояние  $s_k$  в момент времени, на который этот прогноз осуществлялся.

Методики прогнозирования точного относительного приведенного значения параметра ГТД не существует, однако есть возможность спрогнозировать в каком интервале окажется данное значение. Методика интервального прогнозирования аналогична используемой при определении области значений относительных приведённых параметров, которая соответствует техническому состоянию  $s_k$  [4].

**Выводы:** проведен обзор проблем, возникающих при оценки технического состояния динамических объектов, на основании перечисленных проблем выдвинуты требования к системам

диагностики и прогнозирования динамических объектов. В качестве примера такой системы рассмотрен программный комплекс диагностики и прогнозирования ГТД. Полученные данные могут быть положены в основу построения упреждающих технологий технического обслуживания и ремонта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Цыпкин, Я.З. Информационная теория идентификации. – М.: Наука, Физматлит, 1995. 336 с.
2. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. Под ред. Я.З. Цыпкина. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 432 с.
3. Кулагин, В.В. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. 2-е изд., исправл. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн. 1. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. Кн. 2. – М.: Машиностроение, 2003. – 616 с.
4. Сажин, Ю. В. Анализ временных рядов и прогнозирование: учебник / Ю.В. Сажин, А.В. Катынь, Ю.В. Сарайкин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. 192 с.
5. Айвазян, С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. 471с.
6. Дулякин, В.М. Статистический анализ выборочных данных: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. 110 с.
7. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей. – М.: КНОРУС, 2010. 664 с.

## PROBLEMS OF ESTIMATION THE TECHNICAL STATE OF DYNAMIC OBJECTS

© 2014 N.A. Zotin

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov

In article the author designates the problems of estimation the technical state of dynamic objects and imposes requirements to systems of estimation the technical state. As an example of such systems the developed program complex of diagnosing and forecasting for gas-turbine engines is considered. The received estimates may be the basis for formation the proactive maintenance technologies.

Key words: *estimation, technical state, dynamic object, diagnosing, gas-turbine engine*