

УДК629.7.036

П. В. Королев

ФОРМИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Предложена процедура получения индивидуальных математических моделей рабочего процесса газотурбинных двигателей - моделей, являющихся основой эффективных алгоритмов управления эксплуатацией парков двигателей. Возможности реализации процедуры рассмотрены на примере авиационного двигателя Д-36.

Проблема обеспечения высокой эффективности эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД), находящих применение во многих областях человеческой деятельности, сохраняет высокую актуальность. Способ ее решения - создание таких систем управления эксплуатацией парков ГТД, которые путем повышения точности оценок и соответствующего увеличения полноты использования индивидуальных функциональных возможностей двигателей приводят к росту эффективности обеспечиваемых парком технологических процессов.

Указанные системы управления должны, опираясь в своей работе на данные индивидуальных штатных систем контроля двигателя, инициировать воздействия по управлению состоянием и использованием отдельных экземпляров их парка на базе решений трех групп технических задач управления: диагностирования ГТД, косвенного контроля выработки их ресурса, оптимизации их применения. Алгоритмы решения технических задач управления следует строить на основе индивидуальных математических моделей различных свойств двигателей. Наиболее важными среди таких моделей являются, очевидно, индивидуальные математические модели рабочего процесса (ММРП) двигателей.

Общий подход к формированию индивидуальных ММРП ГТД основывается на учете того факта, что вся совокупность десятков тысяч находящихся в эксплуатации ГТД состоит из сравнительно небольшого числа парков однотипных двигателей, внутри каждого из которых относительно малые отличия функциональных характеристик отдельных экземпляров друг от друга обусловлены результатами воздействия на элементы проточной части (ПЧ) многочисленных детерминированных и случайных производственно-технологических и эксплуатационных фактов. Согласно этому подходу для каждого из типов ГТД базой формирования индивидуальных ММРП являются соответствующие типовые модели: модели, описывающие функционирование некоторого среднего двигателя рассматриваемого типа, в качестве которого целесообразно выбрать среднестатистический двигатель с нулевой наработкой после изготовления. Типовые ММРП строятся на базе теории ГТД, поддерживающих ее технических наук и данных проектирования и отлаживаются путем их согласования с известной функциональной характеристикой среднего двигателя. Необходимое количество типовых моделей, отличающихся друг от друга полнотой охвата моделируемого рабочего процесса (РП) (модели РП всего двигателя; модели РП групп элементов и отдельных элементов ПЧ) и описания его свойств (нестационарность РП и потока рабочего тела (РТ); трехмерность потока РП, РП - смесь реальных газов, обладающая молекулярными и турбулентными вязкостью и теплопроводностью; теплообмен между РТ и деталями ПЧ;...), определяется, в основном, потребностями управления эксплуатацией парка двигателей рассматриваемого типа. При этом, исходя из анализа современного уровня развития системы управления эксплуатацией ГТД, следует считать необходимым, чтобы среди типовых ММРП была модель установившегося РП всего двигателя, представляющая этот РП, как минимум, совокупностью значений интегральных параметров функционирования основных элементов (ОЭ) ПЧ (каскады компрессора, каскады турбины, камера

сгорания, патрубки,...), то есть модель установившегося РП всего двигателя не ниже 2-го уровня сложности.

В общем случае i -я типовая ММРП представляет вектор \bar{c}_m^{io} модельных параметров РП (ПРП) среднего (индекс o) двигателя детерминированной типовой модельной функцией вектора \bar{a}_m^{io} модельных параметров состояния (ПС) ПЧ этого двигателя и вектора \bar{B}_m^i модельных режимных параметров:

$$\bar{c}_m^{io} = f_m^i(\bar{a}_m^{io}, \bar{B}_m^i). \quad (1)$$

Функция f_m^i является попыткой зафиксировать наиболее важные для практики свойства реальной общей типовой зависимости

$$\bar{c} = f(\bar{a}, \bar{B}) \quad (2)$$

вектора \bar{c} параметров функционирования ГТД рассматриваемого типа от вектора \bar{a} параметров состояния его ПЧ и вектора \bar{B} его режимных параметров. Величины \bar{a}_m^i и \bar{c}_m^i зависимости (1) являются конечномерными аналогами гипотетических бесконечномерных векторов \bar{a} и \bar{c} , характеризующих столь сложные объекты, которыми являются соответственно поверхности деталей ПЧ двигателя и поля параметров потока в ней. Величина \bar{B}_m^i является аналогом гипотетического конечномерного вектора \bar{B} . Предполагается существование детерминированных функций $\bar{a}_m^i = f_m^i(\bar{a})$, $\bar{B}_m^i = \psi_m^i(\bar{B})$, $\bar{c}_m^i = \chi_m^i(\bar{c})$.

В соответствии с существованием двух этапов формирования индивидуальности ПЧ двигателя под воздействием вначале производственно-технологических, а затем эксплуатационных факторов целесообразна следующая 2-этапная процедура формирования индивидуальных ММРП парка ГТД.

На 1-м этапе путем параметрической идентификации каждой из типовых ММРП на основе данных контроля конкретных экземпляров ГТД во время их изготовления и ремонта создаются соответствующие им семейства индивидуальных базовых ММРП:

$$\bar{c}_{m6}^{ij} = f_m^i(\bar{a}_{m6}^{ij}, \bar{B}_m^i), \quad (3)$$

где j - номер двигателя в парке; $\bar{a}_{m6}^{ij} = \bar{a}_m^{io} + \Delta \bar{a}_{m6}^{ij}$; $\Delta \bar{a}_{m6}^{ij}$ - индивидуальное базовое приращение вектора модельных ПС ПЧ.

Данные контроля двигателя включают в себя результаты измерений геометрических параметров его ПЧ и испытаний ее отдельных элементов (рабочие форсунки, сопловые аппараты турбины,...), а также приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) двигателя в целом.

На 2-м этапе путем периодической уточняющей параметрической идентификации моделей каждого из семейств индивидуальных базовых ММРП на основе данных эксплуатационного контроля конкретных экземпляров ГТД создаются и поддерживаются в актуальном состоянии соответствующие им семейства индивидуальных текущих ММРП:

$$\bar{c}_{mT}^{ijs} = f_m^i(\bar{a}_{mT}^{ijs}, \bar{B}_m^i), \quad (4)$$

где s - номер шага 2-го этапа; $\bar{a}_{mT}^{ijs} = \bar{a}_{mT}^{ij(s-1)} + \Delta \bar{a}_{mT}^{ijs}$; $\Delta \bar{a}_{mT}^{ijs}$ - индивидуальное текущее приращение вектора модельных ПС ПЧ; $\bar{a}_{mT}^{ij0} = \bar{a}_{m6}^{ij}$.

Данные контроля двигателя включают в себя здесь результаты осмотров и обмеров деталей его ПЧ во время регламентных работ технического обслуживания и измерений его ПРП во время применения по назначению.

На каждом из двух указанных этапов формирования индивидуальных ММРП двигателей их параметрическая идентификация осуществляется в общем случае в две стадии, так, что $\Delta \bar{a}_{m6}^{ij} = \Delta \bar{a}_{m61}^{ij} + \Delta \bar{a}_{m62}^{ij}$, $\Delta \bar{a}_{mT}^{ijs} = \Delta \bar{a}_{mT1}^{ijs} + \Delta \bar{a}_{mT2}^{ijs}$.

Первая стадия идентификации моделей двигателя - корректировка значений \bar{a}_m^i на основе данных последнего измерения компонент вектора $\bar{a}_k (= \varphi_k(\bar{a}))$ контролируемых ПС

его ПЧ, которыми являются контролируемые геометрические параметры ПЧ и контролируемые параметры функционирования отдельных элементов ПЧ:

$$\Delta \bar{a}_{м61}^{ij} = g^i(\bar{a}_{к6}^j, \bar{a}_k^0) \approx G^i(\bar{a}_{к6}^j - \bar{a}_k^0), \quad (5)$$

$$\Delta \bar{a}_{мт1}^{ijs} = g^i(\bar{a}_{кт}^{js}, \bar{a}_{кт}^{j(s-1)}) \approx G^i(\bar{a}_{кт}^{js} - \bar{a}_{кт}^{j(s-1)}). \quad (6)$$

где функции $g^i(\bar{a}_{к2}, \bar{a}_{к1})$ представляют собой по существу построенные на основе теории ГТД ядра моделей изменений функциональных характеристик элементов ПЧ двигателя рассматриваемого типа, обусловленных изменением значения вектора \bar{a}_k от $\bar{a}_{к1}$ до $\bar{a}_{к2}$; \bar{a}_k^0 - значение \bar{a}_k , отвечающее среднему двигателю; $G^i = \partial g^i(\bar{a}_{к2}, \bar{a}_{к1}) / \partial \bar{a}_{к2} | \bar{a}_{к1} = \bar{a}_{к2} = \bar{a}_k^0$.

Вторая стадия идентификации - корректировка значений \bar{a}_m^i приращениями $\Delta \bar{a}_{м62}^{ij}$ или $\Delta \bar{a}_{мт2}^{ijs}$, определяемыми посредством процедур согласования моделей с результатами последнего контроля процесса функционирования двигателя (во время ПСИ или применения по назначению):

$$\sum_{r=1}^{Nr} \| f_{мк}^i(\bar{a}_m^{i0} + \Delta \bar{a}_{м61}^{ij} + \Delta \bar{a}_{м62}^{ij}, \bar{B}_{км6}^{ijr}) - \bar{C}_{км6}^{ijr} \| \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$\sum_{r=1}^{Nr} \| f_{мк}^i(\bar{a}_{мт}^{ij(s-1)} + \Delta \bar{a}_{мт1}^{ijs} + \Delta \bar{a}_{мт2}^{ijs}, \bar{B}_{кмт}^{ijsr}) - \bar{C}_{кмт}^{ijsr} \| \rightarrow \min. \quad (8)$$

где r - номер контрольного режима работы двигателя в рассматриваемой (последней) серии из Nr режимов; $f_{мк}^i$ - проекция функции f_m^i на пространство вектора $\bar{C}_k (= \chi_k(\bar{C}))$ контролируемых ПРП; $\bar{B}_{км}^i$ - проекция вектора $\bar{B}_k (= \psi_k(\bar{B}))$ контролируемых параметров на пространство \bar{B}_m^i ; $\bar{C}_{км}^i$ - проекция \bar{C}_k на пространство \bar{C}_m^i .

Процедуры (7) и (8) строятся обычно в условиях, когда размерности векторов \bar{a}_m^i превышают размерности векторов $\bar{C}_{км}^i$ (в случае ММРП высоких уровней сложности значительно). Поэтому основу этих процедур должны составлять, по-видимому, следующие два элемента:

базирующиеся на опытных данных гипотезы об участии в формировании индивидуальности ПЧ двигателя определенных типовых соответственно производственно-технических и эксплуатационных факторов;

математические модели типовых дефектов ПЧ, являющихся результатами воздействия этих типовых факторов.

Приемлемой формой моделей типовых дефектов ПЧ может быть, очевидно, такая:

$$\Delta \bar{a}_m^{ig} = \bar{\alpha}_m^{ig} \Delta x^{ig}, \quad (9)$$

где g - номер дефекта (фактора) в группе производственно-технологических или эксплуатационных дефектов; x^{ig} - компонента \bar{a}_m^i , принятая в качестве параметра, определяющего развитие g -го дефекта (одна из наиболее чувствительных к его развитию); $\bar{\alpha}_m^{ig}$ - вектор коэффициентов пропорциональности между изменениями компонент \bar{a}_m^i при развитии g -го дефекта.

В таком случае процедуры (7) и (8) сводятся к определению уровней Δx^{ig} развития типовых дефектов на основе упомянутых гипотез об участии типовых факторов в формировании индивидуальности ПЧ, а сами эти гипотезы могут быть представлены путем установления взаимосвязей между вероятными уровнями развития дефектов в их производственно-технологической и эксплуатационной группах.