

sistema [Combined vibration protection system].
Patent RF, no 2015123195/05, 2016.

Бурьян Юрий Андреевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Основы теории механики и автоматического управления ФГБОУ ВО ОмГТУ (644050, г. Омск, пр. Мира, 11, e-mail: burian7@mail.ru).

Сорокин Владимир Николаевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Основы теории механики и автоматического управления ФГБОУ ВО ОмГТУ (644050, г. Омск, пр. Мира, 11, e-mail: sorokin.vn@mail.ru).

Захаренков Николай Владиленович (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры Машиноведение ФГБОУ ВО ОмГТУ (644050, г. Омск, пр. Мира, 11, e-mail: znickbar@mail.ru).

Зелов Александр Федорович (Омск, Россия) – научный сотрудник лаборатории 120 научно-производственное объединение «Прогресс»

(644018, г. Омск, ул. 5-я Кордная, 4, e-mail: aleks.zelov@gmail.com).

Yuriy A. Buriyan (Omsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Fundamentals of the Theory of Mechanics and Automatic Control department, Omsk State Technical University (644050, Mira, 11 prospect, Omsk, Russian Federation, e-mail: burian7@mail.ru).

Vladimir N. Sorokin (Omsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Ass. Professor, Fundamentals of the Theory of Mechanics and Automatic Control department, Omsk State Technical University (644050, Mira, 11 prospect, Omsk, Russian Federation, e-mail sorokin.vn@mail.ru).

Nikolay V. Zakharenkov (Omsk, Russian Federation) – Ph. D in Technical Sciences, Science of Machines department, Omsk State Technical University (644050, Mira, 11 prospect, Omsk, Russian Federation, e-mail znickbar@mail.ru).

Aleksandr F. Zelov (Omsk, Russian Federation) – research engineer, NPP “Progress” (644018, 5th Kordnaya, 4, Omsk, Russian Federation, e-mail aleks.zelov@gmail.com).

УДК 621.45.018.2

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВОРЕГУЛИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Е.В. Шендалева

Омский государственный технический университет, Россия, г. Омск

Аннотация. В статье рассматривается проблема прогнозирования технического состояния топливорегулирующей аппаратуры газотурбинных двигателей. Основное содержание исследования составляет анализ применимости метода экстремального прогнозирования для обеспечения гарантированного прогноза технического состояния топливорегулирующей аппаратуры. Метод экстремального прогнозирования позволяет выполнить прогноз на основании результатов измерений, полученных в ходе длительных испытаний на полунатурном моделирующем стенде и последующих плановых испытаний. Прогноз выполняется без анализа статистического распределения результатов измерений. Результаты исследования могут быть использованы для прогнозирования состояния технических систем, состоящих из элементов различной физической природы.

Ключевые слова: топливорегулирующая аппаратура, газотурбинный двигатель, полунатурный испытательный моделирующий стенд, прогнозирование технического состояния.

Введение

Газотурбинные технологии находят всё более широкое применение в различных отраслях промышленности – прежде всего в авиации, судостроении, на железнодорожном

транспорте, в топливно-энергетическом комплексе. Требования к надежности и эксплуатационным характеристикам газотурбинных двигателей непрерывно возрастают. В связи с этим актуальность исследования и освое-

ния новых эффективных технологий доводки и испытаний газотурбинных двигателей, его агрегатов и комплектующих, повышение точности регулирования статических и динамических характеристик не вызывает сомнения.

Испытания топливорегулирующей аппаратуры

Критерием достижения заданных технических характеристик согласованной работы газотурбинного двигателя (ГТД) и его топливорегулирующей аппаратуры (ТРА) могут служить результаты длительных испытаний ТРА, например, всережимных топливных регуляторов или дозаторов топлива, на полунатурном испытательном стенде. Данные испытания позволяют контролировать статические и динамические характеристики совместной работы ГТД и ТРА, тем самым, обеспечивая прогнозируемую безопасность эксплуатации ГТД и воздушных судов.

На рис. 1 представлена структурная схема полунатурного испытательного стенда для испытания всережимного топливного регулятора или дозатора топлива – гидромеханической части системы автоматического управления (ГМЧ САУ) [1]. Стенд содержит модель ГТД по контурам регулирования частоты вращения и давления за компрессором, реализованную программно, и преобразователи электрических сигналов с выхода модели ГТД в физические параметры, передаваемые в топливный регулятор. В соответствии с заданным режимом топливный регулятор дозирует топливо, сливаемое затем в закольцованную топливную систему. Сигнал измеренного расхода топлива передаётся в модель ГТД.

При полунатурных стендовых испытаниях топливных регуляторов (дозаторов топлива) совместно моделью ГТД в контуре обратной связи возникают вопросы его оптимального регулирования (отладки) в соответствии с заданными техническими условиями. Отладка топливного регулятора (дозатора топлива) осуществляется путём изменения положения регулировочных элементов (регулирующих винтов), установленных на его внешней поверхности, а также с помощью изменения параметрических характеристик электронной или электронно-гидравлической САУ ГТД. Фиксация положения регулировочных элементов выполняется контрящими элементами

ми. Отладка топливного регулятора выполняется как вручную, так и в автоматическом режиме с использованием механизмов перемещения регулировочных и контрящих элементов. При этом в качестве последовательности выполняемых операций могут быть использованы типовые операции отладки, отладка на основе регрессионной модели, эталонной либо оптимизированной модели всережимного топливного регулятора (дозатора топлива) [2].

При этом использование сложного математического аппарата моделирования характеристик и идентификации реальных параметров часто не даёт удовлетворительного результата при последующей эксплуатации топливного регулятора (дозатора топлива), установленного на ГТД. Для гарантии обеспечения заданных параметров регулирования топливного регулятора (дозатора топлива) проводят длительные испытания, по результатам которых судят о надёжности и пригодности ТРА.

Одним из наиболее действенных способов обеспечения безаварийной эксплуатации ТРА ГТД является применение прогнозирующего контроля его надёжности и состояния [3]. По результатам длительных испытаний предсказание технического состояния ТРА обеспечивает её последующее рациональное использование и даёт возможность перейти к обслуживанию ТРА по состоянию. В основу прогнозирования состояния положен тот факт, что сами изменения состояния ТРА вызываются плавными изменениями её параметров, которые могут быть зарегистрированы средствами измерения. Основными же причинами дрейфа параметров ТРА, как показывает опыт эксплуатации, контроля и ремонта, являются процессы старения и износа. Именно эти процессы, идущие на молекулярном уровне, могут приводить к ситуациям, когда значение того или иного параметра выйдет за пределы допуска. Наблюдения за процессами дрейфа параметров в ходе длительных испытаний и последующая обработка результатов этих наблюдений при решении задачи прогноза обеспечивают сохранение работоспособности ТРА, позволяют своевременно принимать меры по предупреждению её повреждений и отказов во время эксплуатации.

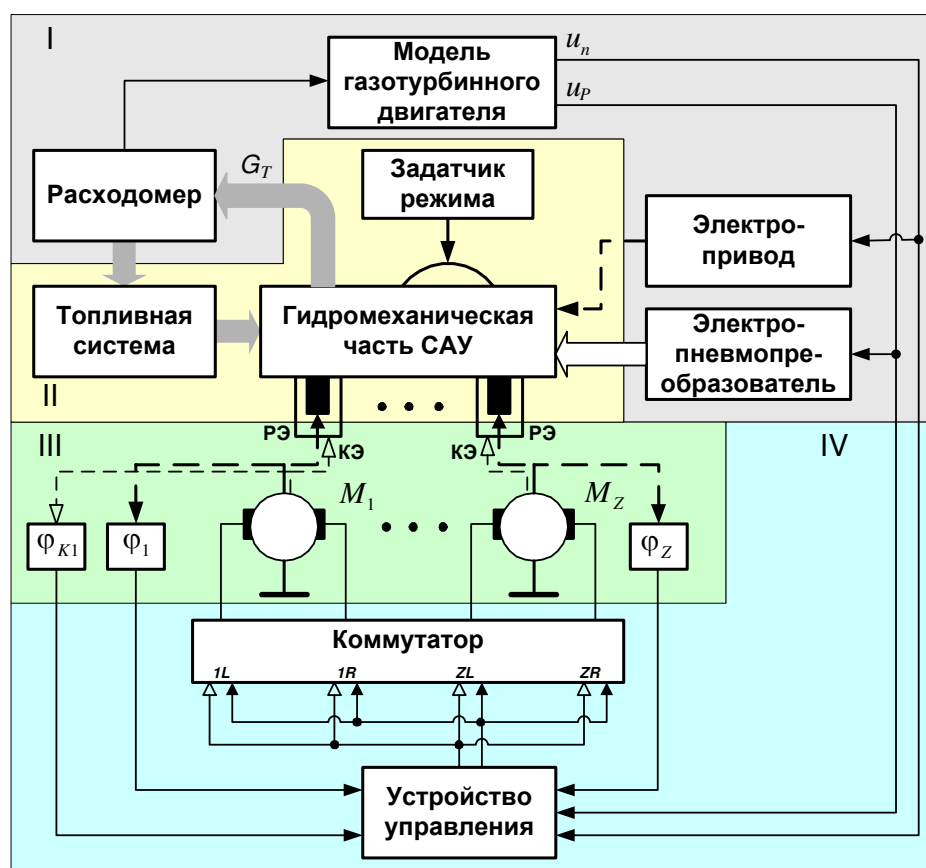


Рис. 1. Полунатурный стенд для испытания ТРА ГТД
 I – полунатурная модель ГТД; II – гидромеханическая часть САУ;
 III – исполнительные механизмы перемещения регулировочных и контртящих элементов;
 IV – система управления исполнительными механизмами
 РЭ и КЭ – регулировочный и контртящий элемент, M – двигатели постоянного тока,
 φ и φ_K – углы поворота регулировочных и контртящих элементов, u_n , u_p – сигналы управления электроприводом и электропневмопреобразователем, G_T – расход топлива

Прогнозирование состояния ТРА. Для практической реализации прогнозирующего контроля необходимо оценивать техническое состояние ТРА, иначе говоря, использовать модель ТРА в некотором пространстве функционирования. Поскольку ТРА достаточно полно характеризуется определённой совокупностью свойств (параметров), то набор (вектор) этих параметров $\vec{y} = \{y_i\}_{i=0}^n$, где n – число параметров, описывающих свойства ТРА, можно использовать для описания технического состояния. Указанный набор состоит из выходных и определяющих координат ТРА, при этом $\vec{y} \in Y$, где Y – множество, в котором $\vec{y}$ принимает свои значения.

В течение длительных испытаний $t \in T$ (T – период эксплуатации) и последующей эксплуатации состояние ТРА под воздействием дестабилизирующих факторов меняется

случайным образом. Отсюда следует, что поведение ТРА на множестве T описывается случайным процессом $\vec{y}(t, \psi)$, $t \in T$, $\psi \in \Psi$, где Ψ – множество элементарных событий. На вероятностном пространстве (Ψ, F, P) , где F – алгебра подмножества множества Ψ , P – вероятностная мера, случайную векторную функцию $\vec{y}(t) = \{y_i(t)\}_{i=0}^n$ можно принять за искомую модель ТРА. Следует отметить, что длина набора $\{y_i(t)\}_{i=0}^n$ может быть единичной, когда состояние ТРА характеризуется только одним параметром y , например, заданным расходом топлива G_T . Вопрос о выборе совокупности координат, с достаточной полнотой отражающей свойства ТРА, решается в каждом случае индивидуально, исходя из конструкции, эксплуатационных характе-

ристик, назначения, специфики работы и других показателей ТРА.

В рамках принятой модели ТРА задача прогнозирования дрейфа параметров является задачей прогнозирования случайного процесса $\bar{y}(t)$. Суть указанной задачи состоит в предсказании траектории движения $\bar{y}(t)$ на множестве T . Информационной основой для её решения служат некоторые априорные сведения, а также данные контрольных измерений $\bar{y}(t)$ при длительных испытаниях ТРА. Совокупность априорных сведений чаще всего ограничивается описанием некоторых структур, пригодных в качестве модели $\bar{y}(t)$. Параметрические характеристики таких структур редко бывают известны. Для объектов, относящихся к ТРА, наиболее типичным является представление $\bar{y}(t)$ как

$$\bar{y}(t) = A \cdot \bar{\varphi}(t), \quad (1)$$

где $A = ||a_{ij}||$ – матрица случайных коэффициентов размером $(n+1) \times (m+1)$, $i = 0, \dots, n$, $j = 0, \dots, m$, m – размер вектора $\{a_j(t)\}_{j=0}^m$ случайных коэффициентов непрерывно дифференцируемых детерминированных функций времени $\bar{\varphi}(t) = \{\varphi_j(t)\}_{j=0}^m$. Описание $\bar{y}(t)$ в виде (1) можно рассматривать как разложение случайного процесса по детерминированному базису. Справедливость такого представления следует из физической природы процессов старения, износа, происходящих в ТРА, и подтверждается данными имеющейся статистики. Информационная полнота этих данных зависит от многих факторов и, в частности, от таких характеристик как достоверность и форма осуществления контроля.

Влияние окружающей среды, несовершенство средств измерения, недостаточная квалификация обслуживающего персонала приводят к тому, что значение результата измерения отличается от истинного на некоторую случайную величину $\bar{\varepsilon}(t)$ – ошибку измерения, то есть $\bar{z}(t) = \bar{y}(t) + \bar{\varepsilon}(t)$, где $\bar{z}(t)$ – результат измерения $\bar{y}(t)$. Мерой точности (прецизионности) служат статистические характеристики $\bar{\varepsilon}(t)$, при этом обычно полагают, что ошибки измерения независимы и распределены по нормальному закону [4]. В слу-

чае неправомерности нормального закона распределения ошибок измерения с вероятностью не ниже заданной P_0 можно указать пределы, в которых лежит случайная погрешность $\bar{\varepsilon}(t)$, то есть $P(\bar{\varepsilon}(t) < \bar{\Delta}(t)) \geq P_0, t \in T$. Предельная ошибка $\bar{\Delta}(t)$ служит заданным показателем точности.

По форме выполнения различают непрерывные и дискретные по времени измерения. На практике возможности проведения непрерывных измерений $\bar{y}(t)$ ограничены вследствие большой трудоёмкости и дороговизны. Чаще встречаются дискретные по времени измерения как более простые и дешёвые. Результатом таких измерений является последовательность $\bar{z}(t), t \in T_u \subset T$, где T_u – период испытаний.

При этом информационная полнота данных измерений ограничена следующим:

- измерение производится со случайной ошибкой $\bar{\varepsilon}(t)$, для оценки влияния которой можно использовать дисперсию $D[\bar{\varepsilon}(t)]$, либо предельную ошибку измерений;

- возможно только дискретное по времени измерение, в результате которого определяется последовательность $\bar{z}(t), t \in T_u \subset T$.

Установленный уровень информационной полноты характеризует условия, из которых целесообразно исходить при решении задачи прогнозирования $\bar{y}(t)$.

Алгоритм решения задачи прогнозирования изменения параметров ТРА можно построить на основе существующих статистических методов (метода наименьших квадратов, максимального правдоподобия и т.п.). Однако для практического применения статистических методов необходимо задаться некоторыми вероятностными характеристиками ошибок измерений и модели случайного процесса $\bar{y}(t)$. В действительности фактические значения этих характеристик не совпадают с прогнозируемыми, что может привести к снижению точности получаемых результатов по сравнению с теоретическими оценками. На точность решения рассматриваемой задачи влияют и погрешности модельных зависимостей [5]. В результате измеренные данные содержат и ошибки модели. Эти ошибки нельзя рассматривать как случайные и поэтому с ними нельзя оперировать как со случайными величинами. Решение задачи про-

гноза в таких условиях с помощью статистических методов может привести к неоправданно оптимистическим оценкам $\bar{y}(t)$. Если фактическое состояние ТРА окажется хуже предсказанного, то конечная цель прогнозирования – обеспечение эксплуатационной работоспособности ТРА не может быть полностью достигнута [6]. Значительно меньшую опасность представляет получение пессимистических (гарантированных) оценок $\bar{y}(t)$. Использование результатов гарантированного прогноза при определении рационального режима эксплуатации ТРА обеспечивает своевременное принятие мер по предупреждению её повреждений и отказов в условиях ограниченности исходных данных.

Применительно к модели $\bar{y}(t)$ вида (1) в этом случае известен только детерминированный базис $\{y_j(t)\}_{j=0}^m$, а для ошибок измерения $\bar{\varepsilon}(t)$ задана лишь область их возможных значений E (значения предельных ошибок $\bar{\Delta}_t$), то есть $\bar{\varepsilon}_t \in E$, $t \in T_u \subset T$. Для решения задачи прогнозирования может быть применён метод экстремального (гарантированного) оценивания [7], пригодный для использования в условиях ограничения исходных данных. Применение данного метода наиболее полно обеспечивает использование исходной информации при гарантированной достоверности и точности результатов прогноза. При разработке прогноза отсутствует необходимость в использовании стохастических свойств ТРА, определяемых как собственными параметрами, так и параметрами ГТД и подключённых к ТРА агрегатов.

Суть экстремального оценивания состоит в определении гарантированных пределов изменения оцениваемой величины $\bar{y}(t)$ при $t \in T_u \subset T$, то есть на получение интервальной оценки $\bar{y}(t)$. Интервальный прогноз $\bar{y}(t)$ также может быть выполнен и с помощью статистических методов, однако его достоверность невозможно гарантировать без рассмотрения гипотез о стохастических свойствах $\bar{y}(t)$ и ошибок измерений $\bar{\varepsilon}(t)$ [8].

Рассмотрим теоретические предпосылки использования метода экстремального оценивания в ситуации, когда техническое состояние ТРА характеризуется одним параметром $y(t)$, например, расходом топлива G_T . Тогда область возможных значений ошибки измерения можно представить как $[\Delta_{1t}, \Delta_{2t}]$, где Δ_{1t}, Δ_{2t} – предельные границы для $\varepsilon(t)$ при

$$t \in T_u \subset T, \quad \text{а} \quad y(t) = \sum_{j=0}^m a_j(t) \varphi_j(t), \quad \text{где}$$

$\{a_j(t)\}_{j=0}^m$ – случайные коэффициенты;

$\{\varphi_j(t)\}_{j=0}^m$ – непрерывные детерминированные функции. По результатам измерений случайного процесса $y(t)$ на интервале времени $T_u \subset T$ можно записать систему неравенств

$$z_t - \Delta_{1t} \leq y_t \leq z_t + \Delta_{2t}, \quad t \in T_u \subset T, \quad (2)$$

где z_t – результат измерения $y(t)$ в момент $t \in T_u$. С учетом заданной модели $y(t)$ неравенства (2) принимают вид

$$\bar{z} - \bar{\Delta}_{1t} \leq \mathbf{A} \cdot \varphi \leq \bar{z} + \bar{\Delta}_{2t}, \quad (3)$$

где $\bar{z} = \{z_t\}$, $\bar{\Delta}_{1t} = \{\Delta_{1t}\}$, $\bar{\Delta}_{2t} = \{\Delta_{2t}\}$, $t = t_0, t_1, \dots, t_k$; $\mathbf{A} = \{a_j(t_l)\}_{j=0}^m$; $\varphi = \{\varphi_j(t_l)\}$, $l = 0, \dots, k$, $t_l \in T_u \subset T$, φ – матрица значений функций $\{\varphi_j(t_l)\}_{j=0}^m$ в точках измерения $y(t)$, k – общее число измерений функции $\{\varphi_j(t_l)\}_{j=0}^m$ в моменты времени t_l .

Полученная система неравенств (3) определяет область возможных значений коэффициентов $\{a_j(t_l)\}_{j=0}^m$, построенную по наблюдениям $\bar{z}$, в пространстве $\mathbf{R}^{m+1}$. Данная область образована пересечением двух полупространств размерностью $(k+1)$, каждое из которых описано частью неравенства (3),

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_1 \cap \mathbf{L}_2,$$

$$\mathbf{L}_1 = \{\vec{A} \in \mathbf{R}^{m+1} : \vec{z} - \vec{\Delta}_1 \leq \vec{A} \cdot \vec{\varphi}\}, \quad \mathbf{L}_1 = \bigcap_{l=0}^k L_{1l},$$

$$L_{1l} = \{\vec{A} \in \mathbf{R}^{m+1} : (\vec{A}, \vec{\varphi}_l) \geq z(t_l) - \Delta_1(t_l)\}, \quad \vec{\varphi}_l = \{\varphi_j(t_l)\}_{j=0}^m;$$

$$\mathbf{L}_2 = \{\vec{A} \in \mathbf{R}^{m+1} : \vec{z} + \vec{\Delta}_2 \geq \vec{A} \cdot \vec{\varphi}\}, \quad \mathbf{L}_2 = \bigcap_{l=0}^k L_{2l},$$

$$L_{2l} = \{\vec{A} \in \mathbf{R}^{m+1} : (\vec{A}, \vec{\varphi}_l) \leq z(t_l) + \Delta_2(t_l)\}, \quad \vec{\varphi}_l = \{\varphi_j(t_l)\}_{j=0}^m.$$

Область $\mathbf{L}$ представляет собой выпуклый многогранник. В пространстве $\mathbf{R}^{m+1}$ область $\mathbf{L}$ выделяет все наборы коэффициентов $\{a_j(t)\}_{j=0}^m$, с которыми реализации $y(t)$ могут быть измерены в моменты времени t_l . Тогда в области $\mathbf{L} \subset \mathbf{R}^{m+1}$ могут быть найдены гарантированные относительно наблюдений $\vec{z}$ пределы изменения $\{a_j(t)\}_{j=0}^m$. Поиск указанных пределов можно осуществить, решая $2(m+1)$ задач линейного программирования

$$1) a_j = \max, j = 0, \dots, m,$$

$$2) a_j = \min, j = 0, \dots, m$$

при ограничениях области $\mathbf{L}$, то есть координаты всех точек этой области должны удовлетворять неравенствам $|a_j| \leq d$, где d – некоторое положительное число; $k \geq m$; $|z_t| \leq \infty$, $t_l \in T_w$, где $(k+1)$ – число измерений в моменты времени t_l .

Данный способ приемлем для нахождения векторов $\vec{P} = \{p_j\}_{j=0}^m$ и $\vec{Q} = \{q_j\}_{j=0}^m$, где

$$p_j = \min_{a_j} \mathbf{L}, \quad q_j = \max_{a_j} \mathbf{L}, j = 0, \dots, m, \text{ если } \vec{P}$$

и $\vec{Q}$ используют для определения гарантированных пределов изменения $y(t)$ или определения всех $p(t) \leq y(t) \leq q(t)$, $t \in T_u \subset T$. Каждой точке области $\mathbf{L}$ соответствует определенный вектор коэффициентов $\vec{A} = \{a_j(t)\}_{j=0}^m$, при этом функции

$$p(t) \sum_{j=0}^m p_j \varphi_j(t) \text{ и } q(t) \sum_{j=0}^m q_j \varphi_j(t) \text{ можно рас-}$$

сматривать как пределы изменений $y(t)$, $t \in T_u \subset T$. При этом выполняется аппроксимация выпуклого многогранника $\mathbf{L}$ в виде гиперпараллелепипеда $\mathbf{L}_1$ и $\mathbf{L}_2$ (рис. 2).

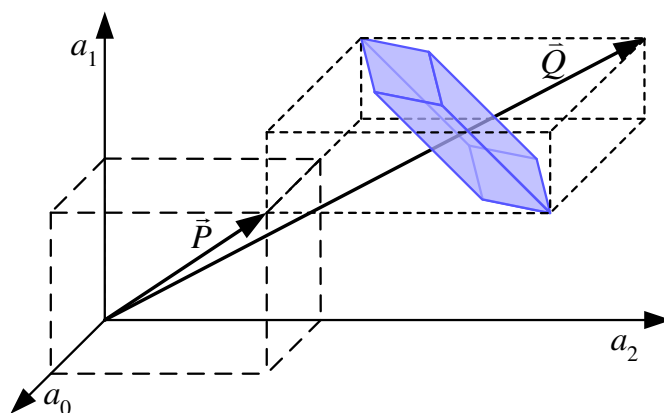


Рис. 2. Аппроксимация выпуклого многогранника $\mathbf{L}$ параллелепипедом $\mathbf{L}_1$

Представление ограничений $y(t)$,
 $t \in T > T_u$ в виде $p(t) = \sum_{j=1}^m p_j \varphi_j(t)$ и

$q(t) = \sum_{j=1}^m q_j \varphi_j(t)$ содержит не только реали-

зации $y(t)$, для которых справедливо неравенство (2), но и такие, для которых оно выполняется частично. Высокая трудоемкость и сложность вычисления $p(t)$ и $q(t)$ ограничивает возможность их использования для решения задачи прогноза $y(t)$. Более точно пределы изменения $y(t)$, $t \in T > T_u$ можно описать согласно свойствам детерминированного базиса $\{\varphi_j(t)\}_{j=0}^m$ модели (1), путем построения экстремальных полиномов Карлина [7]. Эти полиномы обладают полезным с точки зрения гарантированного прогноза свойством, а именно: на интервале времени $T_u \subset T$ они удовлетворяют неравенствам (2), а на интервале времени $T > T_u$ являются предельными для тех реализаций $y(t)$, которые также удовлетворяют всем неравенствам (2).

Класс функций $\{\varphi_j(t)\}_{j=0}^m$, используемых на практике для аппроксимации случайных процессов эксплуатационных изменений параметров ТРА, достаточно ограничен. Обычно $\{\varphi_j(t)\}_{j=0}^m$ – непрерывно дифференцируемые функции, образующие систему Чебышева [9]. Реальные процессы дрейфа параметров ТРА отличаются большой инерционностью, при стабильных условиях в них отсутствуют резкие изменения [3]. Среди функций рассматриваемого вида наиболее часто для описания $y(t)$ используются степенные или экспоненциальные, т.е. наборы типа $\{t^j\}_{j=0}^m$ и $\{e^{\alpha_j t}\}_{j=0}^m$, где α_j – показатель распределения.

Принадлежность $\{\varphi_j(t)\}_{j=0}^m$ к классу непрерывно дифференцируемых функций можно использовать для нахождения пределов изменения $y(t)$, $t \in T > T_u$. По результатам измерения $y(t)$ при $t \in T_u \subset T$ могут быть найдены экстремальные полиномы $y(t)_-$ и $y(t)_+$, для которых гарантированно выполня-

ется $y(t)_- \leq y(t) \leq y(t)_+$ (2), $t \in T_u \subset T$. При этом область $[y(t)_-, y(t)_+]$ является наименьшей из допустимых, содержащих все возможные результаты наблюдений $\bar{z}$ реализаций $y(t)$.

Определение $y(t)_-$ и $y(t)_+$ возможно с помощью линейного программирования

$$\begin{aligned} 1) \sum_{j=0}^m a_j (t^*)_{j(t^*)} &= \max, \\ 2) \sum_{j=0}^m a_j (t^*)_{j(t^*)} &= \min \end{aligned} \quad (4)$$

при ограничениях (2), где t^* – любая фиксированная точка из $T > T_u$ (возможность использования произвольной точки из $T > T_u$ вытекает из экстремальности $y(t)_-$ и $y(t)_+$ на $T > T_u$).

Применение экстремальных полиномов $y(t)_-$ и $y(t)_+$ для прогнозирования $y(t)$ по сравнению с использованием функций $p(t)$ и $q(t)$ обеспечивает следующие преимущества:

- трудоёмкость вычисления $y(t)_-$ и $y(t)_+$ в m раз меньше (m – размер детерминированного базиса модели $y(t)$);

- область $[y(t)_-, y(t)_+]$, $t \in T > T_u$ содержит только возможные относительно результатов наблюдения $\bar{z}$ реализации $y(t)$.

Алгоритм прогнозирования изменения параметров ТРА на основе решения (4) может быть представлен в следующем виде:

- 1) на интервале времени $T_u \subset T$ производится k контрольных измерений $y(t)$, причём $k \geq m$;

- 2) данные измерения используются для построения $y(t)_-$ и $y(t)_+$ путём решения задачи (4).

В ходе реализации алгоритма определяют пределы изменения $y(t)$, $t \in T_u \subset T$ (экстремальные полиномы $y(t)_-$ и $y(t)_+$) с помощью линейного программирования (4).

Рассмотрим пример определения гарантированного технического состояния ТРА, найденного с помощью приведённого выше теоретического обобщения.

Результаты изменения выходного параметра ТРА (расхода топлива G_T [л/час]) при заданном угле поворота рычага управления

двигателем (α_{pyd}) и частоте вращения ротора ГТД (n) можно аппроксимировать линейной зависимостью $G_T = G_{T0} + G_{T1} \cdot t$, где G_{T0} , G_{T1} – случайные параметры. Результаты измерения $G_T(t)$ показали, что в моменты времени $t_1 = 100$ час. и $t_2 = 200$ час. $G_T(t_1) = 330 \pm \varepsilon$, $G_T(t_2) = 331 \pm \varepsilon$, где $|\varepsilon| \leq 3,2$ – погрешность измерения. Требуется определить техническое состояние ТРА в момент времени $t_3 = 6000$ час. и после измерения расхода топлива в этот момент времени дать прогноз о поведении G_T при $t_4 = 12000$ час.

Ввиду малости интервала $\Delta t = t_2 - t_1$, по которому осуществляют прогноз на длительный период времени, и для улучшения сходимости алгоритма прогнозирования в качестве аргумента функции $\varphi_j(t)$ используем $\lg t$. Решив исходную систему уравнений 1) для положительного и отрицательного значения ошибки ε получим 2), 3)

$$1) \begin{cases} 330 = G_{T0} + G_{T1} \cdot \lg t_1, \\ 331 = G_{T0} + G_{T1} \cdot \lg t_2; \end{cases}$$

$$2) \begin{cases} 326,8 = G'_{T0} + G'_{T1} \cdot \lg t_1, \\ 334,2 = G'_{T0} + G'_{T1} \cdot \lg t_2; \end{cases}$$

$$3) \begin{cases} 333,2 = G''_{T0} + G''_{T1} \cdot \lg t_1, \\ 327,8 = G''_{T0} + G''_{T1} \cdot \lg t_2 \end{cases}$$

и соответствующие экстремальные значения G_T :

$$G_{T+} = 277,6 + 24,58 \cdot \lg t; \quad G_{T-} = 369,1 - 17,94 \cdot \lg t.$$

Согласно данным уравнениям величина $G_T(t_3)$ будет находиться в диапазоне [301,3; 370,5], $G_T(t_4)$ – в диапазоне [295,9; 377,9].

Результат последующего измерения $G_T(t_3)$ составил 315 л/час., что соответствовало первоначальному прогнозу. По результатам измерения $G_T(t_3)$ составлен новый прогноз для расхода топлива $G_T(t_4)$:

$$\begin{cases} 326,8 = G'_{T0} + G'_{T1} \cdot \lg t_1, \\ 318,2 = G'_{T0} + G'_{T1} \cdot \lg t_3; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 333,2 = G''_{T0} + G''_{T1} \cdot \lg t_1, \\ 311,8 = G''_{T0} + G''_{T1} \cdot \lg t_3 \end{cases}$$

и получены соответствующие экстремальные значения G_T :

$$G_{T+} = 336,5 - 4,84 \cdot \lg t; \quad G_{T-} = 357,3 - 12,04 \cdot \lg t.$$

По результатам данного прогноза величина $G_T(t_4)$ будет находиться в диапазоне [308,2; 316,7]. Последующий результат измерения расхода топлива составил $G_T(t_4) = 310 \pm \varepsilon$, то есть результат измерения соответствовал предсказанному. Используя полученный результат можно продолжить процесс прогнозирования, для этого составляют новые системы уравнений:

$$\begin{cases} 326,8 = G'_{T0} + G'_{T1} \cdot \lg t_1, \\ 313,2 = G'_{T0} + G'_{T1} \cdot \lg t_4; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 333,2 = G''_{T0} + G''_{T1} \cdot \lg t_1, \\ 306,8 = G''_{T0} + G''_{T1} \cdot \lg t_4 \end{cases}$$

и определяют соответствующие экстремальные значения G_T :

$$G_{T+} = 339,9 - 6,54 \cdot \lg t; \quad G_{T-} = 358,6 - 12,70 \cdot \lg t.$$

На основании приведённых расчётов можно отметить, что использование результатов дополнительных измерений повышает точность процедуры прогнозирования. Результаты построения расчетов экстремальных полиномов приведены на рис. 3.

Приведенный метод гарантированного прогноза удовлетворяет следующим требованиям:

- выполнение условий несмещённости и сходимости прогноза;
- однозначность результата прогноза;
- минимальная сложность при наличии малого количества измерений.

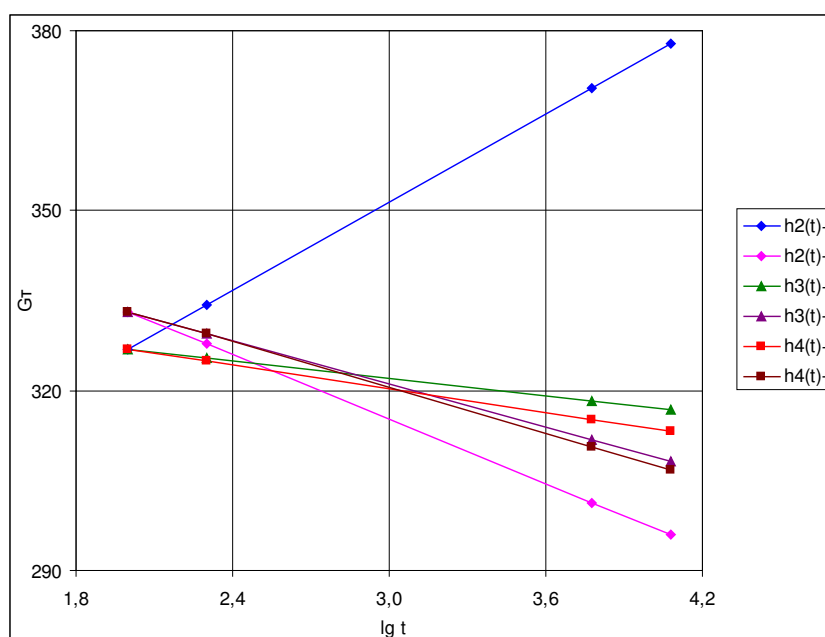


Рис. 3. Результаты построения экстремальных полиномов

Выводы

1. В предположении малости ошибок измерения результат прогноза стремится к истинному значению прогнозируемого параметра, то есть выполняется условие однозначности, несмещённости и сходимости метода прогнозирования.

2. Для обеспечения несмещённости и сходимости прогноза при реализации метода в качестве аргумента экстремальных функций предпочтительным является использование логарифмической функции времени.

3. Метод прогноза имеет оптимальную сложность при минимуме полученной измерительной информации.

4. Однопараметрическое гарантированное прогнозирование является эффективным инструментом обработки результатов измерения, полученных в ходе длительных испытаний ТРА ГТД и последующих плановых испытаний, для обеспечения надёжной эксплуатации системы «ТРА – ГТД».

Библиографический список

1. Шендалева, Е. В. Технология регулирования топливной аппаратуры систем автоматического управления газотурбинных двигателей с использованием моделирующих стендов / Е. В. Шендалева, В. В. Жильцов, В. Ю. Тэттер // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 7. – С. 15 – 21.
2. Жильцов, В. В. Новый метод настройки дозаторов топлива систем автоматического управления газотурбинных установок / В. В. Жильцов, Е. В.

Шендалева // Омский научный вестник. – 2001. – Вып. 17. – С. 95 – 97.

3. Дружинин, Г. В. Надёжность автоматизированных систем. – 3-е изд., перераб. и доп. / Г. В. Дружинин. – М. : Энергия, 1977. – 535 с.

4. Боровиков, В. П. Прогнозирование в системе STATISTICA® в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере : учеб. пособие / В. П. Боровиков, Г. И. Ивченко – М. : Финансы и статистика, 2006. – 384 с.

5. Методы оптимизации испытаний и моделирования систем управления газотурбинными двигателями / В. Т. Дедеш, В. М. Герман, В. Г. Августиневич и др. ; под общ. ред. В. Т. Дедеша. – М. : Машиностроение, 1990. – 160 с.

6. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей : монография / А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, Д. В. Павленко, С. А. Субботин ; под ред. Д. В. Павленко, С. А. Субботина. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2009. – 468 с.

7. Карлин, С. Математические методы в теории игр, программировании и экономике / С. Карлин ; пер. с англ. Н. А. Бодина, Л. И. Горькова и др. – М. : Мир, 1964. – 840 с.

8. Худсон, Д. Статистика для физиков: Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике. – 2-е доп. изд. / Д. Худсон ; пер. с англ. В.Ф.Грушина ; под ред. Е. М. Лейкина. – М. : Мир, 1970. – 296 с.

9. Карлин, С. Чебышевские системы и их применение в анализе и статистике / С. Карлин, В. Стадден ; пер. с англ. под ред. С.М. Ермакова. – М. : Наука, 1976. – 568 с.

EXTREME FORECASTING FOR UNIVERSAL CONTROL FUEL PUMP AND GAS TURBINE ENGINE IN SERVICE OBTAINING FOR A LONG TIME TRIALS

Elena V. Shendaleva

The summary: The article has considered the problem of technical state forecasting for universal control fuel pump and gas turbine engine in service. The subject matter of this article is the analysis of extreme forecasting method application for providing the assured forecasting of fuel pump technical state. This method makes it possible to forecast technical state with using of measurements results, obtaining for a long time trials of universal control fuel pump on half-natural model test stand and during subsequent planned tests. The forecasting has been performed without statistic distribution analysis of measurements results. The results of investigation may be used for forecasting of different technical system states.

Keywords: universal control fuel pump, gas turbine engine, half-natural model test stand, technologic forecasting.

References

1. Shendaleva E. V., Zhiltsov V. V., Tetter V. Y. The fuel apparatus adjustment technology for automatic control systems of gas turbine engines with model stands using. *Assembling in mechanical engineering and instrument making*, 2005, no 7, pp. 15-21.
2. Zhiltsov V. V., Shendaleva E. V. The new method of fuel dose pump adjustment for automatic control system of gas turbine equipment. *Omsk nauchny vestnik*, 2001, vol. 17, no. 1, pp. 95-97.
3. Druzhinin G. V. *Nadjozhnost avtomatizirovannykh sistem* [Reliability of computer-aided systems]. Moscow, Energia, 1977. 535 p.
4. Borovikov V. P. *Prognozirovanie v sisteme STATISTICA® v srede Windows: Osnovi teorii i intensivnaja praktika na kompjutere* [Forecasting at STATISTICA® system in Windows medium. Fundamentals of theory and intensive practice on computer]. Moscow, Finansy i statistika, 2006. 384 p.
5. Dedehs V. T., German V. M., Avgustovich V. G., Arhipov G. N., Bereznjakov S. V., Pipekin V. I., Rakitin M. M., Ryzhov I. D., Sakhautdinov V. N., Smolko V. V., Tchervonjuk V. V. *Metody optimizatsii ispytaniij i modelirovanija sistem upravlenija gazoturbinnymi dvigateljami* [The trial and simulation optimization methods of gas turbine engine control systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 160 p.
6. Boguslaev A. V., Olejnik Al A., Olejnik An A., Pavlenko D. V., Subbotin S. A. *Progressivnye tekhnologii modelirovanija, optimizatsii i intellektualnoj avtomatizatsii etapov zhiznennogo tsikla aviatsionnykh dvigatelej* [The simulation, optimization and intellectual automation progressive technologies at aeroengine life cycle stage]. Zaporozhje, 2009. 468 p.
7. Karlin Samuel. *Mathematical methods and theory in games, programming, and economics*. Stanford University, Pergamon Press, London – Paris, 1959. 840 p.
8. Hudson Derek J. *Statistics: Lectures on Elementary Statistics and Probability*. Geneva, 1964. 296 p.
9. Karlin Samuel, Studden William J. *Tchebycheff systems: with applications in analysis and statistics*. Interscience publishers A. Division of John Wiley&Sons, New York, London, Sydney, 1969. 568 p.

Шендалева Елена Владимировна (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Нефтегазовое дело» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» (644050, г. Омск, пр. Мира, 11, e-mail: shendalevaev@yandex.ru).

Elena V. Shendaleva (Omsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Oil&Gas Busyness, Omsk State Technical University (644050, Mira prospect, 11, Omsk, Russian Federation, e-mail: shendalevaev@yandex.ru).