

УДК 621.45.018.2

ОТЛАДКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Е.В. Шендалева

ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема оптимальной отладки гидромеханической части (ГМЧ) систем автоматического управления (САУ) газотурбинных двигателей (ГТД), выполняемой на полунатурных моделирующих стендах в темпе испытаний. Основное содержание исследования составляет решение задачи построения полунатурных испытательных стендов, максимально приближенных к условиям эксплуатации ГМЧ САУ ГТД. Рассмотрена оптимальная отладка ГМЧ САУ на основе функций А.М. Ляпунова, используемых в качестве интегральных критериев. Приведен метод гарантированного прогнозирования технического состояния ГМЧ САУ, описываемого вектором измеряемых параметров. Результаты исследования могут быть использованы для отладки и прогнозирования состояния различных технических систем.

Ключевые слова: система автоматического управления, газотурбинный двигатель, топливный регулятор, полунатурный испытательный стенд, прогнозирование технического состояния, математическое программирование.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях широкого применения газотурбинных двигателей в различных отраслях промышленности – в авиации, судостроении, топливно-энергетическом комплексе, на железнодорожном транспорте, – непрерывно возрастают требования к надежности ГТД и стабильности их эксплуатационных характеристик. Усложнение систем автоматического управления, в частности их гидромеханической части, связано с увеличением количества регулируемых переменных, участвующих в задании режима работы ГТД, и, как следствие, с увеличением числа структурных элементов, реализующих процесс автоматического управления. В связи с этим актуальность исследования и освоения новых эффективных технологий испытаний и отладки САУ ГТД не вызывает сомнения.

ОТЛАДКА САУ ГТД

Критерием достижения заданных технических характеристик согласованной работы ГТД и САУ могут служить результаты испытаний агрегатов САУ на полунатурном моделирующем испытательном стенде, используемом для приближения условий испытания агрегатов САУ к условиям их эксплуатации, а также для снижения затрат на совместные испыта-

ния ГТД и САУ. Испытания и отладка агрегатов САУ на таком стенде позволяют контролировать статические и динамические характеристики совместной работы ГТД и САУ, а также производить отладку ГМЧ совместно с электронным регулятором (моделью электронного регулятора), тем самым, обеспечивая безопасность эксплуатации ГТД и воздушных судов. По результатам контрольных испытаний, а особенно – по результатам длительных и ускоренных испытаний, возможна разработка прогноза параметрического состояния САУ.

На испытательных стендах производят отладку параметров ГМЧ САУ путём изменения положений регулирующих элементов (РЭ) и фиксации этих положений с помощью контртящих элементов (КЭ). Процесс отладки должен обеспечить номинальные значения выходных параметров ГМЧ, при этом уже ранее проведённую настройку параметров часто приходится неоднократно повторять для введения всех характеристик ГМЧ САУ в пределы допуска.

Для обеспечения оптимальных параметров настройки САУ на стенде должна быть установлена автоматизированная система управления отладкой, позволяющая выполнять последовательность операций по выбору КЭ либо РЭ и его перемещения в заданное положение. На рис. 1 представлена структурная схема полунатурного моделирующего испыта-

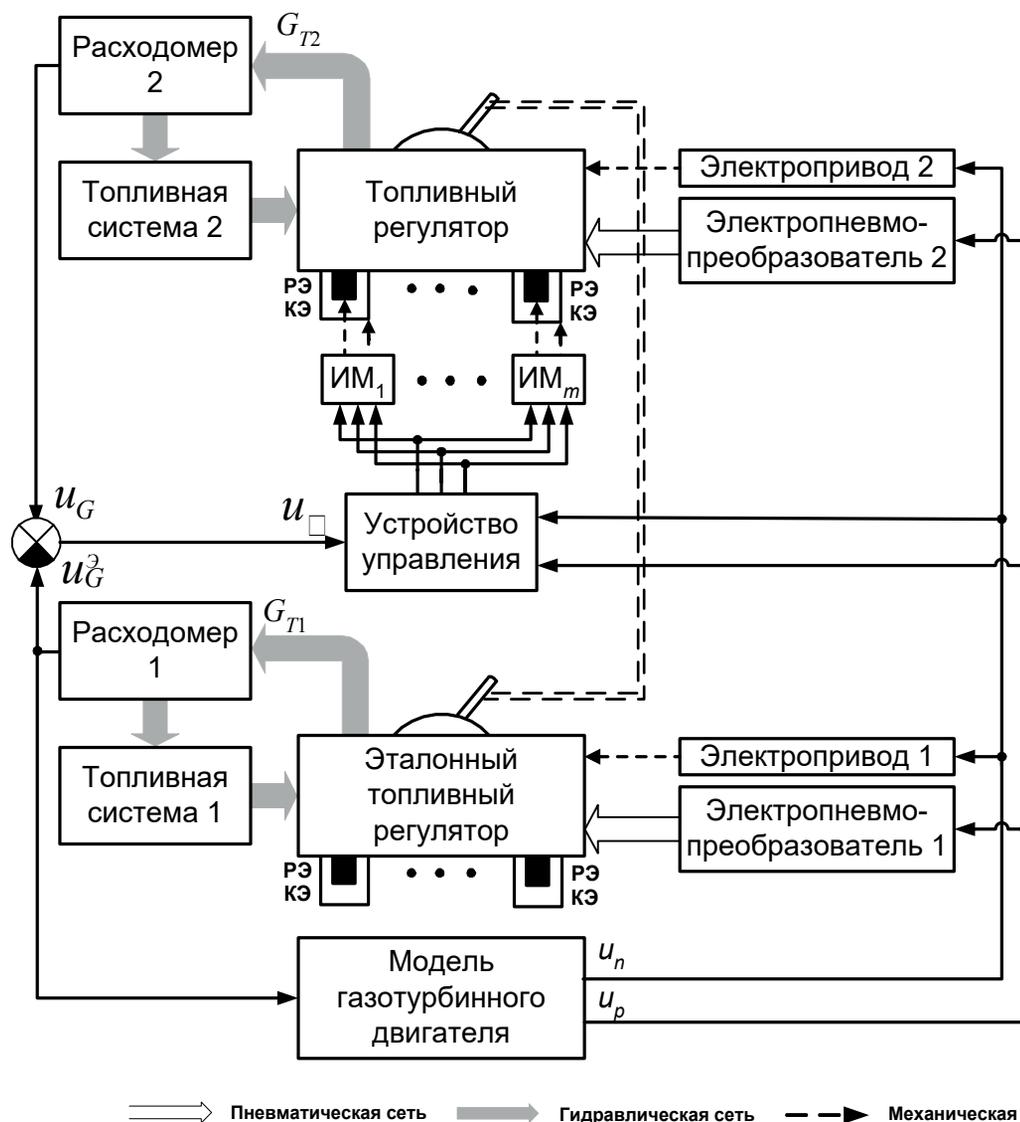


Рис. 1. Схема отладки топливного регулятора по эталонному топливному регулятору
 $ИМ_1 - ИМ_m$ – исполнительные механизмы перемещения РЭ и КЭ,
 u_n, u_p – сигналы по давлению воздуха за турбокомпрессором
 и частоте вращения рессоры топливного регулятора на выходе модели ГТД,
 u_G, u_G^3 – сигналы расхода испытуемого и эталонного топливного регулятора,
 u_ϵ – сигнал ошибки рассогласования по расходу топлива

тельного стенда для испытания ГМЧ САУ (топливного регулятора) [1]. Стенд содержит модель ГТД по контурам регулирования частоты вращения и давления воздуха за компрессором, эталонный топливный регулятор и преобразователи электрических сигналов с выхода модели ГТД в физические величины, подаваемые в топливный регулятор. На эталонном и испытуемом топливном регуляторе устанавливают один и тот же режим с помощью рычага управления двигателем ($\alpha_{руд}$). В соответствии с заданным режимом топливные ре-

гуляторы дозируют топливо, сливаемое затем в закольцованные топливные системы. Сигнал измеренного расхода топлива эталонного топливного регулятора передаётся в модель ГТД. Отладку испытуемого топливного регулятора осуществляют с использованием исполнительных механизмов перемещения РЭ и КЭ путём изменения положения РЭ до устранения рассогласования по расходу топлива между испытуемым и эталонным топливным регулятором и фиксации положения РЭ с помощью КЭ. Последовательность выполнения

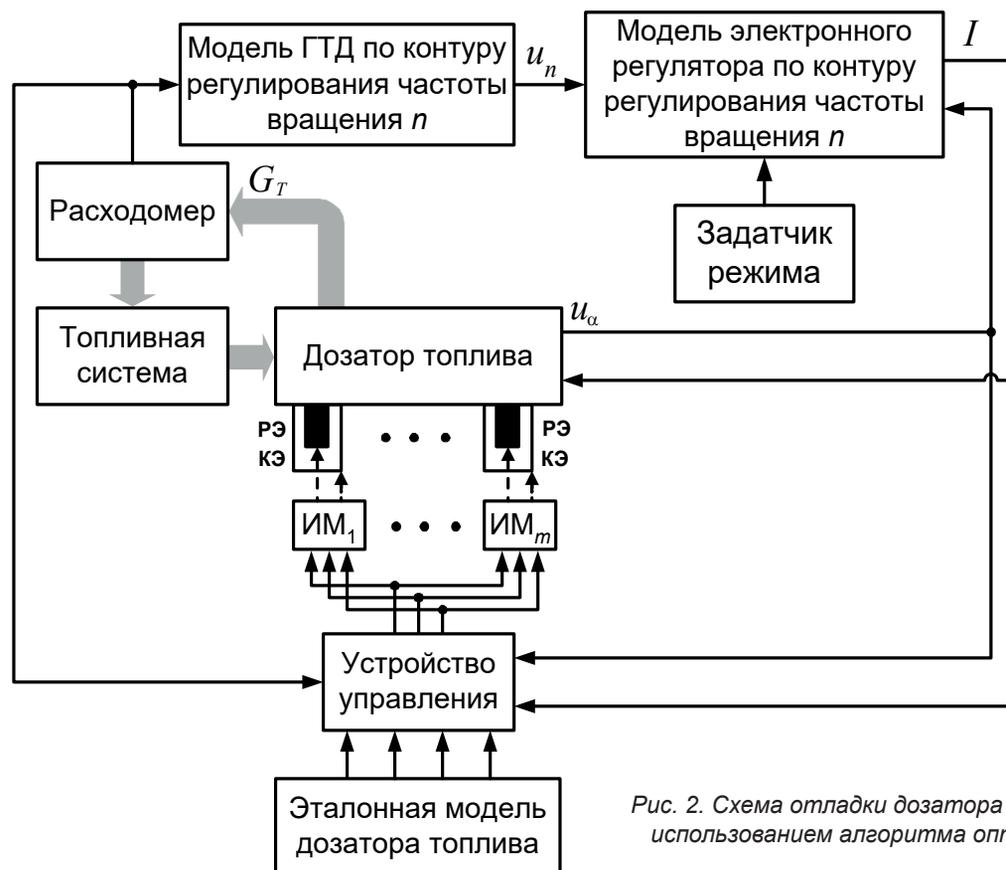


Рис. 2. Схема отладки дозатора топлива с использованием алгоритма оптимизации

операций может быть определена методикой регулировки топливного регулятора либо алгоритмами регулировки с использованием регрессионной, эталонной либо оптимизированной модели [2] топливного регулятора.

Алгоритм работы устройства управления, приводящий к устранению рассогласования ε , рассчитывают для каждого РЭ. Наиболее универсальным признан подход, основанный на применении функций А. М. Ляпунова [3]

$$V_1 = F(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, u_n, \alpha_1); V_2 = F(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, u_p, \alpha_2); \dots;$$

$$V_i = F(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, u_i, \alpha_i),$$

где α_i – параметр, характеризующий положение РЭ, например, угол поворота. При этом определяют производную по времени каждой функции А. М. Ляпунова и накладывают на неё условие неположительности $dV_i/dt \leq 0$. Затем, исходя из условий устойчивости процесса настройки, определяют алгоритм настройки в виде $\dot{\alpha}_i \geq F(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, u_n, u_p)$. Таким образом осуществляют отладку топливного регулятора по заданным параметрам u_n и u_p .

При использовании прямого метода А. М. Ляпунова по условиям устойчивости осуществляется компенсация взаимного влияния положения РЭ на выходные параметры топливного регулятора. Так как алгоритм настройки каждого РЭ будет сходящимся, то в случае одновременной настройки согласованных характеристик всех РЭ весь процесс отладки топливного регулятора будет сходящимся, устойчивым. Основным недостатком предложенного метода является возможная несогласованность характеристик различных РЭ.

Рассмотрим процесс отладки несогласованных характеристик ГМЧ на примере дозатора топлива (рис.2). Отладку дозатора топлива производят по эталонной модели дозатора, состоящей из последовательно соединённых аperiodических звеньев с передаточными функциями

$$W_1^\varepsilon(s) = \frac{k_1^\varepsilon}{T_1^\varepsilon s + 1}; W_2^\varepsilon(s) = \frac{k_2^\varepsilon}{T_2^\varepsilon s + 1};$$

$$W^\varepsilon(s) = W_1^\varepsilon(s) \cdot W_2^\varepsilon(s).$$

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

В первом звене (электромеханический исполнительный механизм) токовый сигнал I преобразуется в угол поворота α или перемещение выходного элемента исполнительного механизма; во втором звене (дозировующий узел) угол поворота α или перемещение выходного элемента исполнительного механизма преобразуется в расход топлива G_T .

Эталонная модель дозатора топлива является линейной

$$\dot{\alpha} = A^{\ominus} \cdot \alpha + B^{\ominus} \cdot I, \dot{G}_T = C^{\ominus} \cdot G_T + D^{\ominus} \cdot \alpha,$$

где $A^{\ominus}, B^{\ominus}, C^{\ominus}, D^{\ominus}$ – заданные эталонные коэффициенты.

Коэффициенты дифференциальных уравнений

$$A^{\ominus} = -1/T_1^{\ominus}; B^{\ominus} = -k_1^{\ominus}/T_1^{\ominus}; C^{\ominus} = -1/T_2^{\ominus}; D^{\ominus} = -k_2^{\ominus}/T_2^{\ominus}.$$

Реальный дозатор топлива является нелинейным непрерывным объектом

$$\dot{\alpha} = A \cdot \Psi(\alpha) + B \cdot \Phi(I), \dot{G}_T = C \cdot Q(G_T) + D \cdot U(\alpha), \quad (1)$$

где A, B, C, D – матрицы коэффициентов; $\Psi(\alpha), \Phi(I), Q(G_T); U(\alpha)$ – нелинейные функции.

Уравнение адаптивной модели идентифицируемых параметров [4, 5]

$$\dot{\alpha}^M = A^M \cdot \Psi(\alpha^M) + B^M \cdot \Phi(I), \dot{G}_T^M = C^M \cdot Q(G_T^M) + D^M \cdot U(\alpha^M), \quad (2)$$

где A^M, B^M, C^M, D^M – перестраиваемые коэффициенты, равные по окончании процесса идентификации коэффициентам уравнений, описывающих дозатор топлива; $\dot{\alpha}^M, \alpha^M, \dot{G}_T^M, G_T^M$ – выходные параметры адаптивной модели.

При вычитании из уравнений (2) уравнений (1)

$$\Delta \dot{\alpha} = \Delta A \cdot \Psi(\alpha) + A^M \cdot \Delta \Psi + \Delta B \cdot \Phi(I), \Delta \dot{G}_T = \Delta C \cdot Q(G_T) + C^M \cdot \Delta Q + \Delta D \cdot U(\alpha) + D^M \cdot \Delta U,$$

где $\Delta A = A - A^M, \Delta B = B - B^M, \Delta C = C - C^M, \Delta D = D - D^M,$

$$\Delta \alpha = \alpha - \alpha^M, \Delta \dot{\alpha} = \dot{\alpha} - \dot{\alpha}^M, \Delta G_T = G_T - G_T^M, \Delta \dot{G}_T = \dot{G}_T - \dot{G}_T^M;$$

$$\Delta \Psi = \Psi(\alpha) - \Psi(\alpha^M), \Delta Q = Q(G_T) - Q(G_T^M), \Delta U = U(\alpha) - U(\alpha^M).$$

Сигналы невязки равны:

$$\varepsilon_1 = \Delta \dot{\alpha} - A^M \cdot \Delta \Psi = \Delta A \cdot \Psi(\alpha) + \Delta B \cdot \Phi(I),$$

$$\varepsilon_2 = \Delta \dot{G}_T - C^M \cdot \Delta Q - D^M \cdot \Delta U = \Delta C \cdot Q(G_T) + \Delta D \cdot U(\alpha).$$

Величины $\Delta \dot{\alpha}, \alpha, \alpha^M, A^M \cdot \Delta \Psi, \Delta \dot{G}_T, G_T, G_T^M, C^M \cdot \Delta Q, D^M \cdot \Delta U$ являются непосредственно наблюдаемыми или вычисляемыми через непосредственно измеряемые величины.

Для минимизации векторов невязки выбраны функции Ляпунова в виде положительно определённых квадратичных форм

$$V_1 = \frac{1}{2} (\Delta A \cdot K \cdot \Delta A^T + \Delta B \cdot L \cdot \Delta B^T), V_2 = \frac{1}{2} (\Delta C \cdot M \cdot \Delta C^T + \Delta D \cdot N \cdot \Delta D^T),$$

где K, L, M, N – положительно определённые диагональные матрицы заданных постоянных коэффициентов; $\Delta A^T, \Delta B^T, \Delta C^T, \Delta D^T$ – транспонированные матрицы разностей коэффициентов.

Производные квадратичных форм

$$\dot{V}_1 = \Delta A \cdot K \cdot \Delta \dot{A}^T + \Delta B \cdot L \cdot \Delta \dot{B}^T, \quad \dot{V}_2 = \Delta C \cdot M \cdot \Delta \dot{C}^T + \Delta D \cdot N \cdot \Delta \dot{D}^T,$$

При условии

$$\begin{aligned} \Delta \dot{A}^T &= -\varepsilon_1 \cdot \alpha / K = -\{\Delta A \cdot \Psi(\alpha) + \Delta B \cdot \Phi(I)\} \cdot \alpha / K, \\ \Delta \dot{B}^T &= -\varepsilon_1 \cdot I / L = -\{\Delta A \cdot \Psi(\alpha) + \Delta B \cdot \Phi(I)\} \cdot I / L, \\ \Delta \dot{C}^T &= -\varepsilon_2 \cdot G_T / M = -\{\Delta C \cdot Q(G_T) + \Delta D \cdot U(\alpha)\} \cdot G_T / M, \\ \Delta \dot{D}^T &= -\varepsilon_2 \cdot \alpha / N = -\{\Delta C \cdot Q(G_T) + \Delta D \cdot U(\alpha)\} \cdot \alpha / N, \\ \dot{V}_1 &= -\{\Delta A \cdot \Psi(\alpha) + \Delta B \cdot \Phi(I)\}^2, \quad \dot{V}_2 = -\{\Delta C \cdot Q(G_T) + \Delta D \cdot U(\alpha)\}^2, \end{aligned}$$

процесс устойчиво сходим.

Уравнения настройки, реализуемые в анализаторах, можно записать в матричной форме

$$\begin{aligned} \dot{A}^M &= \varepsilon_1 \cdot |K \cdot \Psi(\alpha)|^T \text{ либо } A^M = \int \varepsilon_1 \cdot |K \cdot \Psi(\alpha)|^T \cdot dt, \\ \dot{B}^M &= \varepsilon_1 \cdot |L \cdot \Phi(I)|^T \text{ либо } B^M = \int \varepsilon_1 \cdot |L \cdot \Phi(I)|^T \cdot dt, \\ \dot{C}^M &= \varepsilon_2 \cdot |M \cdot Q(G_T)|^T \text{ либо } C^M = \int \varepsilon_2 \cdot |M \cdot Q(G_T)|^T \cdot dt, \\ \dot{D}^M &= \varepsilon_2 \cdot |N \cdot U(\alpha)|^T \text{ либо } D^M = \int \varepsilon_2 \cdot |N \cdot U(\alpha)|^T \cdot dt. \end{aligned}$$

Идентифицированные значения коэффициентов A^M, B^M, C^M, D^M , описывающих реальный дозатор топлива, сравнивают со значениями коэффициентов $A^\ominus, B^\ominus, C^\ominus, D^\ominus$ эталонной модели дозатора. Сигналы разностей идентифицируемых и эталонных коэффициентов

$$\delta A = A^M - A^\ominus, \delta B = B^M - B^\ominus, \delta C = C^M - C^\ominus, \delta D = D^M - D^\ominus$$

используют для отладки дозатора топлива. Величина перемещения исполнительных механизмов определяется чувствительностью дозатора топлива к перемещению РЭ.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТОВ САУ

Результаты испытаний на стендах (рис. 1, 2) можно использовать для прогнозирующего контроля. В основу прогнозирования состояния ГМЧ САУ положен тот факт, что основными причинами изменения параметров являются старение и износ. Наблюдение за изменением параметров и его прогнозирование позволяет принимать меры по предупреждению повреждений и отказов ГМЧ САУ во время её эксплуатации.

Для практической реализации прогнозирующего контроля ГМЧ САУ используют коэффициенты адаптивной модели идентифицируемых параметров в пространстве её функционирования либо значения выходных параметров топливного регулятора (дозатора). Тогда решается задачу прогнозирования

случайного процесса $\bar{y}(t) = \{y_i(t)\}_{i=0}^n, t \in T$, где $\bar{y}(t)$ – вектор определяемых параметров, T – период эксплуатации. Суть указанной задачи состоит в предсказании траектории движения $\bar{y}(t)$ на множестве T .

Представим описание ГМЧ САУ в виде:

$$\bar{y}(t) = \mathbf{A} \cdot \bar{\varphi}(t), \quad (3)$$

где $\mathbf{A} = \{a_j\}_{j=0}^m$ – матрица случайных коэффициентов размером $(n+1) \times (m+1)$; $\bar{\varphi}(t) = \{\varphi_j(t)\}_{j=0}^m$ – детерминированный базис дифференцируемых функций времени.

Дополнением к модели (3) обычно являются данные контрольных измерений $\bar{y}(t)$.

Измеренные значения $\bar{z}(t)$ отличаются от истинных $\bar{y}(t)$ на некоторую случайную

величину $\bar{\varepsilon}(t)$ – ошибку измерения, то есть $\bar{z}(t) = \bar{y}(t) + \bar{\varepsilon}(t)$. При этом для ГМЧ САУ сложно определить адекватную модель случайного дрейфа $y(t)$. Поэтому прогнозирование с помощью статистических методов может привести к неоправданно оптимистическим оценкам.

Значительно меньшую опасность представляет получение пессимистических (гарантированных) оценок $y(t)$ [6]. Гарантированный прогноз может быть получен в условиях ограничения исходных данных. При этом решаются задачи:

- прогнозирование без привлечения гипотез о стохастических свойствах процесса;
- полное использование заданной исходной информации;
- обеспечение гарантированной достоверности и точности результатов прогноза.

Гарантированное оценивание заключается в определении пределов изменения $y(t)$

$$\bar{z}(t) - \bar{\Delta}_1 \leq y(t) \leq \bar{z}(t) + \bar{\Delta}_2, \quad (4)$$

где $\bar{\Delta}_1 = \{\Delta_{1t}\}$, $\bar{\Delta}_2 = \{\Delta_{2t}\}$, Δ_{1t} , Δ_{2t} – предельные границы для $\varepsilon(t)$.

Пределы изменения $\bar{y}(t)$ определяют из свойств детерминированного базиса $\{\varphi_j(t)\}_{j=0}^m$ модели (3) с помощью экстремальных полиномов Карлина [7], удовлетворяющих (4). Для экстремальных полиномов $y(t)_-$ и $y(t)_+$ гарантированно выполняется $y(t)_- \leq y(t) \leq y(t)_+$, $t \in T_\varepsilon \subset T$, где T_ε – период испытаний. Область $[y(t)_-, y(t)_+]$ является наименьшей из допустимых, содержащих все возможные реализации $\bar{z}(t)$ вектора определяемых параметров $\bar{y}(t)$.

Поиск $y(t)_-$ и $y(t)_+$ выполняют с помощью линейного программирования [8]

$$1) \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(t_i) = \max, \quad 2) \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(t_i) = \min.$$

Прогноз позволяет учесть ошибки модели $y(t)$ и обеспечить гарантированную достоверность получаемых результатов. Это объясняется тем, что исходная информация не отражает стохастические свойства $y(t)$ и $\varepsilon(t)$. Поэтому можно считать, что $\varepsilon(t)$ включает как погрешности измерительных приборов, так и ошибки модели $y(t)$. В этом случае можно

адаптивно по мере накопления и уточнения результатов прогноза $\bar{y}(t)$ осуществлять коррекцию $y(t)$, обеспечивая минимум влияния ошибок модели на прогноз. При ограниченных значениях $\bar{\varepsilon}(t)$ можно строить экстремальные полиномы модели $y(t)$ только по данным последних наблюдений. Для определения несоответствия модели $y(t)$ реальному процессу $\bar{y}(t)$ в алгоритм прогноза вводят индикатор «опасного» расхождения между результатами прогноза и контроля. Этот индикатор определяет скорость отработки прогнозирующей системой ошибок модели $y(t)$:

$$\beta = \sum_{l=m+1}^k \alpha_l / \sum_{l=m+1}^k \alpha'_l, \quad (5)$$

где $\alpha_l = y(t_l)_+ - z(t_l) - \Delta_2(t_l)$; $\alpha'_l = z(t_l) - \Delta_1(t_l) - y(t_l)_-$; $(m+1)$ – размер детерминированного базиса $y(t)$ в модели (3).

Физический смысл применения индикатора (5) состоит в том, что при совпадении структур $\bar{y}(t)$ и его модели $y(t)$ результат прогноза не будет содержать систематической составляющей, тогда величина β будет колебаться около единицы. Вопрос о том, какие отклонения β от единицы следует считать «опасными», можно решить, исходя из опыта прогнозирования $y(t)$, условий эксплуатации и степени ответственности функций, выполняемая ГМЧ САУ.

Алгоритм адаптивного гарантированного прогноза с индикатором для устранения влияния ошибок модели на результаты предсказания, может быть представлен в следующем виде:

- 1) на интервале $T_\varepsilon \subset T$ производят $(k+1)$ контрольных измерений, $k \geq m$, $(m+1)$ – размер детерминированного базиса модели $y(t)$;
- 2) данные замеров используются для построения $y(t)_+$ и $y(t)_-$;
- 3) на момент t_{k+1} вычисляют значение критерия (5) и производят проверку выполнения

$$|1 - \beta| \leq \gamma, \quad (6)$$

где γ – заданное число;

- 4) при соблюдении условия (6) данные $(m+1)$ замера используют для уточнения прогноза $y(t)$, иначе $y(t)_+$ и $y(t)_-$ строят только по результатам последних $(m+1)$ измерений $y(t)$;
- 5) повторяют процедуру, начиная с пункта 3.

Наделение метода гарантированного прогноза свойством устойчивости к ошибкам модели $y(t)$ имеет первостепенное значение для успешного решения задачи прогнозирования состояния ГМЧ САУ. Его использование позволяет свести к минимуму влияние неопределенности сведений о дрейфе параметров на достоверность и точность предсказания.

Применение метода гарантированного прогноза для вектора параметров $\bar{y}(t)$ не будет иметь качественных отличий от прогноза изменения одного параметра [6] ГМЧ САУ, если область E (E – ортогональный параллелепипед) возможных ошибок контроля $\bar{\varepsilon}(t)$ задают по каждой компоненте вектора $\bar{y}(t)$ независимо от других. Стохастические или функциональные связи между параметрами не будут влиять на результат. Если $E(t) = \{\bar{\varepsilon}(t), \bar{\Delta}_1 \leq \bar{\varepsilon}(t) \leq \bar{\Delta}_2\}$, где $E(t) = \{\bar{\varepsilon}(t) \in E : \bar{\Delta}_{1t} \leq \bar{\varepsilon}(t) \leq \bar{\Delta}_{2t}\}$, $\bar{\Delta}_1 = \inf_{t \in T_c} E(t)$, $\bar{\Delta}_2 = \sup_{t \in T_c} E(t)$, то решение задачи гарантированного прогноза сводится к n одномерным задачам, где n – размерность вектора $\bar{y}(t)$.

Известно, что ошибки контроля $\bar{\varepsilon}_t$ заключены в эллипсоиде (в частном случае – шаре) [9]

$$\bar{\varepsilon}(t)^T \cdot B(t) \cdot \bar{\varepsilon}(t) \leq \delta(t), t \in T_c \subset T,$$

где $B(t)$ – положительно определенная симметричная матрица, задающая параметры эллипсоида ошибок на момент наблюдения $t \in T_c$; $\delta(t)$ – постоянная величина, характеризующая размер эллипсоида на момент $t \in T_c$.

С учетом аддитивности ошибок измерений и зависимости (3) можно записать

$$(\bar{z}(t) - A \cdot \bar{\varphi}(t))^T \cdot B(t) \cdot (\bar{z}(t) - A \cdot \bar{\varphi}(t)) \leq \delta(t) \quad (7)$$

Неравенство (7) описывает область J коэффициентов a_{ij} ; с которыми реализации $\bar{y}(t)$ могут проходить через все моменты времени контроля. Область J является выпуклой (как пересечение эллипсоидов) и ограниченной при $k \geq n \cdot m$. По границам области J могут быть найдены пределы возможных значений коэффициентов a_{ij} ; а значит и $\bar{y}(t)$. Искомые пределы $\bar{y}(t)$, $t \in T > T_u$ могут быть описаны с помощью экстремальных полиномов $y(t)_+$ и $y(t)_-$.

Построение $y(t)_+$ и $y(t)_-$ выполняют путём решения следующих задач:

$$1) \sum_{j=0}^m a_{ij} \varphi_j(t^*) = \max, i = 1, \dots, n,$$

$$2) \sum_{j=0}^m a_{ij} \varphi_j(t^*) = \min, i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Исходя из линейности целевые функции (7) и выпуклости ограничений (8), эти задачи можно рассматривать как задачи выпуклого программирования [8].

Для обеспечения возможности широкого применения на практике процедура гарантированного прогноза должна удовлетворять определённым требованиям.

1. Она должна быть оптимальной в смысле принятого критерия оптимальности прогноза.

2. Результат прогноза должен быть однозначным.

3. Результат прогноза должен совпадать с истинным значением прогнозируемого параметра, то есть должно выполняться условие несмещённости.

4. По мере увеличения объёма используемых данных результат прогноза должен приближаться к истинному значению прогнозируемого параметра, то есть должно выполняться условие сходимости.

ВЫВОДЫ

1. Автоматическая отладка на полунатурном моделирующем стенде позволяет снизить трудоемкость и повысить качество регулировки и испытаний топливных регуляторов ГТД.

2. Использование в составе стенда эталонной модели (эталонного оборудования) позволяет оптимизировать процесс отладки топливных регуляторов (ГМЧ САУ).

3. Для параметрической отладки ГМЧ САУ в соответствии с заданной передаточной функцией, реализованной в эталонной модели ГМЧ САУ (эталонном топливном регуляторе), целесообразно использовать адаптивную модель идентифицируемых параметров.

4. В случае многопараметрического гарантированного прогнозирования в качестве прогнозируемых параметров могут выступать значения измеряемых характеристик ГМЧ САУ.

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

6. Многопараметрическое гарантированное прогнозирование является эффективным инструментом обработки результатов измерения, полученных в ходе испытаний агрегатов САУ для обеспечения надёжной эксплуатации системы «САУ – ГТД».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. 1466456 СССР, МКИ⁴ G 01M 15/00. Устройство для измерения и задания перемещений исполнительных органов топливорегулирующей аппаратуры [Текст] / Е. В. Шендалева (СССР). – № 4209580/25–06 ; заявл. 16.03.87.

2. Шендалева Е.В. Технология регулирования топливной аппаратуры систем автоматического управления газотурбинных двигателей с использованием моделирующих стендов [Текст] / Е. В. Шендалева, В. В. Жильцов, В. Ю. Тэттер // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 7. – С. 15 – 21.

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

4. Гроп Д. Методы идентификации систем. Пер. с англ. В.А. Васильева, В.И. Лопатина, под ред. Е.И. Кринецкого. – М.: Мир, 1979. – 294 с.

5. Тэттер В. Ю. Идентификация характеристик преобразователей при регулировке топливных регуляторов САУ ГТД после сборки [Текст] / В. Ю. Тэттер, Е. В. Шендалева // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004, №4. – С. 7 – 14.

6. Шендалева Е.В. Прогнозирование технического состояния топливорегулирующей аппаратуры газотурбинных двигателей в процессе длительных испытаний [Текст] / Е. В. Шендалева // Вестник СибАДИ. – 2016. № 6 (52). С. 19 – 28.

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. Кузнецов А. В. Высшая математика: Математическое программирование / А. В. Кузнецов, В. А. Сакович, Н. И. Холод; под. Ред. А. В. Кузнецова. – Мн.: Выш. шк., 1994. – 286 с.

9. Богуславский И. А. Методы навигации и управления по неполной статистической информации. – М.: Машиностроение, 1970. – 256 с.

10. Карлин С., Стадден В. 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.

THE REGULATION OF GAS TURBINE ENGINE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM IN TIME OF TRIALS FOR TECHNOLOGIC STATE FORECASTING

E.V. Shendaleva

Abstract. The article has considered the problem of hydro-mechanical part of gas turbine engine automatic control system optimal adjustment. The optimal adjustment has been performed by applying the half-natural model stand in one-to-one correspondence with trials. The subject matter of this article is the consideration of the model stand construction problem with maximum approaching of real service condition of hydro-mechanical part of gas turbine automatic control system. The hydro-mechanical part optimal adjustment is assumed the using of Lyapunov functions. The method of technical state assured forecasting for combined parameter vector has been also considered. The results of investigation may be used for adjustment and forecasting of different technical system states.

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

REFERENCES

1. Shendaleva E. V. Ustroistvo dlja izmerenija i zadanija peremeschenij ispolnitelnyh organov toplivoregulirujuschej apparatury [Device for measurement and assignment of operating actuator displacements for fuel control apparatuses].

Ampere-second USSR, no. 1466456, 1987.

2. Shendaleva E. V., Zhiltsov V. V., Tetter V. Yu. Tehnologija regulirovanija toplivnoj apparatury sistem avtomaticheskogo upravlenija gazoturbinnih dvigatelej s ispol'zovaniem modelirujuschih stendov [Technology of regulation of the fuel equipment of systems of automatic control

of gas-turbine engines with use of the modeling stands]. Assembling in mechanical engineering and instrument making, 2005, no. 7, pp. 15–21.

3. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija [Reference book on the theory of automatic control]. Under the editorship of A. A. Kravosky. Moscow, Science, 1987. 712 p.

4. Graupe D. Identifikatsija system [Methods of identification of system]. The lane from English V. A. Vasilyev, V. I. Lopatin, under the editorship of E. I. Krinetsky. Moscow, World, 1979. 294 p.

5. Tetter V. Yu., Shendaleva E. V. Identifikatsija harakteristik preobrazovatelej pri regulirovke toplivnyh reguljatorov SAU GTD posle sborki [Identification of characteristics of converters at adjustment of the fuel regulators of gas turbine engine automatic control system after gather operation]. Assembling in mechanical engineering and instrument making, 2004, no. 4, pp. 7–14.

6. Shendaleva E. V. Prognozirovanie tehničeskogo sostoianija toplivoregulirujuschej apparatury gazoturbinyh dvigatelej v protsesse dlitel'nyh ispytanij [Forecasting of technical state of the fuel control equipment of gas-turbine engines in the course of long tests]. Vestnik SIBADI, 2016, no. 6 (52), pp. 19–28.

7. Karlin S. Matematicheskie metody v teorii igr, programmirovanii i ekonomike [Mathematical methods and theory in games, programming, and economics]. The lane from English N. A. Bodin, L. I. Gorkov, etc. Moscow, Mir, 1964. 840 p.

8. Kuznetsov A. V., Sakovich V. A., Holod N. I. Vischaja matematika: Matematicheskoe programmirovanie [The higher mathematics: mathematical programming]. Minsk, Vischaja shkola, 1994. 286 p.

9. Boguslavskij I. A. Metody navigatsii i upravlenija po nepolnoj statisticheskoj informatsii [Methods of navigation and management according to incomplete statistical information]. Moscow: Mashinostroenie, 1970. 256 p.

10. Karlin S., Studden W. Chebyshevskie sistemy i ih primenenie v analize i statistike [Tchebycheff systems: with applications in analysis and statistics]. The lane with English under the editorship of S. M. Ermakov. Moscow, Nauka, 1976. 568 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шендалева Елена Владимировна (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» 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, Standardization and Metrology, Omsk State Technical University (644050, Mira prospect, 11, Omsk, Russian Federation, e-mail: shendalevaev@yandex.ru)

.....