

УДК 681.512.6

А. С. ГОЛЬЦОВ

Академия спецсвязи России, Россия

СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Рассматривается задача синтеза адаптивной системы управления ГТД в условиях, когда его параметры изменяются неконтролируемым образом, а математическое описание возмущающих воздействий задано неравенствами. Выполнена регуляризация задачи и получены алгоритмы формирования оценок переменных состояния и управляющих воздействий, оптимальных по регуляризованным функционалам обобщенной работы задач оценивания и управления.

адаптивное управление, нелинейная модель, нестационарные параметры, произвольные возмущения

Введение

Технический прогресс приводит к постоянному усложнению газотурбинных двигателей (ГТД) и задач управления этими двигателями. В последние годы интенсивно разрабатывают цифровые системы управления с прогнозирующими моделями состояния ГТД, способные решать задачи оптимального управления в различных постановках [1]. Созданы системы управления с использованием линеаризованных моделей процессов, происходящих в двигателях, которые формируют в расчетном режиме работы двигателя управляющие воздействия, близкие к оптимальным. Но на других режимах работы двигателя с такой системой управления возникают существенные перерегулирования управляемых переменных и статические погрешности управления [1].

Это связано с тем, что во всех режимах работы состояние ГТД как объекта управления можно описать с требуемой точностью лишь моделями с нестационарными параметрами. Но параметры моделей ГТД в процессе работы двигателя изменяются неконтролируемым образом. Поэтому синтез системы управления ГТД следует выполнять с помощью методов адаптивного управления [2 – 4].

Теория адаптивного управления базируется на принципе достоверной эквивалентности [2]: при формировании оптимальных управляющих воздей-

ствий в нейтральных системах дуального управления вместо неизвестных переменных состояния и параметров можно использовать их оптимальные оценки, вычисленные в процессе управления. Управляющие воздействия формируют с помощью принципа максимума, динамического программирования или регуляторов с известной по априорным данным структурой и неизвестными параметрами. Результаты, полученные в такой постановке, хорошо известны, составляют стройную математическую теорию и позволяют решать многие задачи управления.

В процессе работы двигателя возникают нестационарные возмущающие воздействия. Функции распределения вероятностей этих воздействий не известны. Поэтому синтез системы управления ГТД целесообразно выполнять в минимаксной постановке [3]. Но проблема идентификации параметров при решении задач адаптивного управления в минимаксной постановке оказалась существенно сложнее, чем в стохастической постановке. Поэтому в управляющие воздействия добавляют шумоподобные тестовые сигналы, обеспечивающие сходимость оценок параметров объекта управления (ОУ) к их истинным значениям [3]. Но такие дополнительные входные воздействия могут привести к появлению нежелательных эффектов (например, появляются дополнительные газодинамические и термодинами-

ческие нагрузки на лопатки турбины). Кроме того, принцип максимума нелинейную задачу управления преобразует в нелинейную двухточечную краевую задачу. Решение этой вспомогательной задачи даже численными методами можно получить лишь в простейших случаях. Поэтому задача синтеза систем автоматического управления газотурбинными двигателями, является актуальной научной проблемой.

1. Постановка задачи управления

Синтез адаптивной системы управления выполнен в следующих условиях [5]:

- нестационарные параметры ОУ, возмущающие воздействия и другие переменные могут выходить за границы множеств значений, заданных неравенствами, в пределах допустимых отклонений;
- с помощью методов регуляризации ограничения, заданные неравенствами, преобразуют в систему нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений для генераторов вспомогательных переменных;
- регуляризованную задачу адаптивного управления разделяют на три частные взаимосвязанные задачи: вычисления оценок переменных состояния; определения траекторий перехода управляемых переменных в требуемое состояние и формирования управляющих воздействий $u(t)$;
- при синтезе наблюдателя переменных состояния и регулятора управляющих воздействий используют функционалы обобщенной работы (ФОР) [4].

Состояние двигателя описывают уравнениями:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), \beta(t), u(t)) + w(t); \quad (1)$$

$$z(t) = \varphi(x(t), u(t)); \quad y(t) = Hz(t) + \xi(t), \quad (2)$$

где $x(t)$ – вектор переменных состояния;

$\beta(t)$ – вектор нестационарных параметров;

$w(t)$ – вектор неизвестных возмущающих воздействий и погрешностей модели (1);

$y(t)$ – вектор выходных сигналов измерительных устройств;

$z(t)$ – вектор управляемых переменных;

$\xi(t)$ – вектор погрешностей измерений;

$$|\beta(t)| \leq \beta^* + \mu(t); \quad |u(t)| \leq u^* + \eta(t);$$

$$|w(t)| \leq w^* + \zeta(t); \quad (3)$$

$\beta(t)$, $\eta(t)$, $\zeta(t)$ – векторы допустимых отклонений переменных за границы заданных областей.

Задача управления заключается в переводе двигателя из начального состояния (при $t = 0$) в режим максимальной тяги (при $t = t_f$) [1]:

$$x(0) = x_0 \pm \Delta x; \quad x(t_f) = x_N \pm \Delta x. \quad (4)$$

В процессе управления должны выполняться ограничения на допустимые значения части управляемых переменных $Lx(t)$ (на угловые скорости роторов, температуру газа и т.д.):

$$r_1 + \delta_r(t) \leq Lx(t) \leq r_2 + \delta_r(t), \quad (5)$$

заданных по условиям температурной и прочностной защиты двигателя, где $\delta_r(t)$ – вектор допустимых погрешностей управления. Для другой части управляемых переменных $Cx(t)$ заданы требуемые законы изменения во времени:

$$\gamma(t) = Cz(t) + \delta_\gamma(t), \quad (6)$$

где $\delta_\gamma(t)$ – вектор допустимых погрешностей.

2. Синтез наблюдателя переменных состояния

Введем генератор допустимых возмущающих воздействий, гарантирующий выполнение ограничений (3). Он образован аperiodическими звеньями

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{1}{T} [w(t - \tau_u) - v(t) + \zeta(t)], \quad (7)$$

нелинейным преобразователем

$$w(t) = s(v(t), w^*) \quad (8)$$

с сигмоидальной статической характеристикой

$$s(v_j(t), w_j^*) = w_j^* \cdot \operatorname{th} \left(\frac{v_j(t)}{w_j^*} + 0,3 \sum_{k=1}^{e \leq 3} \left(\frac{v_j(t)}{w_j^*} \right)^{1+2 \cdot k} \right)$$

и звеном запаздывания в цепи обратной связи, где $v(t)$ – вектор переменных состояния генератора.

Аналогичным образом введем генератор оценок параметров, гарантирующий выполнение ограничений (3). Тогда оценки переменных состояния расширенной системы можно определить минимизацией ФОР (регуляризованного функционала МНК)

$$I(x(t), v(t)) = \frac{1}{2} \|x_0 - x(0)\|_{D_x^{-1}}^2 + \frac{1}{2} \|v_0 - v(0)\|_{D_v^{-1}}^2 + \frac{1}{2\tau_\xi} \int_0^{t_f} \left(\left\| e(t) + \bar{e}(t) + T \frac{d\hat{e}(t)}{dt} \right\|_{D^{-1}}^2 + \alpha \|\zeta(t)\|_{R^{-1}}^2 \right) dt,$$

где D_x , D_v – матрицы дисперсий погрешностей задания начальных условий;

$$e(t) = y(t) - Hz(t); \quad \bar{e}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t e(\lambda) d\lambda;$$

$$\hat{e}(t) = \hat{y}(t) - Hz(t); \quad \alpha = \frac{\tau_\xi}{\tau_\zeta};$$

D , R – матрицы дисперсий случайных процессов $\xi(t)$ и $\zeta(t)$;

τ_ξ , τ_ζ – оценки допустимых времен корреляции случайных процессов $\xi(t)$ и $\zeta(t)$;

$\hat{y}(t)$ – вектор сглаженных оценок выходных сигналов датчиков (полученных, например, аппроксимацией этих сигналов В-сплайнами).

Минимизация этого функционала с помощью принципа максимума приводит к алгоритму рекуррентного МНК (регуляризованному фильтру Калмана) [5]. Этот алгоритм отличается от традиционного фильтра Калмана тем, что осуществляет ПИД-регулирование оценок переменных состояния (фильтр Калмана реализует алгоритм пропорционального регулирования).

При синтезе адаптивного регулятора управляющих воздействий будут использованы оценки $\hat{x}(t)$ и $\hat{\beta}(t)$ вектора переменных состояния и вектора параметров модели ГТД, которые вычисляют интегри-

рованием дифференциального уравнения:

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = f(\hat{x}(t), \hat{\beta}(t), u(t)) + K_x(t) \cdot \left(\hat{e}(t) + \bar{e}(t) + T \frac{d\hat{e}(t)}{dt} \right), \quad (9)$$

где $K_x(t) = [I \ 0 \ 0] \cdot K(t)$; $K(t)$ – матрица коэффициентов усиления полученного фильтра Калмана.

3. Синтез адаптивного регулятора управляющих воздействий

Введем вспомогательный генератор допустимых управляющих воздействий, гарантирующий выполнение ограничений (3):

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{1}{T} [u(t - \tau_u) - \psi(t) + \eta(t)]; \quad (10)$$

$$u(t) = s(\psi(t), u^*). \quad (11)$$

Кроме того, при времени запаздывания $\Delta t \rightarrow 0$ сформируем вектор вспомогательных функций:

$$r(t) = \begin{cases} r1, & \text{если } L\hat{x}(t - \Delta t) < r1; \\ r2, & \text{если } L\hat{x}(t - \Delta t) > r2; \\ L\hat{x}(t - \Delta t), & \text{иначе.} \end{cases}$$

Тогда неравенства (5) можно заменить уравнением:

$$r(t) = Lx(t) + \delta_r(t). \quad (12)$$

В результате исходную задачу можно сформулировать как задачу оценивания переменных состояния системы (9) – (12), обращающих в минимум ФОР:

$$J = \frac{T}{2\tau_\delta} \|\gamma(t_f) - Cz(t_f)\|_{D_\gamma^{-1}}^2 + \frac{1}{2} \|u(0) - \psi(0)\|_{D_u^{-1}}^2 + \frac{1}{2\tau_\delta} \int_0^{t_f} \left(\|q(\hat{x}(t))\|_{D_\gamma^{-1}}^2 + T^2 \left\| \frac{dq(\hat{x}(t))}{dt} \right\|_{D_\gamma^{-1}}^2 \right) dt + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \frac{1}{\tau_\delta} \left(\|r(t) - L\hat{x}(t)\|_{D_r^{-1}}^2 + \frac{1}{\tau_\eta} \|\eta(t)\|_{D_u^{-1}}^2 \right) dt, \quad (13)$$

где D_u , D_γ , D_r – матрицы дисперсий допустимых погрешностей $\eta(t)$, $\delta_\gamma(t)$, $\delta_r(t)$;

$$q(\hat{x}(t)) = \gamma(t) - C \cdot \hat{z}(t) = \gamma(t) - C\Phi(\hat{x}(t), u(t - \Delta t));$$

ε – параметр регуляризации;

τ_δ , τ_η – оценки допустимых времен корреляции случайных процессов $\delta(t)$ и $\eta(t)$.

Если выполнить с помощью принципа максимума минимизацию этого функционала с ограничениями (9) – (12) и осуществить инвариантное погружение уравнений Эйлера-Лагранжа [5], то получим следующий алгоритм формирования управляющих воздействий (адаптивный ПИД-регулятор):

$$u(t) = s(\hat{u}(t), u^*); \begin{bmatrix} Q_u(t) \\ Q_\psi(t) \end{bmatrix} = Q(t);$$

$$\hat{u}(t) = s(\hat{\psi}(t), u^*) + B(t)^{-1} Q_u(t) \cdot \begin{bmatrix} q(\hat{x}(t)) + T \frac{dq(\hat{x}(t))}{dt} \\ r(t) - L\hat{x}(t) \end{bmatrix};$$

$$\frac{d\hat{\psi}(t)}{dt} = \frac{1}{T} [u(t - \tau_u) - \hat{\psi}(t)] + Q_\psi(t) \cdot \begin{bmatrix} q(\hat{x}(t)) + T \frac{dq(\hat{x}(t))}{dt} \\ r(t) - L\hat{x}(t) \end{bmatrix};$$

$$\hat{\psi}(0) = u(0); B(t) = \frac{\partial f(\hat{x}(t), \hat{\beta}(t), u(t - \tau_u))}{\partial u(t - \tau_u)}, \quad (14)$$

где $Q(t)$ – матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана для задачи оценивания переменных состояния $\hat{x}(t)$ и $\psi(t)$ динамической системы (9) – (12) с функционалом (13).

4. Пример. Синтез адаптивной системы управления температурой газа

Разработанный метод был применен для синтеза адаптивной системы управления температурой газа перед турбиной трехвального ТРДД. В отклонениях от базового номинального режима состояние двигателя описывает линеаризованная модель [1]:

$$\frac{d\Delta n(t)}{dt} = A_0 \Delta n(t) + B_0 u(t) + w_0(t); \Delta n = \begin{bmatrix} \Delta n_H \\ \Delta n_C \\ \Delta n_B \end{bmatrix};$$

$$z(t) = C_0 \Delta n(t) + D_0 u(t); z^T = [\Delta T_r \quad \Delta T_k \quad \Delta P],$$

где $n_H(t)$, $n_C(t)$ и $n_B(t)$ – угловые скорости вращения роторов компрессоров низкого, среднего и высокого давления;

$u(t)$ – расход топлива;

$T_r(t)$ и $T_k(t)$ – температура газа перед турбиной и за компрессором.

Температуру газа $T_r(t)$ измеряют штатной термомпарой с постоянной времени $\tau_d = 3$ с. Необходимо перевести двигатель из режима $\Delta n(0) = 0$ в новый установившийся режим с температурой газа

$$T_r(t_f) = T_f \pm \delta(t_f).$$

Кроме того, задан требуемый закон $T_3(t)$ изменения температуры газа $T_r(t)$ в процессе управления:

$$T_3(t) = \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{0,3}\right) \right) \cdot T_f + \delta(t).$$

При синтезе системы управления используют следующую математическую модель, которая связывает выходной сигнал термомпары $y(t)$ с управляющим воздействием (расходом топлива) $u(t)$:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -\frac{x(t)}{\tau_d} + \frac{1}{\tau_d} T_r(t); x(0) = 0 \pm \delta x; \quad (15)$$

$$T_r(t) = \beta(t) \cdot u(t) + w(t); y(t) = x(t) + \xi(t), \quad (16)$$

где $0 < \beta(t) \leq b$ – неизвестная чувствительность температуры газа к изменению расхода топлива;

$|w(t)| \leq w_*$ – неизвестная погрешность математической модели (15), (16);

$$0 \leq u(t) \leq \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{0,15}\right) \right) \cdot u_*.$$

Расход топлива формируют с помощью алгоритма (9), (14).

Эффективность адаптивной системы управления температурой газа проверена имитационным моделированием. При моделировании использовалась линеаризованная модель ТРДД, полученная в разделах 4.6.2 – 4.6.4 монографии [1]. Вектор возмущающих воздействий $w_0(t)$ формировали с помощью случайных функций, гармонических функций и их комбинаций. Были реализованы шесть режимов работы двигателя с матрицами параметров A_k , B_k , C_k и D_k его модели в режиме с номером k (числовые значения этих матриц приведены в [1]).

Адаптивная система управления (9), (14), (15) – (17) оказалась нечувствительной к возмущающим воздействиям $w_0(t)$ и имеет практически одинаковые динамические характеристики в различных режимах работы двигателя (при существенном изменении параметров – матриц A_k , B_k , C_k и D_k). Система управления астатическая, так как реализует алгоритмы ПИД-регулирования управляющего воздействия и оценок переменных состояния ОУ.

На рис. 1, 2 и 3 изображены графики переходных процессов в замкнутой системе управления с адаптивным регулятором температуры газа.

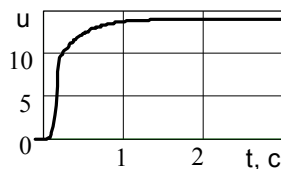


Рис. 1. Изменение расхода топлива

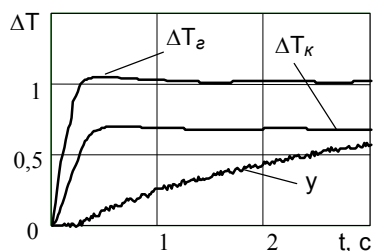


Рис. 2. Изменение температуры газа

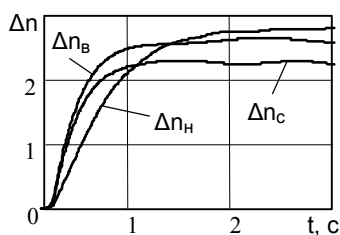


Рис. 3. Изменение угловых скоростей роторов

Время регулирования во всех режимах работы двигателя незначительно отличается от времени регулирования при ступенчатом изменении расхода топлива. При этом в ТРДД с адаптивным регулятором температуры газа нет перерегулирования температуры. ПИ-регулятор, разработанный в [1], обеспечивает близкое к оптимальному управление

только в окрестности базового режима, и если используется термопара с постоянной времени $\tau_d = 0,03$ с.

Заключение

Разработан метод синтеза адаптивных систем автоматического управления многомерными нелинейными объектами в условиях априорной неопределенности математического описания возмущающих воздействий и нестационарных параметров ОУ. Получены алгоритмы самонастраивающихся ПИД-регуляторов управляющих воздействий и оценок переменных состояния. Показано, что адаптивный регулятор температуры газа во всех режимах работы обеспечивает управление расходом топлива ТРДД, близкое к оптимальному управлению.

Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко и др. – К.: Техніка, 1998. – 312 с.
2. Бар-Шалом Я., Ци Э. Концепции и методы стохастического управления // Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах. – М.: Мир, 1980. – С. 74 – 122.
3. Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. – М.: Наука, 2002. – 291 с.
4. Красовский А.А. Некоторые актуальные проблемы науки управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1996. – № 6. – С. 5 – 14.
5. Гольцов А.С. Адаптивные системы автоматического управления нелинейными объектами. – Орел: Академия ФАПСИ, 2001. – 156 с.

Поступила в редакцию 12.04.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.