УДК 681.513.6

А.С. ГОЛЬЦОВ

Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Россия

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОТУРБИННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Рассмотрена задача синтеза алгоритмов адаптивного управления газотурбинным двигателем в условиях, когда ограничения на часть переменных состояния и возмущающие воздействия заданы равенствами и неравенствами. Выполнена регуляризация задачи и получены алгоритмы обучения модели объекта управления и формирования управляющих воздействий.

адаптивное управление, нелинейная модель, неконтролируемые возмущения, ограниченные по абсолютной величине

Введение

Существующие цифровые системы управления газотурбинными двигателями (ГТД) проектируют с использованием математической модели совместной работы двигателя с приводным топливным насосом и системой механизации компрессора. В частности, созданы многоканальные системы управления установившимися режимами работы ГТД с автоматическим переходом с основного контура управления на канал регулятора одной из ограничиваемых переменных. В разных каналах такой системы управления используют одни и те же управляющие воздействия, но разные управляемые переменные и разные алгоритмы формирования управляющих воздействий [1].

На узлы современных двигателей действуют нагрузки, близкие к предельно допустимым. Поэтому управление ГТД необходимо осуществлять с жестким ограничением перерегулирования температуры газа, частоты вращения роторов и суммарной степени повышения давления. Но в переходных режимах работы двигателя с указанной системой управления возникают статические погрешности управления и существенное перерегулирование управляемых переменных. Это связано с тем, что синтез алгоритмов управления ГТД осуществляют с использованием линейных моделей объекта управления (ОУ). Линейные модели плохо описывают переходные режимы работы ГТД. Кроме того, в этих моделях не учитывают возмущающие воздействия окружающей среды, которые оказывают существенное влияние на переменные состояния ОУ.

Поэтому синтез систем управления переходными режимами ГТД следует выполнять с помощью методов адаптивного управления с использованием обучаемой модели ОУ [2 – 4]. Однако существующие методы адаптивного управления нелинейными объектами предусматривают формирование управляющих воздействий путем решения вспомогательной нелинейной двухточечной краевой задачи (ДКЗ), что нельзя реализовать в системах автоматического управления (САУ).

В статье рассмотрена задача синтеза алгоритма адаптивного управления нелинейной динамической системы, формирующего управляющие воздействия в темпе реального времени в условиях (характерных для задач управления ГТД), когда ограничения на часть переменных состояния ОУ и математическое описание возмущающих воздействий заданы неравенствами.

Постановка задачи управления

Синтез алгоритма адаптивного управления выполнен в следующей постановке.

Математическую модель ОУ описывают уравнениями, полученными линеаризацией в окрестности базового режима уравнений процессов, происходящих в элементах системы управления:

$$\frac{d\Delta n(t)}{dt} = A \cdot \Delta n(t) + B \cdot \Delta q(t) + \xi_n(t); \qquad (1)$$

$$\frac{d\Delta T(t)}{dt} = -\frac{\Delta T(t)}{\tau_1} + \frac{\Delta T_г(t)}{\tau_1} + \frac{\xi_T(t)}{\tau_1}; \qquad (2)$$

$$\Delta P(t) = C_1 \cdot \Delta n(t) + b_1 \cdot \Delta q(t) + w_1(t); \qquad (3)$$

$$\Delta T_г(t) = C_2 \cdot \Delta n(t) + b_2 \cdot \Delta q(t) + w_2(t); \qquad (4)$$

$$\Delta \pi_k(t) = C_3 \cdot \Delta n(t) + b_3 \cdot \Delta q(t) + w_3(t), \qquad (5)$$

где $\Delta n(t)$ – вектор, образованный из приращений частот вращения роторов;

$\Delta q(t)$, $\Delta T(t)$, $\Delta T_г(t)$, $\Delta P(t)$, $\Delta \pi_k(t)$ – приращения подачи топлива; температуры термометра, температуры газа, тяги и степени повышения давления в компрессоре;

$\xi_n(t)$, $w_j(t)$ – неизвестные погрешности линеаризации;

$\xi_T(t)$ – погрешность термометра.

Задача управления заключается в переводе двигателя из начального состояния в режим максимальной тяги. При этом должны выполняться ограничения:

$$\Delta P(t) = \gamma_1(t); \; \gamma(t_N) = \Delta P_{\max}; \qquad (6)$$

$$\Delta T_г(t) \le \gamma_2(t) = \theta; \qquad (7)$$

$$\Delta \pi_k(t) \le \gamma_3(t) = \eta. \qquad (8)$$

Расход топлива связан с управляющим воздействием $u(t)$ на привод топливного насоса уравнением:

$$\frac{d\Delta q(t)}{dt} = -\frac{\Delta q(t)}{\tau_2} + \frac{\beta}{\tau_2} \cdot f(u(t)); \; \Delta q(0) = 0, \qquad (9)$$

где τ_2 – постоянная времени системы подачи топлива;

$$f(u(t)) = \begin{cases} 1, \text{ если } u(t) > 0; \\ 0, \text{ иначе}; \end{cases}$$

β – коэффициент усиления.

При формировании управляющего воздействия по условию (6) могут возникнуть переходные режимы с большим перерегулированием температуры газа и (или) степени повышения давления в компрессоре. Для предотвращения таких режимов необходимо осуществлять автоматическое переключение задания системе управления с условия (6) на ограничения (7) или (8).

Предполагается, что в процессе работы двигателя измеряют приращения скоростей вращения роторов $\Delta n_j(t)$ и температуры термометра $\Delta T(t)$. Поэтому в контуре обратной связи системы управления следует использовать оценки управляемых переменных $\Delta T_г(t)$, $\Delta \pi_k(t)$ и $\Delta P(t)$, которые можно вычислить с применением математической модели двигателя. Но модель ОУ (3) – (5) содержит неизвестные погрешности линеаризации. Для компенсации этих погрешностей в состав системы управления включена система автоматического обучения модели ОУ.

Синтез системы автоматического обучения модели ОУ

Введем вспомогательные переменные (сглаженные оценки управляемых переменных):

$$z_1(t) = \Delta P(t); \; z_2(t) = \Delta T_г(t);$$

$$z_3(t) = \Delta \pi_k(t);$$

$$\frac{dz_j(t)}{dt} = -\frac{z_j(t)}{\tau_2} + \frac{C_j x(t)}{\tau_2} + \frac{b_j \cdot \Delta q(t)}{\tau_2} + \frac{w_j(t)}{\tau_2}; \qquad (10)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = F \cdot x(t) + L \cdot z(t) + \frac{\mu(t)}{\tau_2}, \qquad (11)$$

где: $x(t)$ – вектор оценок переменных $\Delta n_j(t)$.

Уравнение (11) получено из уравнения (1) заменой с помощью формул (3) и (5) переменной $\Delta q(t)$ переменными $z_1(t)$ и $z_3(t)$.

Из выходных сигналов измерительных устройств (ИУ) $\Delta n_j(t)$ и $\Delta T(t)$ составим вектор $y(t)$, который связан с переменными $x(t)$ и $z(t)$ уравнением:

$$y(t) = H \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} + \xi(t),$$

где $\xi(t)$ – вектор погрешностей измерительных устройств.

Тогда оценки переменных состояния $x(t)$ и $z(t)$ модели ОУ можно определить минимизацией регуляризованного функционала МНК по переменным $x(t)$, $z(t)$, $\mu(t)$ и $w(t)$ [4]:

$$J = \frac{1}{2}\left\|\Delta n(0) - x(0)\right\|^2_{Dn^{-1}} + \frac{1}{2}\left\|z0 - z(0)\right\|^2_{Dz^{-1}} + \\ + \frac{1}{2\tau_2}\int_0^{t_N}\left(\left\|e(t)\right\|^2_{Dy^{-1}} + \left\|\bar{e}(t)\right\|^2_{Dy^{-1}} \right) dt + \\ + \frac{1}{2}\left\|\bar{e}(t_N)\right\|^2_{Dy^{-1}} + \frac{\alpha_1}{2\cdot\tau_2}\int_0^{t_N}\left\| \begin{bmatrix} \mu(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \right\|^2_{D^{-1}} dt,$$

где Dn, Dz – матрицы дисперсий погрешностей задания начальных условий;

$$e(t) = y(t) - H\cdot\begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix}; \quad \bar{e}(t) = \frac{1}{\tau_2}\int_0^t e(\lambda)d\lambda;$$

Dy – матрица дисперсий погрешностей ИУ;

α_1 – параметр регуляризации;

$$D = \begin{bmatrix} Dn & 0 \\ 0 & Dz \end{bmatrix}; \quad \left\|a\right\|^2_Q = a^T\cdot Q\cdot a.$$

Минимизация этого функционала с помощью принципа максимума и инвариантного погружения [4] приводит к алгоритму ПИ-регулирования вектора оценок возмущающих воздействий на обучаемую модель ОУ:

$$\begin{bmatrix} \hat{\mu}(t) \\ \hat{w}(t) \end{bmatrix} = V(t)\cdot H^T\cdot Dy^{-1}\cdot\left[e(t) + \bar{e}(t)\right]; \tag{12}$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \Phi\cdot V(t) + V(t)\cdot\Phi^T + \frac{1}{\alpha_1\cdot\tau_2}D - \\ - \frac{1}{\tau_2}V(t)\cdot H^T\cdot Dy^{-1}\cdot H\cdot V(t); \quad V(0) = D, \tag{13}$$

где

$$\Phi = \begin{bmatrix} F & L \\ \tau_2^{-1}\cdot C & -\tau_2^{-1}\cdot I \end{bmatrix}.$$

Таким образом, уравнения (10) – (13) определяют алгоритм оценивания переменных состояния обучаемой модели ОУ, содержащий самонастраивающийся ПИ-регулятор оценок возмущающих воздействий (12), (13).

Синтез адаптивного регулятора управляющих воздействий

Состояние формирователя управляющих воздействий можно описать следующей априорной математической моделью:

$$\frac{du(t)}{dt} = \frac{\psi(t)}{\tau_2}; \quad u(0) = 0, \tag{14}$$

где $\psi(t)$ – входной сигнал формирователя управляющих воздействий, подлежащий определению.

В соответствии с принципом оптимальности Беллмана выделим три стадии управления. Процесс управления находится в первой стадии, если выполняются ограничения (7) и (8) одновременно. В этом случае управление подачей топлива осуществляют по условию (6). Процесс управления находится во второй стадии, если не выполняется ограничение (7). Управление подачей топлива осуществляют по условию (7). Если не выполняется ограничение (8), то происходит третья стадия управления: подачу топлива осуществляют по условию (8).

Для стадии управления с номером j определим сигнал рассогласования:

$$\varepsilon_j(\Delta q(t)) = \gamma_j(t) - C_j\cdot\Delta n(t) - b_j\cdot\Delta q(t) - \hat{w}_j(t).$$

Тогда эффективность управления можно оценить с помощью обобщенного функционала регуляризованного МНК:

$$J_u = \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta q(0)^2}{Dq} + \frac{u(0)^2}{Du} + \frac{1}{\tau_2}\int_0^{t_N}\varphi(\Delta q(t))^2\,dt \right) + \\ + \frac{\alpha_2}{2\cdot\tau_2}\int_0^{t_N}\psi(t)^2\,dt, \tag{15}$$

где Dq, Du – дисперсии погрешностей задания начальных условий;

$$\varphi(\Delta q(t)) = \begin{cases} \dfrac{\varepsilon_2(\Delta q(t))}{\theta}, \text{если } z_2(t) \ge \theta; \\ \dfrac{\varepsilon_3(\Delta q(t))}{\eta}, \text{если } z_3(t) \ge \eta; \\ \dfrac{\varepsilon_1(\Delta q(t))}{\Delta P_{\max}}, \text{иначе}; \end{cases}$$

α_2 – параметр регуляризации.

В результате исходная задача адаптивного управления преобразована в эквивалентную задачу минимизации функционала (15) с ограничениями (9), (14) по переменным $\Delta q(t)$, $u(t)$ и $\psi(t)$.

Если выполнить минимизацию этого функционала с помощью принципа максимума и осуществить инвариантное погружение возникающих уравнений Эйлера-Лагранжа [4], то получим следующий алгоритм формирования управляющих воздействий:

$$u(t) = \frac{P_{1,1}(t)}{\beta} \cdot Q(t) \cdot \varphi(\Delta q(t)) + v(t); \qquad (16)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{P_{2,1}(t)}{\tau_2} \cdot Q(t) \cdot \varphi(\Delta q(t)); \; v(0) = 0, \qquad (17)$$

где $P_{i,j}(t)$ – элементы матрицы $P(t)$, которые вычисляют интегрированием матричного уравнения Риккати:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_2} S \cdot P(t) + \frac{1}{\tau_2} P(t) \cdot S^T + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \tau_2} R -$$

$$-\frac{1}{\tau_2} P(t) \cdot E(t) \cdot P(t); \; P(0) = \begin{bmatrix} Dq & 0 \\ 0 & Du \end{bmatrix}, \qquad (18)$$

где $S = \begin{bmatrix} -1 & \beta \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $E(t) = \begin{bmatrix} Q(t)^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$;

$$Q(t) = \begin{cases} \frac{b_2}{\theta}, & \text{если } z_2(t) \geq \theta; \\ \frac{b_3}{\eta}, & \text{если } z_3(t) \geq \eta; \\ \frac{b_1}{\Delta P_{\max}}, & \text{иначе.} \end{cases}.$$

Уравнения (16) – (18) определяют самонастраивающийся ПИ-регулятор привода топливного насоса. Настраиваемые параметры этого регулятора вычисляют интегрированием матричного уравнения Риккати (18) с положительно полуопределенной матрицей $Q(t)$. Объект управления (1) – (8), (9), (14) устойчив и управляем по входу $u(t)$. Поэтому замкнутая система управления с ПИ-регулятором (16) – (18) асимптотически устойчива и астатическая [4].

Заключение

Разработана адаптивная система автоматического управления подачей топлива ГТД в условиях априорной неопределенности математического описания возмущающих воздействий и погрешностей линеаризации модели ОУ.

Получены алгоритмы самонастраивающихся ПИ-регуляторов управляющих воздействий и оценок переменных состояния обучаемой модели ОУ, которые учитывают ограничения на температуру газа за турбиной и степень повышения давления в компрессоре, заданные неравенствами.

Показано, что разработанный алгоритм управления во всех режимах работы обеспечивает регулирование расхода топлива, близкое к оптимальному управлению по регуляризованному критерию МНК.

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. Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. – М.: Наука, 2002.– 291 с.

3. Красовский А.А. Некоторые актуальные проблемы науки управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1996. – № 6. – С. 5 – 14.

4. Гольцов А.С. Адаптивные системы автоматического управления нелинейными объектами. – Орел: Академия ФАПСИ, 2001. – 156 с.

Поступила в редакцию 25.05.2005

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