

ОПТИМАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КООРДИНАТ СОСТОЯНИЯ В САУ РАСХОДОМ ТОПЛИВА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Г.С. Ранченко, канд. техн. наук,

В.Ф. Миргород, канд. техн. наук,

КБ «Элемент», г. Одесса, Украина

Общая постановка. Для получения приемлемых качественных характеристик САУ различного назначения, применяемых в авиационной технике, реализуемые регуляторы должны использовать информацию о всех координатах состояния, характеризующих динамику объекта. При отсутствии возможностей непосредственно получить такую информацию с помощью датчиков возникает задача управления по выходной переменной САУ, решение которой, как известно [1,2], достигается построением устройства оценки состояния (наблюдателя), включаемого в обратную связь САУ. Если система функционирует в условиях шумов измерений и стохастических возмущающих воздействий, такое устройство имеет структуру и параметры фильтра Калмана, обеспечивающую оптимальную, в смысле СКО, оценку состояния объекта регулирования. К указанному классу задач относится задача синтеза системы управления расходом топлива в ГТД через насос-дозатор (НД) с непосредственным приводом дозирующего элемента от электромеханического преобразователя, поскольку измеряемой координатой является только угол поворота рабочего органа, а динамика НД описывается уравнениями 2 - 3 порядка.

Таким образом, возникает необходимость оценки неизмеряемых координат: скорости и, возможно, тока в обмотке управления для использования этих переменных состояния в цифровом регуляторе двигателя (РДЦ-450) и повышения тем самым качественных характеристик САУ расходом топлива (САУРТ).

Обзор публикаций. Известные математические модели НД, обоснованные в [3, 4], имеют второй порядок, а с учетом динамики входной цепи – третий.

Таким образом, представляется необходимой оценка скорости перемещения объекта, а в том случае, если инерционностью входной цепи нельзя пренебречь, то и тока в обмотке. В РДЦ-450 уже используется цифровая коррекция по скорости, в качестве которой принимается формируемый сигнал первой разности отсчетов угла, что является достаточно грубым приближением и не учитывает в полной мере реальную динамику объекта. Учитывая дискретный характер съема данных, необходимо предусмотреть вариант цифровой реализации устройства оценки состояния.

Кроме того, поскольку согласно [4] САУРТ функционирует в условиях воздействия возмущающего момента стохастического характера, необходимо решить задачу оптимальной фильтрации получаемых оценок.

Цель исследования. Целью исследований является синтез структуры и параметров устройства оценки состояния САУРТ, в том числе в цифровой реализации, с учетом необходимости оптимизации его параметров по различным критериям.

Результаты исследования. Модели объекта [3] в линейном приближении соответствует линейный наблюдатель, который описывается уравнениями состояния:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\hat{\omega}}{dt} &= \hat{\omega} + \kappa_1(\alpha - \hat{\alpha}), \\ I \frac{d\hat{\omega}}{dt} &= -\kappa_v \hat{\omega} + \kappa_i i + I \kappa_2(\alpha - \hat{\alpha}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\hat{\alpha}, \hat{\omega}$ – оценки координат состояния (выходы наблюдателя);

α – выходная координата объекта (угол поворота), измеряемая датчиком угла (первый вход наблюдателя);

i – ток в обмотке управления (второй вход наблюдателя),

I, k_v, k_i – параметры НД: момент инерции, коэффициенты вязкого трения и управляющего момента соответственно;

k_1, k_2 – параметры наблюдателя, подлежащие оп-
ределению,

и имеет структуру, изображенную на рис. 1.

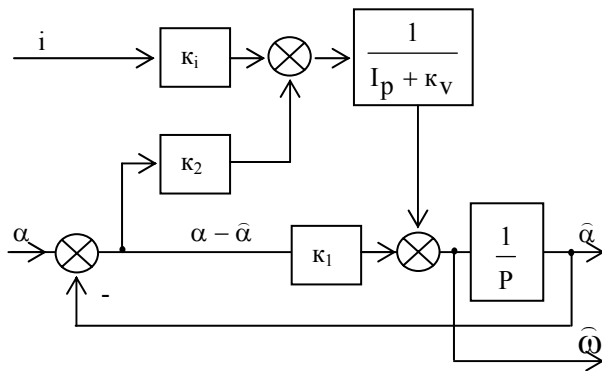


Рис. 1. Структурная схема наблюдателя состояния

Апериодический наблюдатель синтезируется по заданному времени восстановления t_b , которое должно быть во много раз меньше времени переходных процессов t_n в САУ. Для такого наблюдателя корни характеристического уравнения (1) должны быть действительными и равными:

$$\left. \begin{aligned} |\lambda| = |\lambda_1| = |\lambda_2| &= (k_1 + k_v/I)/2 \approx 3/t_b, \\ [(k_1 + k_v/I)/2]^2 &= k_1 k_v/I + k_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Система линейных алгебраических уравнений (2) позволяет определить параметры наблюдателя координат состояния, оптимального по виду переходных процессов в нем. Собственно оценке подлежит только компонента скорости и передаточные функции наблюдателя как звена в обратной связи САУ имеют вид:

$$W_{H\alpha}(P) = \frac{k_1 \tau_\phi^2 P + 1}{(\tau_\phi P + 1)^2}, W_{H\omega}(P) = P W_{H\alpha}(P), \quad (3)$$

где $\tau_\phi = 1/|\lambda|$ – постоянная времени фильтра.

Как следует из (3) и анализа ЛАЧХ такого фильтра, его структура и параметры весьма специфичны: числитель компенсирует неидеальность ЛАЧХ и результирующая характеристики имеет практически равномерный характер в полосе $(0 \dots \omega_c)$, где $\omega_c = 2\pi/\tau_\phi$.

Полученная на выходе наблюдателя компонента оценки скорости может быть использована для формирования Д-компоненты в РДЦ-450.

Если в модели объекта учесть возмущающее воздействие, то согласно [3, 4] уравнения состояния приобретают вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= \omega, \\ I \frac{d\omega}{dt} &= -k_v \omega + k_i i + M_b, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

а уравнение выхода имеет вид:

$$\alpha_u = \alpha + v, \quad (5)$$

где M_b – возмущающий момент;

v – шум измерений;

α_u – измеряемое значение угла.

Для возмущающего воздействия и шума измерений примем, что они представляют собой реализации широкополосных гауссовых стационарных случайных процессов с известными дисперсиями

$$\begin{aligned} d_1 &= \sigma_M^2, \\ d_2 &= \sigma_\alpha^2. \end{aligned}$$

Что касается шумов измерения, определяемых в основном шумом квантования по уровню, это предположение достаточно обосновано, а относительно возмущающего воздействия лишь частично справедливо, так как, судя по реализации угла, полученного в эксперименте в режиме $i=0$, возмущающий момент действительно имеет ширину спектра, существенно превышающую полосу пропускания системы, однако гипотеза стационарности на больших интервалах времени не выполняется. Однако на интервалах времени, соответствующих времени переходных процессов в САУ, а тем более в наблюдателе возмущающее воздействие может полагаться стационарным.

Для дисперсий (СКО) примем оценки: по возмущающему моменту целесообразно принять ее в виде момента трения движения, что подтверждается данными эксперимента:

$$\sigma_m \approx M_{\text{тр}},$$

а по шуму квантования – оценку, определяемую разрядностью N АЦП и динамическим диапазоном регулирования:

$$\sigma_\alpha \sim (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) / 2^N.$$

Структура и уравнения оптимального наблюдателя не отличаются от приведенных выше, а его параметры определяются решением

$$\text{col}(\mathbf{k}_1^* \mathbf{k}_2^*) = \mathbf{P} \mathbf{C}^T / D_2,$$

где $\mathbf{P}$ – матрица дисперсий, являющаяся решением уравнения Риккатти:

$$\mathbf{A} \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}^T + \mathbf{V}_1 - \mathbf{P} \mathbf{C} \mathbf{C}^T \mathbf{P} / D_2 = 0, \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & t \\ 0 & k_v / I \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & D_1 \end{bmatrix},$$

$$D_1 = d_1 / I; D_2 = d_2.$$

Для искоемых коэффициентов наблюдателя (6) матричное уравнение Риккатти (7) сводится к системе нелинейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 2k_2^* &= (k_1^*)^2, \\ (k_1^*)^2 (k_1^* + 2k_v / I)^2 &= 4D_1 / D_2. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Таким образом, оптимальные значения параметров наблюдателя зависят только от отношения дисперсий возмущающего воздействия и шума измерений и определяются численным решением системы (8). Система (8) решена по итеративному алгоритму с использованием в качестве начального приближения параметров наблюдателя, соответствующих (3). Установлено, что для САУРТ коэффициенты k_1 , полученные согласно (2) и (8), имеют несущественные различия, в то время как коэффициенты k_2 отличаются значительно – примерно в два раза, что приводит к некоторому искажению вида переходных процессов в оптималь-

ном по СКО наблюдателе при том же времени восстановления. Заметим, что отличительной особенностью наблюдателя по минимуму СКО является тот факт, что его выходами уже должны быть две координаты, оценки которых оптимальны. Действительно, если в детерминированном случае оценке подлежат только координаты, недоступные прямому измерению, то есть угловая скорость, то в стохастическом варианте наблюдатель дает возможность получить сглаженные оценки обеих координат.

Для цифровой реализации могут быть использованы передаточные функции (3) с последующим синтезом фильтра по аналоговому прототипу либо непосредственно уравнения состояния дискретной системы:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{k+1} &= \alpha_k + a_{12} \omega_k + b_1 i_k, \\ \omega_{k+1} &= a_{22} \omega_k + b_2 i_k, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} a_{12} &= \tau(1-d); a_{22} = d; \ell_1 = k_0(T - \tau + \tau d), \\ b_2 &= k_0(1-d); d = e^{-\tau/\tau}; \tau = I/k_v; k_0 = k_i/k_v. \end{aligned}$$

Здесь T – период дискретизации.

Уравнение цифрового наблюдателя соответственно имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha}_{\text{KM}} &= \bar{\alpha}_k + a_{12} \bar{\omega}_k + b_1 i_k + k_1 (\alpha_k - \bar{\alpha}_k), \\ \bar{\omega}_{\text{KM}} &= a_{22} \bar{\omega}_k + b_2 i_k + k_2 (\alpha_k - \bar{\alpha}_k). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для апериодического цифрового наблюдателя корни характеристического уравнения (10) должны быть нулевыми: $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$, что может быть обеспечено следующим выбором коэффициентов наблюдателя:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= 1 + a_{22}, \\ k_2 &= a_{22}^2 / a_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Апериодический наблюдатель имеет время восстановления, равное теоретическому пределу, в данном случае два дискрета дискретизации

$$t_b = 2T.$$

Оптимальный наблюдатель имеет ту же структуру (10), а его параметры определяются по методике синтеза дискретного фильтра Калмана [2].

Цифровая реализация наблюдателя может выполняться в виде (10) либо в виде следующих рекуррентных соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha}_{k+2} &= (1 + a_{22})\bar{\alpha}_{k+1} - a_{22}\bar{\alpha}_k + \\ &+ (a_{12}b_2 - a_{22}b_1)i_k + b_1i_{k+1} + \\ &+ (k_2a_{12} - k_1a_{22})(\alpha_k - \bar{\alpha}_k) + \\ &+ k_1(\alpha_{k+1} - \bar{\alpha}_{k+1}), \\ \bar{\omega}_k &= a_{12}^{-1}[\bar{\alpha}_{k+1} - \bar{\alpha}_k - b_1i_k - k_1(\alpha_k - \bar{\alpha}_k)] \end{aligned} \right\} (12)$$

Перспективы. Полученные уравнения оценки состояния имеют открытую форму, поскольку в них входит ток управления, задаваемый произвольным образом. Поэтому такие уравнения целесообразно использовать при исследованиях динамики объекта с применением тестовых сигналов. При выборе закона управления в функции координат состояния уравнения (1) либо (10), (12) существенно упрощаются и приобретают вид программно реализуемых рекуррентных процедур, а наблюдатель соответствует аналоговому либо цифровому фильтру в обратной связи САУРТ. Дальнейшие исследования целесообразно направить на учет в наблюдателе нелинейной динамики объекта, и в случае установленного влияния инерционности входной цепи – на построение наблюдателя дополнительных координат состояния.

Выводы. Улучшение качественных характеристик регулирования расхода топлива в условиях неполной информации о координатах состояния САУ может быть достигнуто путем использования методов оптимальной оценки неизмеряемых координат объекта регулирования. Оптимальный наблюдатель координат состояния представляет собой специализированный фильтр в обратной связи САУРТ, реализуемый аппаратным либо программным способом и обеспечивающий выдачу данных о сглаженных оценках угла

поворота рабочего органа НД и угловой скорости его перемещения в РДЦ-450.

Литература

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Пер. с англ.: Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
2. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.
3. Параметрическая и структурная идентификация объекта в контуре управления расходом топлива методами активного и пассивного эксперимента / В.И. Колесников, В.А. Седристый, Г.С. Ранченко, Н.Д. Голубев, Д.И. Волков // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр. – Харьков: ХАИ, 2002. – Вып. 31. Двигатели и энергоустановки. – С. 228-231.
4. Цифровое регулирование расхода топлива в системе с существенной нелинейностью типа «сухое трение» / В.И. Колесников, В.А. Седристый, Г.С. Ранченко, Н.Д. Голубев, Д.И. Волков // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр. – Харьков: ХАИ, 2002. – Вып. 30. Двигатели и энергоустановки. – С. 191-194.

Поступила в редакцию 01.06.03

Рецензенты: ученый секретарь научно-технического совета Н.П. Волошина, КБ «Элемент», г. Одесса; канд. техн. наук, доц. С.Г. Антошук, ОНПУ, г. Одесса.