

УДК 62–501.2

УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С БЕЗДАТЧИКОВЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Д.В. Краснов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: dim93kr@mail.ru

А.В. Уткин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: utkin-av@rambler.ru

А.С. Антипов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: scholess18@mail.ru

Ключевые слова: электромеханическая система, внешние возмущение, неопределенные параметры, скользящий режим, наблюдатель с большими коэффициентами.

Аннотация: Рассматривается задача слежения за заданными значениями обобщенных координат механической системы при действии на нее внешних и параметрических возмущений. Исполнительными устройствами являются электроприводы постоянного тока. В рамках блочного подхода разработана процедура декомпозиционного синтеза закона разрывного управления, обеспечивающего скользящие режимы в виртуальном пространстве смешанных переменных и инвариантность по отношению к возмущениям. Предложен метод синтеза наблюдателя состояния пониженного порядка с большими коэффициентами, в котором реализуется принцип полной декомпозиции. Данный наблюдатель по измерениям ошибок слежения позволяет получить с заданной точностью оценки смешанных переменных, по которым формируется обратная связь, что существенно упрощает структуру регулятора и не требует полного комплекта датчиков.

1. Введение

Важный класс современных объектов управления составляют электромеханические системы, к которым относятся промышленные роботы–манипуляторы с электрическими исполнительными устройствами. Следует отметить, что аппаратная составляющая механических систем достаточно консервативная и является общей для всех поколений промышленных роботов. Прогресс в современной робототехнике связан, в первую очередь, с разработкой эффективных алгоритмов управления.

В большинстве работ, посвященных управлению механическими объектами по обратной связи, предполагается априорное знание обобщенных координат, их скоростей, ускорений и переменных состояния исполнительных устройств, т.е. разработанные алгоритмы управления предназначены для объектов с полным комплектом датчиков [1]. Цель настоящего исследования – разработка многофункциона-

нальной системы слежения для электромеханического объекта автоматического управления, которая без полного комплекта датчиков и перенастройки параметров обратной связи способна обрабатывать различные технологические режимы в условиях неопределенности параметров объекта и действия внешних, неконтролируемых возмущений.

На практике можно отказаться от части измерительных устройств, если ввести в контур обратной связи наблюдатель состояний и/или возмущений того или иного типа. Это алгоритмы, реализуемые в вычислительной среде, позволяющие при выполнении условий наблюдаемости получить текущие оценки неизмеряемых сигналов по измерениям части переменных вектора состояния. Для электромеханических систем, которые описываются нелинейными динамическими моделями с неопределенными параметрами и внешними, несогласованными возмущениями, требуется разработка специальных подсистем наблюдения, дающих оценку не только переменных состояния, но и внешних воздействий. Поэтому проблемы разработки для электромеханических объектов методов синтеза обратной связи в условиях неполной информации, а также разработки и использования в управляющем процессоре систем аналитического резервирования измерительных устройств являются актуальными.

2. Описание объекта управления. Базовый закон управления

Рассматривается математическая модель полноприводного электромеханического объекта управления вида [2, 3]

$$(1) \quad \dot{q}_1 = q_2, \quad \dot{q}_2 = H^{-1}(q_1)[\tau - C(q_1, q_2)q_2 + f(t)];$$

$$(2) \quad \dot{\tau} = K(\omega - q_2), \quad \dot{\omega} = J^{-1}(\Psi i - \tau), \quad \dot{i} = L^{-1}(u - Ri - \Psi \omega),$$

где уравнениями (1) описывается лагранжева механическая подсистема с неопределенными массо-инерционными характеристиками; уравнениями (2) – динамическая модель электрических исполнительных устройств (приводов постоянного тока) с эластичными сочленениями; $q_1 = \text{col}(q_{11}, \dots, q_{1n}) \in Q_1 \subset R^n$ – вектор обобщенных координат механической подсистемы; $q_2 = \text{col}(q_{21}, \dots, q_{2n}) \in Q_2 \subset R^n$ – вектор обобщенных скоростей; $H(q_1) \in R^{n \times n}$ – положительно-определенная нелинейная матрица инерции, $H^{-1}(q_1) > 0 \forall q_1 \in Q_1$; $C(q_1, q_2) \in R^{n \times n}$ – матрица центробежных и кориолисовых сил; $f(t) = \text{col}(f_1, \dots, f_n) \in R^n$ – часть обобщенных сил, трактуемых как неконтролируемые возмущения; $\tau(t) \in R^n$ – вектор обобщенных сил, развиваемых исполнительными устройствами; $\omega \in R^n$ – вектор угловых скоростей роторов электроприводов; $i \in R^n$ – вектор токов цепей якорей; K, J, L, R, Ψ – диагональные матрицы с положительными постоянными элементами (коэффициенты передачи, приведенные моменты инерции на валу электроприводов, индуктивности и активные сопротивления контуров якорей, магнитный поток); $u \in R^n$ – вектор управляющих напряжений якорей.

Для выходных переменных $q_1(t)$ объекта управления (1)-(2) рассматривается задача слежения за заданными сигналами $g(t) \in Q_1$ в следующих предположениях:

- 1) измеряются только $q_1(t)$, шумы в измерениях отсутствуют;
- 2) аналитический вид функций $g_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ не известен, имеются только их текущие значения, нет полной информации об их производных, которые полагаются неизвестными, гладкими, ограниченными функциями времени;

- 3) $f_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ – неизвестные ограниченные гладкие функции времени;
- 4) матрицы H , C , J , L , Ψ содержат неопределенные параметры;
- 5) известны границы диапазонов изменения неизвестных параметров и сигналов.

Для стабилизации ошибок слежения $e_1(t) = q_1(t) - g(t) \in R^n$ ставится задача синтеза динамической обратной связи, а именно, синтеза базового закона разрывного управления $u = \text{col}(u_1, u_2, \dots, u_n) \in R^n$ и его реализации с помощью переменных наблюдателя состояния. В условиях неполной информации задача решается с заданной точностью:

$$(3) \quad |e_{1i}(t)| \leq \bar{\delta}_i \quad \forall t > T > 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

Поставленная задача нетривиальна, поскольку наличие несогласованных внешних и параметрических возмущений, во-первых, не позволяет непосредственно использовать преимущества систем с разрывными управлениями, в которых при организации скользящего режима можно обеспечить инвариантность по отношению только к согласованным ограниченными возмущениям [1, 3]. Во-вторых, при измерении только обобщенных координат теряется наблюдаемость, и в условиях параметрической неопределенности неизмеряемые переменные состояния не подлежат оцениванию даже при вводе экзогенных динамических моделей внешних воздействий.

Для декомпозиции задачи синтеза используется блочный подход [4-8]. С помощью невырожденных замен переменных система (1)-(2) приводится к совместной блочной форме (СБФ) управляемости и наблюдаемости относительно ошибок слежения. Ее вектор состояния – смешанные переменные – функции от переменных состояния электро-механической системы, внешних воздействий и их производных:

$$(4) \quad \begin{aligned} e_1 &= q_1 - g, \quad e_2 = q_2 + K_1 e_1 - \dot{g}, \quad e_3 = H^{-1}(q_1)[\tau - w_2] + K_2 e_2, \\ e_4 &= H^{-1}(q_1)[K\omega - w_3] + K_3 e_3, \quad e_5 = H^{-1}(q_1)[KJ^{-1}\Psi i - w_4] + K_4 e_4, \end{aligned}$$

$$(5) \quad K_j = \text{diag}(k_{ji}), \quad j = \overline{1, 4}, \quad k_{4i} > k_{3i} > k_{2i} > k_{1i} > 0, \quad i = \overline{1, n};$$

$$\begin{aligned} w_2 &= Cq_2 - f(t) + H(K_1^2 e_1 + \ddot{g}), \\ w_3 &= Kq_2 + \dot{w}_2 - H(\dot{H}^{-1}(\tau - w_2) - K_2(K_2 - K_1)e_2), \\ w_4 &= KJ^{-1}\tau + \dot{w}_3 - H(\dot{H}^{-1}(K\omega - w_3) + K_3(K_3 - K_2)e_3). \end{aligned}$$

С учетом (4)-(5) имеем СБФ электро-механической системы (1)-(2) относительно ошибок слежения с линейными локальными связями вида

$$(6) \quad \dot{e}_1 = -\bar{K}_1 e_1 + e_2, \quad \dot{e}_2 = -\bar{K}_2 e_2 + e_3,$$

$$\dot{e}_3 = -\bar{K}_3 e_3 + e_4, \quad \dot{e}_4 = -\bar{K}_4 e_4 + e_5,$$

$$(7) \quad \dot{e}_5 = B(u + w_5), \quad B_{n \times n} = H^{-1}(q)KJ^{-1}\Psi L^{-1} = (b_{ij}),$$

где $\bar{K}_j = K_j - K_{j-1}$, $j = 4, 3, 2$, $\bar{K}_1 := K_1$, $\bar{K}_j = \text{diag}(\bar{k}_{ji})$, $\bar{k}_{ji} > 0$, а элементы смешанного вектора $w_5 = \text{col}(w_{51}, \dots, w_{5n})$, $w_5 = -Ri - \Psi\omega - L\Psi^{-1}JK^{-1}(\dot{w}_4 - H(\dot{H}^{-1}(KJ^{-1}\Psi i - w_4) + K_4((K_4 - K_3)e_4 - e_5)))$ трактуются как ограниченные возмущения. Диапазоны их изменения $|w_{5i}(t)| \leq W_{5i} \quad \forall t \geq 0, \quad i = \overline{1, n}$ определяются с учетом априорных предположений при выбранных коэффициентах усиления (5).

В отличие от системы (1)-(2) в СБФ (6)-(7) возмущения w_5 являются согласованным, т.е. принадлежат пространству истинного управления. Как следствие, переменные состояния $e_j \in R^n$, $j = \overline{2, 5}$ системы (2.3)-(2.4) являются наблюдаемыми относительно измерений ошибок слежения e_1 , однако получить с помощью наблюдателя состояния

текущие оценки возмущений $w_5(t)$ для синтеза комбинированного управления и их компенсации не представляется возможным из-за неопределенной матрицы B (в силу электромеханической природы объекта управления B является положительно определенной). Следовательно, обеспечить инвариантность замкнутой системы по отношению к внешним возмущениям можно только путем их подавления с помощью разрывного управления в форме обратной связи:

$$(8) \quad u = -K_5 \text{sign}e_5, \quad \text{sign}e_5 = \text{col}(\text{sign}e_{5_1}, \dots, \text{sign}e_{5_n}), \quad K_5 = \text{diag}(k_{5_i}), k_{5_i} > 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

В частном случае, когда матрица $H^{-1}(q_1)$, и, следовательно, B являются диагональными, неравенства для выбора амплитуд разрывных управлений k_{5_i} , $i = \overline{1, n}$ получим из достаточных условий [3]: $e_{5_i} \dot{e}_{5_i} < 0 \Rightarrow k_{5_i} > W_{5_i}$, $i = \overline{1, n}$. При их выполнении за конечное время $t > T > 0$ возникают скользящие режимы в виртуальном пространстве смешанных переменных на поверхностях $e_{5_i} = 0$, $i = \overline{1, n}$ и в системе (6)–(8) обеспечивается экспоненциальная стабилизация ошибок слежения:

$$(9) \quad e_5(t) = 0 \Rightarrow e_4(t) \rightarrow 0 \Rightarrow e_3(t) \rightarrow 0 \Rightarrow e_2(t) \rightarrow 0 \Rightarrow e_1(t) \rightarrow 0 \Rightarrow q_1(t) \rightarrow g(t).$$

В общем случае для выбора амплитуд разрывных управлений, обеспечивающих (9), следует использовать метод иерархии управлений [3, 7, 8].

3. Синтез наблюдателя пониженного порядка

Для реализации базового закона управления (8) нужно получить оценки смешанных переменных $e_5(t)$. Для решения этой задачи разработана процедура синтеза наблюдателя пониженного порядка, построенного как реплика преобразованной системы (6), где переменные e_5 трактуются как ограниченные возмущения: $|e_{5_i}(t)| \leq F_{5_i}$, $|\dot{e}_{5_i}(t)| \leq \bar{F}_{5_i} \quad \forall t \geq 0$. В отличие от стандартных наблюдателей пониженного порядка, где отбрасывается динамика измеряемых переменных, в данном случае, наоборот, отбрасывается динамика неизмеряемых переменных $e_5(t)$. Для обеспечения инвариантности к «внешним возмущениям» на главную диагональ матрицы системы (6) вводятся корректирующие матрицы с большими коэффициентами с помощью невырожденной замены переменных: $P\bar{e} = s$, $\det P_{4n \times 4n} \neq 0$, $\bar{e} = \text{col}(e_1, \dots, e_4)$, $s = \text{col}(s_1, \dots, s_4)$, где

$$P = \begin{pmatrix} I & O & O & O \\ -L_2 & I & O & O \\ P_{31} & -L_3 & I & O \\ P_{41} & P_{42} & -L_4 & I \end{pmatrix}, \quad L_j = \text{diag}(l_{ji}), l_{2i} > l_{3i} > l_{4i} > 0, \quad i = \overline{1, n},$$

где O, I – нулевая и единичная матрицы соответственно размерности $n \times n$, $s_1 = e_1$,

$$P_{41} = P_{42}(\bar{K}_2 - L_3 - L_4 - \bar{K}_4) + L_3 L_4 (L_4 + \bar{K}_4 - \bar{K}_3),$$

$$P_{42} = (L_4 + \bar{K}_4 - \bar{K}_3)L_4, \quad P_{31} = P_{42} + L_3(L_3 - L_4 + \bar{K}_3 - \bar{K}_2).$$

После преобразований подобия система (6) приводится к виду

$$\dot{s}_1 = -(K_1 - L_2)e_1 + s_2, \quad \dot{s}_j = S_{j1}e_1 - (L_j + \bar{K}_j - L_{j+1})s_j + s_{j+1}, \quad j = 2, 3,$$

$$\dot{s}_4 = S_{41}e_1 - (L_4 + \bar{K}_4)s_4 + e_5,$$

где

$$\begin{aligned}
S_{21} &= -L_2(L_2 - L_3 + \bar{K}_2 - \bar{K}_1) - P_{31}, \quad S_{31} = -L_2L_3(L_3 + \bar{K}_3 - L_4 - \bar{K}_2) + (L_3 + \bar{K}_3 - L_4 + L_2 - \\
&\quad - \bar{K}_1)P_{31} - L_2P_{42} - P_{41}, \\
S_{41} &= -L_2L_3L_4(L_4 + \bar{K}_4 - \bar{K}_3) + (L_4 + \bar{K}_4 + L_2 - \bar{K}_1)P_{41} + (L_4 + \bar{K}_4 + \\
&\quad + L_3 - \bar{K}_2)L_2P_{42} + (L_4 + \bar{K}_4 - \bar{K}_3)L_4P_{31} - P_{42}P_{31},
\end{aligned}$$

и служит основой для наблюдателя вида

$$\begin{aligned}
(10) \quad \dot{z}_1 &= -(\bar{K}_1 - L_2)z_1 + z_2 + L_1(s_1 - z_1), \quad L_1 = \text{diag}(l_i), l_i > 0, \quad i = \overline{1, n}. \\
\dot{z}_j &= S_{j1}e_1 - (L_j + \bar{K}_j - L_{j+1})z_j + z_{j+1}, \quad j = 2, 3; \quad \dot{z}_4 = S_{41}e_1 - (L_4 + \bar{K}_4)z_4,
\end{aligned}$$

где $z_j \in R^n$ ($j = \overline{1, 4}$) – вектор состояния наблюдателя. Относительно ошибок наблюдения $\varepsilon_j = s_j - z_j \in R^n$ получим систему с верхнетреугольной блочной матрицей

$$(11) \quad \dot{\varepsilon}_j = -(L_j + \bar{K}_j - L_{j+1})\varepsilon_j + \varepsilon_{j+1}, \quad j = \overline{1, 3}, \quad \dot{\varepsilon}_4 = -(L_4 + \bar{K}_4)\varepsilon_4 + e_5.$$

Последовательно, снизу вверх, исключим из системы уравнений (11) переменные $\varepsilon_4, \varepsilon_3, \varepsilon_2$ и установим связь между «внешним возмущением» $e_5(t)$, измеряемой ошибкой наблюдения $\varepsilon_1(t) = e_1(t) - z_1(t)$ и производными переменных системы (11):

$$\begin{aligned}
e_5 &= (L_1 + \bar{K}_1 - L_2)(L_2 + \bar{K}_2 - L_3)(L_3 + \bar{K}_3 - L_4)(L_4 + \bar{K}_4)\varepsilon_1 + \Phi, \quad \Phi = (\phi_1, \dots, \phi_n)^T, \\
\Phi &= (L_2 + \bar{K}_2 - L_3)(L_3 + \bar{K}_3 - L_4)(L_4 + \bar{K}_4)\dot{\varepsilon}_1 + (L_3 + \bar{K}_3 - L_4)(L_4 + \bar{K}_4)\dot{\varepsilon}_2 + (L_4 + \bar{K}_4)\dot{\varepsilon}_3 + \dot{\varepsilon}_4.
\end{aligned}$$

Переменные $v_i(t) = (l_i + \bar{k}_{1i} - l_{2i})(l_{2i} + \bar{k}_{2i} - l_{3i})(l_{3i} + \bar{k}_{3i} - l_{4i})(l_{4i} + \bar{k}_{4i})\varepsilon_{1i}(t)$, $i = \overline{1, n}$, которые можно трактовать как виртуальные корректирующие воздействия наблюдателя (10), служат оценкой «внешнего возмущения» $\forall t > t_0, t_0 < T$ в следующем смысле:

$$|e_{5i}(t) - v_i(t)| \leq |\phi_i| \leq \bar{F}_i \left(\sum_{j=1}^3 \frac{1}{l_{ji} + \bar{k}_{ji} - l_{j+1,i}} + \frac{1}{l_{4i} + \bar{k}_{4i}} \right) \leq \delta_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Заданная точность оценивания обеспечивается выбором больших коэффициентов:

$$\alpha_i = \delta_i / (4\bar{F}_i), \quad l_{4i} > 1/\alpha_i - \bar{k}_{4i}, \quad l_{ji} > l_{j+1,i} + 1/\alpha_i - \bar{k}_{ji}, \quad j = 3, 2, 1, \quad i = \overline{1, n}.$$

Наблюдатель (10) имеет меньший порядок, чем наблюдатель Халила [9] и более удобную настройку. Наблюдатели с большими коэффициентами приводят к большим всплескам вначале переходного процесса, но в данном случае это не является проблемой, так как используется всюду ограниченное управление (8), которое в замкнутой системе (1)–(2), (10) реализуется в виде $u(t) = -K_5 \text{sign}v(t)$ и обеспечивает (3).

Результаты моделирования подтвердили эффективность разработанного метода, не требующего измерений обобщенных скоростей и переменных электроприводов.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-01-00846А).

Список литературы

1. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
2. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами. М.: Мир, 1989. 376 с.
3. Краснова С.А. Каскадный синтез системы управления манипулятором с учетом динамики электроприводов // Автоматика и телемеханика. 2001. № 11. С. 51-72.
4. Ахобадзе А.Г., Краснова С.А. Решение задачи слежения в условиях неопределенности на основе совместной блочно-канонической формы управляемости и наблюдаемости // Управление большими

- системами. 2009. Вып. 24. С. 34-80.
5. Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В. Блочный подход к анализу и синтезу инвариантных нелинейных систем слежения // Автоматика и телемеханика. 2017. № 12. С. 26-53.
 6. Utkin V.I., Guldner J., Shi J. Sliding mode control in electromechanical systems. N.Y: CRC Press, 2009.
 7. Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В., Нгуен Тхань Тиен. Прямой метод синтеза системы управления рабочим органом манипулятора при неполных измерениях // Проблемы управления. 2008. № 1. С. 10-18.
 8. Краснова С.А., Антипов А.С. Иерархический синтез сигмоидальных обобщенных моментов манипулятора в условиях неопределенности // Проблемы управления. 2016. № 4. С. 10-21.
 9. Khalil H.K., Praly L. High-gain observers in nonlinear feedback control // Int. J. Robust and Nonlinear Control. 2014. Vol. 24, No. 6. P. 993-1015.