СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ПОЛНОПРИВОДНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Краснов Д. В.[1]
(*ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва*)

В детерминированной постановке рассматривается задача наблюдения неизмеряемых переменных электромеханической системы, функционирующей в условиях параметрической неопределенности. Для случая, когда датчики расположены только на электрических исполнительных устройствах, формализованы условия, при которых задача наблюдения всего вектора состояния имеет решение без повышения динамического порядка замкнутой системы за счет регрессоров и идентификаторов неопределенных параметров. В качестве основы для построений принят подход к оцениванию действующих на объект внешних возмущений, который не нуждается в использовании динамических моделей внешних воздействий. В рамках данного подхода для рассматриваемой электромеханической системы обоснована структура редуцированного робастного наблюдателя состояния. В отличие от стандартного редуцированного наблюдателя Люенбергера, в котором не используются дифференциальные уравнения измеряемых переменных; в предлагаемом наблюдателе не используются дифференциальные уравнения, описывающие динамику неизмеряемых переменных состояния, которые при решении задачи наблюдения полагаются внешними ограниченными возмущениями. Разработана декомпозиционная процедура настройки параметров кусочно-линейных обратных связей в наблюдателе, обеспечивающая стабилизацию с заданной точностью за заданное время ошибок наблюдения и их производных. Показано, что оценочными сигналами неизмеряемых переменных служат соответствующие переменные и управляющие воздействия наблюдателя.

Ключевые слова: электромеханическая система, робастность, редуцированный наблюдатель состояния, декомпозиция, кусочно-линейная обратная связь.

1. Введение

В практических приложениях очень востребованы методы управления нелинейными и многосвязными техническими объектами, обеспечивающие выполнение различных рабочих сце-

---

[1] *Дмитрий Валентинович Краснов, н.с.* (*dim93kr@mail.ru*).

нариев без усложнения аппаратной оснастки. В частности, использование наблюдателей состояния и возмущений [1–7] в контуре управления электромеханическими объектами обеспечивает работоспособность и отказоустойчивость системы в условиях неполного комплекта измерительных устройств.

Задача наблюдения для электромеханических систем достаточно сложна даже в условиях полной параметрической определенности из-за нелинейности математической модели объекта наблюдения и наличия перекрестных связей. Для решения задачи наблюдения при параметрической неопределенности необходим совместный анализ поведения ошибок наблюдения и переменных состояния замкнутой системы, что приводит к громоздким построениям. Другой вариант – использование регрессоров и идентификаторов неопределенных параметров – приводит к дополнительному расширению динамического порядка замкнутой системы [8] и часто к недопустимо большим ошибкам и времени идентификации.

В данной работе рассматривается альтернативный подход к решению задачи наблюдения в условиях параметрической неопределенности для полноприводных электромеханических объектов, в которых датчики установлены только на приводах. Для оценивания неизмеряемых переменных состояния разработан метод построения и синтеза редуцированного наблюдателя состояния специального вида, в котором реализована идеология оценивания внешних ограниченных сигналов без использования их динамической модели [2–7]. А именно, наблюдатель строится как копия дифференциального уравнения модели объекта, на которую действует неизвестный сигнал. Если правая часть такого уравнения параметрически определена и зависит от известных переменных состояния, то можно получить оценку внешнего сигнала с помощью корректирующего воздействия наблюдателя. С этой целью применяются так называемые «силовые» управляющие воздействия: линейные управления с большими коэффициентами [2, 3] или разрывные управления с организацией скользящего режима [6, 7]. В практических приложениях целесообразно использовать непрерывные, всюду ограниченные управляющие воздействия в виде кусочно-линейных функций

[3–5]. Их применение эффективно в задачах обеспечения инвариантности по отношению к параметрическим и внешним возмущениям и обеспечивает сходимость оценочных сигналов к неизмеряемым сигналам с любой заданной точностью.

В данной работе указанный выше метод применяется для оценивания неизмеряемых переменных вектора состояния. В разделе 2 дано описание рассматриваемого электромеханического объекта, цель и закон управления не конкретизируются, но предполагается, что для синтеза обратной связи используются все переменные состояния. В разделе 3 формализуются условия разрешимости задачи наблюдения по измеряемым выходам без необходимости идентификации неопределенных параметров. Представлена декомпозиционная процедура синтеза редуцированного робастного наблюдателя с кусочно-линейными управляющими воздействиями. Задача рассматривается в детерминированной постановке, предполагается достаточно высокое качество имеющихся измерений [9] и отсутствие шумов.

2. Описание модели объекта наблюдения и постановки задачи

В качестве объекта наблюдения рассматривается математическая модель полноприводной электромеханической системы, которая состоит из двух связанных подсистем [7, 11]

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

(2) $\dot{\varphi} = \omega,\ \dot{\omega} = J^{-1}(\Psi\tau - D\omega - K(\varphi - q_1)),\ \dot{\tau} = L^{-1}(u - R\tau - \Psi\omega),$

где механическая подсистема (1) – это модель манипулятора с n жесткими звеньями, которые образуют кинематические пары 5-го класса и эластично соединены с валами редукторов, на которых установлены электрические исполнительные устройства (2) – двигатели постоянного тока (ДПТ). В системе (1)–(2) все векторы и матрицы имеют размерности n и $n \times n$ соответственно, а именно: векторы обобщенных координат q_1 и скоростей q_2 манипулятора, угловых положений φ и скоростей ω валов редукторов, токов якорных цепей ДПТ τ, напряжений питания якорных цепей ДПТ u (управления), неизвестных ограниченных обобщенных сил $f(t)$; нелинейные матрицы инерции $H(q_1)$, $H^{-1}(q_1)$, центростремительных и кориолисовых сил $C(q_1, q_2)$, а также диагональные матрицы K, J, L, R, Ψ, D с положительными элементами – коэффициентами крутильной жесткости, приведенными моментами инерции на валу ДПТ, индуктивности и активных сопротивлений цепей якорей, магнитных потоков и вязкого демпфирования соответственно.

Элементы матриц K, J, Ψ и D известны и постоянны, матриц H, C, L и R – не известны, их значения могут изменяться в процессе работы в допустимых интервалах с известными границами. Предполагается, что датчики расположены только на приводах, измеряются угловые положения валов редукторов $\varphi(t)$ и токи якорных цепей $\tau(t)$. Ставится задача синтеза наблюдателя состояния для оценивания неизмеряемых переменных $q_1(t)$, $q_2(t)$, $\omega(t)$ в предположении, что известны диапазоны их изменения в процессе работы объекта:

$$|\omega_j(t)| \le X_{1j},\ |q_{1j}(t)| \le X_{2j},\ |q_{2j}(t)| \le X_{3j},\ t \ge 0,\ j = \overline{1, n}. \tag{3}$$

Ограничения (3) связаны с конструкцией манипулятора и конструктивными параметрами системы. Отметим, что разомкнутая система (1)–(2) устойчива, поэтому ее переменные останутся ограниченными при внешних ограниченных воздействиях.

При решении поставленной задачи требуется обеспечить заданную точность оценивания, а именно,

$$\begin{gathered} |\omega_j(t) - \tilde{\omega}_j(t)| \le \delta_{1j},\ |q_{1j}(t) - \tilde{q}_{1j}(t)| \le \delta_{2j}, \\ |q_{2j}(t) - \tilde{q}_{2j}(t)| \le \delta_{3j},\ t \ge T,\ j = \overline{1, n}, \end{gathered} \tag{4}$$

где $\tilde{\omega}_j(t)$, $\tilde{q}_{1j}(t)$, $\tilde{q}_{2j}(t)$ – обозначения оценок неизмеряемых переменных, которые будут получены с помощью наблюдателя состояния, $\delta_{ij} > 0$ – заданные точности оценивания, которые устанавливаются исходя из требований к качеству процессов регулирования в замкнутой системе при конкретном законе управления в форме динамической обратной связи. Время обеспечения заданной точности $T > 0$ зависит от параметров подсистемы (2), его оценка будет получена в ходе построений.

Система (1)–(2) является наблюдаемой относительно измеряемых выходов [7]. Но построить для нее полноразмерный наблюдатель состояния достаточно проблематично из-за ее существенной параметрической неопределенности. В следующем разделе обосновывается возможность построения редуцированного наблюдателя состояния специального вида, разработана его структура и процедура синтеза. Научная новизна заключается в том, что предлагаемый подход не требует дополнительного решения задачи идентификации параметров неизвестных матриц H, C, L и R.

3. Декомпозиционный синтез редуцированного наблюдателя состояния

Стандартная концепция проектирования наблюдателя пониженного порядка состоит в том, что если нет необходимости в фильтрации измерений, то нет необходимости и в повторном оценивании измеряемых сигналов. Следовательно, для объекта наблюдения (1)–(2) размерности $5n$ с $2n$ выходами редуцированный наблюдатель будет размерности $3n$, при его построении в явном виде не используются дифференциальные уравнения, описывающие динамику выходных переменных [10]. При стандартном подходе к построению редуцированного наблюдателя нужно взять подсистему (1) и второе уравнение подсистемы (2). Однако второе уравнение подсистемы (1) нелинейно, содержит параметрические и внешние возмущения. Это сильно затруднит решение задачи наблюдения и приведет к значительным ошибкам оценивания без дополнительного использования динамических идентификаторов неизвестных параметров.

Чтобы избежать дополнительного повышения динамического порядка замкнутой системы, в данной работе за основу для построения редуцированного наблюдателя предлагается использовать модель с известными параметрами размерности $3n$ смешанного вида, которая включает дифференциальные уравнения измеряемых и неизмеряемых переменных, а именно:

(5) $\quad \dot{\varphi} = \omega,\ \dot{\omega} = J^{-1}(\Psi\tau - D\omega - K(\varphi - q_1)),\ \dot{q}_1 = q_2.$

Система (5) является линейной с диагональными известными матрицами (сигналы $\tau(t)$ известны и подлежат компенсации), имеет структуру вход – выход и является наблюдаемой относительно выхода $\varphi(t)$. Неизмеряемые переменные $q_2(t)$, дифференциальные уравнения которых отброшены, трактуются как неопределенные ограниченные (3) входы. Этот факт является причиной решения задачи наблюдения с заданной точностью (4).

На основе системы (5) построим наблюдатель вида

(6) $\dot{z}_1 = z_2 + v_1,\ \dot{z}_2 = A_1\tau - A_2 z_2 + A_3 z_3 - A_3\varphi + v_2,\ \dot{z}_3 = v_3,$

где $z_i \in R^n$ – вектор состояния, $v_i \in R^n$ – вектор управляющих воздействий наблюдателя, $A_1 = J^{-1}\,\Psi$, $A_2 = J^{-1}\,D$, $A_3 = J^{-1}\,K$, $A_i = \mathrm{diag}\{a_{ij}\}$, $a_{ij} > 0$, $i = 1, \ldots, 3$, здесь и далее $j = 1, \ldots, n$. Синтез наблюдателя заключается в выборе управляющих воздействий, обеспечивающих стабилизацию ошибок наблюдения

(7) $\varepsilon_1 = \varphi - z_1,\ \varepsilon_2 = \omega - z_2,\ \varepsilon_3 = q_1 - z_3,\ \varepsilon_i = (\varepsilon_{i1},\ \varepsilon_{i2},\ \ldots,\ \varepsilon_{in})$

и их производных

(8) $\dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_2 - v_1(\varepsilon_1),\ \dot{\varepsilon}_2 = -A_2\varepsilon_2 + A_3\varepsilon_3 - v_2(\varepsilon_1),\ \dot{\varepsilon}_3 = q_2 - v_3(\varepsilon_1).$

Из выражений (4)–(8) следует, что оценки неизмеряемых переменных $\omega(t)$ и $q_1(t)$ дадут переменные наблюдателя $z_2(t) = \tilde{\omega}(t)$ и $z_3(t) = \tilde{q}_1(t)$. В рамках используемого подхода [2–7] оценки $q_2(t)$ дадут управляющие воздействия наблюдателя $v_3(t) = \tilde{q}_2(t)$.

Для стабилизации системы (8) и решения задачи (4) используем кусочно-линейные управляющие воздействия [3–5]:

(9)
$$v_{1j} = m_{1j}\mathrm{sat}(k_{1j}\varepsilon_{1j}) = \begin{cases} m_{1j}\mathrm{sign}(\varepsilon_{1j}),\ |\varepsilon_{1j}| > 1/k_{1j}, \\ m_{1j}k_{1j}\varepsilon_{1j},\ |\varepsilon_{1j}| \le 1/k_{1j}; \end{cases}$$
$$v_{ij} = m_{ij}\mathrm{sat}(k_{ij}v_{i-1,j}) = \begin{cases} m_{ij}\mathrm{sign}(v_{i-1,j}),\ |v_{i-1,j}| > 1/k_{ij}, \\ m_{ij}k_{ij}v_{i-1,j},\ |v_{i-1,j}| \le 1/k_{ij},\ i = 2,\ 3. \end{cases}$$

Управляющие воздействия (9) имеют по два настраиваемых параметра: $m_{ij} = \mathrm{const} > 0$ – амплитуды, обеспечивающие заданное время стабилизации системы (8)–(9); $k_{ij} = \mathrm{const} > 0$ – большие коэффициенты, обеспечивающие заданную точность стабилизации (4). С учетом измерений $\varphi(t)$ в системах (6), (8) устанавливаются следующие начальные условия:

$$z_{1j}(0)=\varphi_j(0)\Rightarrow\varepsilon_{1j}(0)=0,$$

$$z_{2j}(0)=0\Rightarrow\varepsilon_{2j}(0)=\omega_j(0),\ \left|\varepsilon_{2j}(0)\right|\le X_{1j}, \tag{10}$$

$$z_{3j}(0)=0\Rightarrow\varepsilon_{3j}(0)=q_{1j}(0),\ \left|\varepsilon_{3j}(0)\right|\le X_{2j}.$$

Лемма. Если в системе (8)–(9) начальные значения (10) и неизвестные входы (3) ограничены известными константами, то тогда для любых $\delta_{ij}>0$ существуют такие действительные числа $\overline{m}_{ij},\overline{k}_{ij}>0,$ что при всех $m_{ij}\ge\overline{m}_{ij},\ k_{ij}\ge\overline{k}_{ij},\ i=1,\ldots,3,$ будут выполнены следующие неравенства:

$$\begin{gathered}\left|\varepsilon_{2j}(t)\right|=\left|\omega_j(t)-z_{2j}(t)\right|\le\delta_{1j},\ \left|\varepsilon_{2j}(t)\right|=\left|q_{1j}(t)-z_{3j}(t)\right|\le\delta_{2j},\\ \left|q_{2j}(t)-v_{3j}(t)\right|\le\delta_{3j},\ t\ge T>0.\end{gathered} \tag{11}$$

Доказательство. В рамках используемого подхода требуется последовательно обеспечить стабилизацию ошибок наблюдений и их производных на следующих временных интервалах:

$$0<t_1<t_2<t_3<t_4<T.$$

Формализуем требуемое поведение переменных замкнутой системы (8)–(9) на заданных временных интервалах, обеспечивающее решение поставленной задачи (11):

$$\left|\varepsilon_{1j}(t)\right|\le 1/k_{1j},\ t\ge 0; \tag{12}$$

$$\left|\varepsilon_{2j}(t)-v_{1j}(t)\right|=\left|\alpha_{1j}(t)\right|\le\overline{\alpha}_{1j},\ t\ge t_1; \tag{13}$$

$$\left|v_{1j}(t)\right|\le 1/k_{2j}\Leftrightarrow\left|\varepsilon_{2j}(t)\right|\le\overline{\alpha}_{1j}+1/k_{2j},\ t\ge t_2; \tag{14}$$

$$\left|a_{3j}\varepsilon_{3j}(t)-v_{2j}(t)\right|=\left|\alpha_{2j}(t)\right|\le a_{3j}\overline{\alpha}_{2j},\ t\ge t_3; \tag{15}$$

$$\left|v_{2j}(t)\right|\le 1/k_{3j}\Leftrightarrow\left|\varepsilon_{3j}(t)\right|\le\overline{\alpha}_{2j}+1/(a_{31}k_{3j}),\ t\ge t_4; \tag{16}$$

$$\left|q_{2j}(t)-v_{3j}(t)\right|\le\overline{\alpha}_{3j},\ t\ge T. \tag{17}$$

Выполнение неравенств (12), (14), (16), которые означают попадание аргументов в линейные зоны управляющих воздействий (9) за заданное время, обеспечивается выбором соответствующих амплитуд. Неравенства (13), (15), (17) и заданная точность оценивания (11) обеспечивается выбором больших коэффициентов управляющих воздействий (9). Равенство знаков управляемой переменной и управления в первом уравнение системы (8)–(9) sign (ε_{1j}) = sign (v_{1j}) выполняется при $0 \le t$. Достаточные условия, обеспечивающие (12), имеют вид:

$$\begin{aligned} &\varepsilon_{1j}\dot{\varepsilon}_{1j} = \varepsilon_{1j}(\varepsilon_{2i} - m_{1i}\operatorname{sign}(\varepsilon_{1i})) \le |\varepsilon_{1i}|(|\varepsilon_{2i}| - m_{1i}), \\ &m_{1i} > |\varepsilon_{2i}| \Rightarrow \varepsilon_{1j}\dot{\varepsilon}_{1j} < 0. \end{aligned} \tag{18}$$

В общем случае равенства sign (ε_{ij}) = sign (v_{ij}), $i = 2, 3$, на начальном этапе не обеспечиваются и управления (9) с учетом (13)–(17) можно представить в виде

$$\begin{aligned} &v_{2j} = \begin{cases} -m_{2j}\operatorname{sign}(\varepsilon_{2j}), \; t \in [0;\, t_1), \\ m_{2j}\operatorname{sign}(\varepsilon_{2j}), \; t \in [t_1;\, t_2), \\ m_{2j}k_{2j}(\varepsilon_{2j}(t) \pm \alpha_{1j}), \; t \ge t_2; \end{cases} \\ &v_{3j} = \begin{cases} -m_{3j}\operatorname{sign}(\varepsilon_{3j}), \; t \in [0;\, t_3), \\ m_{3j}\operatorname{sign}(\varepsilon_{3j}), \; t \in [t_3;\, t_4), \\ m_{3j}k_{3j}a_{3j}(\varepsilon_{3j}(t) \pm \alpha_{2j}), \; t \ge t_4. \end{cases} \end{aligned} \tag{19}$$

Из выражений (19) с учетом (10) следует оценка максимальных значений ошибок наблюдения

$$\begin{aligned} &|\varepsilon_{3j}(t)| \le |\varepsilon_{3j}(t_3)| \le X_{2j} + (X_{3j} + m_{3j})t_3 = E_{3j}, \; t \ge 0, \\ &|\varepsilon_{2j}(t)| \le |\varepsilon_{2j}(t_1)| \le X_{1j} + (a_{3j}E_{3j} + m_{2j}) / a_{2j} = E_{2j}. \end{aligned} \tag{20}$$

С учетом (18), (20) достаточные условия, обеспечивающие (14), (16), имеют вид:

$$\begin{aligned} &m_{3j} \ge \frac{E_{3j}}{t_4 - t_3} + X_{3j} \Rightarrow \overline{m}_{3j} = \frac{X_{2j} + X_{3j}t_4}{t_4 - 2t_3}; \\ &m_{2j} \ge \frac{E_{2j}}{t_2 - t_1} + a_{3j}E_{3j} \Rightarrow \overline{m}_{2j} = \frac{X_{1j} + a_{3j}E_{3j}(t_2 - t_1 + 1/a_{2j})}{t_2 - t_1 - 1/a_{2j}}; \\ &\overline{m}_{1i} > X_{1j} + (a_{3j}E_{3j} + m_{2j}) / a_{2j}. \end{aligned} \tag{21}$$

Из (21) следуют ограничения $t_2 > t_1 + 1 / a_{2j}$, $t_4 > 2t_3$, которые надо учитывать при назначении интервалов времени. При

$$(22)\quad \begin{array}{l} t_1 \in [1/\min\{a_{2j}\};\, \bar{t}];\; t_2 = 3t_1,\; t_3 = 4t_1,\; t_4 = 9t_1,\; T = 10t_1, \\ t_1 = \bar{t} > 0;\; t_2 = 2t_1 + \bar{a},\; t_3 = 3t_1 + \bar{a},\; t_4 = 7t_1 + 2\bar{a},\; T = 8t_1 + 2\bar{a} \end{array}$$

имеем оценку времени решения задачи наблюдения

$$(23)\quad 10/\min\{a_{2j}\} \le T \le 10\bar{t}.$$

После фиксации t_1^* (22) выбор амплитуд, обеспечивающий (12), (14), (16), выполняется в следующем порядке:

1) $m_{3j}^* \ge \overline{m}_{3j}(t_1^*)$ (21);
2) $E_{3j}(m_{3j}^*, t_1^*)$ (20);
3) $m_{2j}^* \ge \overline{m}_{2j}(E_{3j}, t_1^*)$ (21);
4) $m_{1j}^* \ge \overline{m}_{1j}(m_{2j}^*, E_{3j})$ (21).

Для выбора $k_{ij} = \text{const} > 0$ (9), обеспечивающих (12), (14), (16) с заданной точностью (11), рассмотрим оценки решений замкнутой системы (8) в линейных зонах на интервалах [0; t_1], [t_2; $t_3 = t_2 + t_1$], [t_4; $T = t_4 + t_1$] соответственно:

$$(24)\quad \begin{array}{l} \left|\varepsilon_{1j}(t_1)\right| \le \dfrac{E_{2j}}{m_{1j}k_{1j}} + \dfrac{m_{1j} - E_{2j}}{m_{1j}k_{1j}} \exp(-m_{1j}k_{1j}t_1), \\ \left|\varepsilon_{2j}(t) - v_{1j}(t)\right| \le \bar{\alpha}_{1j},\; t \ge t_1 \Leftrightarrow (m_{1j} - E_{2j})e^{-m_{1j}k_{1j}t_1} \le \bar{\alpha}_{1j}; \end{array}$$

$$\left|\varepsilon_{2j}(t_3)\right| \le \bar{\alpha}_{1j} + \frac{m_{2j} - a_{3j}E_{3j}}{m_{2j}k_{2j}} \exp(-(m_{2j}k_{2j} + a_{2j})t_1) +$$

$$(25)\quad + a_{3j}E_{3j}/(m_{2j}k_{2j}) \le \delta_{1j},\; \left|a_{3j}\varepsilon_{3j}(t) - v_{2j}(t)\right| \le a_{3j}\bar{\alpha}_{2j},\; t \ge t_3 \Leftrightarrow$$

$$(m_{2j} - a_{3j}E_{3j})\exp(-(m_{2j}k_{2j} + a_{2j})t_1) \le a_{3j}\bar{\alpha}_{2j};$$

$$\left|\varepsilon_3(T)\right| \le \bar{\alpha}_{2j} + \frac{m_{3j} - X_{3j}}{m_{3j}k_{3j}a_{3j}} \exp(-(m_{3j}k_{3j}a_{3j})t_1) +$$

$$(26)\quad + X_{3j}/(m_{3j}k_{3j}a_{3j}) \le \delta_{2j},\; \left|q_{2j}(t) - v_{3j}(t)\right| \le \bar{\alpha}_{3j}, t \ge T \Leftrightarrow$$

$$(m_{3j} - X_{3j})\exp(-(m_{3j}k_{3j}a_{3j})t_1) \le \bar{\alpha}_{3j} \le \delta_{3j}.$$

Из (24)–(26) следует, что ошибки наблюдения сходятся в следующие окрестности нуля:

$$(27)\quad \begin{aligned} &\left|\varepsilon_{2j}(t)\right| \le \bar{\alpha}_{1j} + \frac{a_{3j}(E_{3j} + \bar{\alpha}_{2j})}{m_{2j}k_{2j}} \le \delta_{1j},\ t \ge t_3, \\ &\left|\varepsilon_3(t)\right| \le \bar{\alpha}_{2j} + \frac{X_{3j} + \delta_{3j}}{m_{3j}k_{3j}a_{3j}} \le \delta_{2j},\ t \ge T. \end{aligned}$$

Примем, например, $\bar{\alpha}_{ij} = \delta_{ij}/2, i = 1, 2, \bar{\alpha}_{3j} = \delta_{3j}$. Тогда из (24)–(27) получим нижние границы для выбора больших коэффициентов, при уже выбранных амплитудах, обеспечивающие заданную точность оценивания (11):

$$(28)\quad \begin{aligned} &\bar{k}_{1j} = \frac{1}{m_{1j}^* t_1^*} \ln \frac{2(m_{1j}^* - E_{2j})}{\delta_{1j}}; \\ &\bar{k}_{2j} = \frac{1}{m_{2j}^*} \max\left\{ \frac{2E_{3j} + \delta_{2j}}{\delta_{1j}/a_{3j}}; \frac{1}{t_1^*} \ln \frac{2(m_{2j}^* - a_{3j}E_{3j})}{a_{3j}\delta_{2j}} - a_{2j} \right\}; \\ &\bar{k}_{3j} = \frac{1}{m_{3j}^* a_{3j}} \max\left\{ \frac{2(X_{3j} + \delta_{3j})}{\delta_{2j}}; \frac{1}{t_1^*} \ln \frac{m_{3j}^* - X_{3j}}{\delta_{3j}} \right\}. \end{aligned}$$

Таким образом, существуют такие $\bar{m}_{ij}$ (21) и $\bar{k}_{ij}$ (28), что при всех $m_{ij} \ge \bar{m}_{ij}, k_{ij} \ge \bar{k}_{ij}$, $i = 1, \ldots, 3$, неравенства (11) будут выполнены. Лемма доказана.

Величина ошибки $|\varepsilon_{1j}(t)| \le (2E_{2j} + \delta_{1j})/(2m_{1j}^* k_{1j}^*)$, $t_1 \le t$ не принципиальна в контексте поставленной задачи (4), так как переменные $\varphi(t)$ измеряются. В замкнутой системе базовый закон управления $u\ (q_1, q_2, \varphi, \omega, \tau)$ формируется и по измеряемым выходам, и по полученным оценкам $u\ (z_1, z_2, \varphi, \omega, \tau)$.

4. Заключение

Для электромеханического объекта с бездатчиковым манипулятором показана возможность оценивания неизмеряемых переменных вектора состояния с любой заданной точностью в условиях существенной параметрической неопределенности. Предложенный подход не требует идентификации неизвестных параметров и позволяет синтезировать наблюдатель независимо от используемого в замкнутой системе закона управления.

Литература

1. АНДРИЕВСКИЙ Б.Р., ФУРТАТ И.Б. *Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть 2. Приложения* // Автоматика и телемеханика. – 2020. – №10. – Р. 35–91.
2. АНТИПОВ А.С., КРАСНОВ Д.В., УТКИН А.В. *Декомпозиционный синтез системы управления электромеханическими объектами в условиях неполной информации* // Прикладная математика и механика. – 2019. – Т. 83, вып. 4. – С. 530–548.
3. КОКУНЬКО Ю.Г., КРАСНОВ Д.В., УТКИН А.В. *Два метода синтеза наблюдателей состояния и возмущений для беспилотного летательного аппарата* // Проблемы управления. – 2020. – №1. – С. 3–16.
4. КРАСНОВ Д.В., УТКИН А.В. *Синтез многофункциональной системы слежения в условиях неопределенности* // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 69. – С. 29–49.
5. КРАСНОВА С.А. *Оценивание внешних возмущений на основе виртуальных динамических моделей* // Управление большими системами. – 2018. – Вып. 76. – С. 6–25.
6. КРАСНОВА С.А., МЫСИК Н.С. *Синтез инвариантной системы управления продольным движением летательного аппарата* // Автоматика и телемеханика. – 2011. – №10. – С. 104–116.
7. КРАСНОВА С.А., УТКИН В.А., УТКИН А.В. *Блочный синтез управления механическими системами в условиях неопределенности* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. –№6. – С. 41–54.
8. ADETOLA V., GUAY M. *Finite-time parameter estimation in adaptive control of nonlinear systems* // IEEE Trans. on Automatic Control. – 2008. – Vol. 53, No. 3. – P. 807–811.
9. BUSURIN V.I., WIN Y.N., ZHEGLOV M.A. *Effect of Linear Acceleration on the Characteristics of an Optoelectronic Ring*

Transducer of Angular Velocity and its Compensation // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2019. – Vol. 55, No. 3. – P. 309–316.

10. LUENBERGER D.B. *Observers of multivariable systems* // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1966. – Vol. 11, No. 2. – P. 190–197.
11. SPONG M., HUTCHINSON S., VIDYASAGAR M. *Robot Modeling and Control*. – New York: Wiley, 2005. – 496 p.

SYNTHESIS OF A REDUCED ORDER OBSERVER FOR ALL-DRIVE ELECTROMECHANICAL SYSTEM

Dmitriy Krasnov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, researcher (dim93kr@mail.ru)

Abstract: In a deterministic formulation, the problem of observing non-measurable variables of an electromechanical system operating under conditions of parametric uncertainty is considered. For the case when the sensors are located only on electrical actuators, the conditions are formalized under which the problem of observing the entire state vector has a solution without increasing the dynamic order of the closed-loop system due to regressors and identifiers of undefined parameters. As a basis for constructions, an approach to assessing external disturbances acting on an object is adopted, which does not need to use dynamic models of external influences. Within the framework of this approach, for the considered electromechanical system, the structure of a reduced robust state observer is substantiated. Unlike the standard reduced Luenberger observer, which does not use differential equations of measured variables, the proposed observer does not use differential equations describing the dynamics of unmeasured state variables, which are assumed to be external bounded perturbations in solving the observation problem. A decomposition procedure for adjusting the parameters of piecewise linear feedbacks in an observer is developed, which provides stabilization with a given accuracy for a given time of observation errors and their derivatives. It is shown that the estimated signals of unmeasured variables are the corresponding variables and the control actions of the observer.

Keywords: electromechanical system, robustness, reduced state observer, decomposition, piecewise linear feedback.

УДК 62.50
ББК 32.817