

ВЫСОКОТОЧНОЕ ПОЗИЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ УПРУГОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С МИНИМАЛЬНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ДАТЧИКОВ

Введение. Под электромеханической системой (ЭМС) понимается механизм, состоящий из последовательно соединенных электродвигателя (для конкретности постоянного тока), редуктора, муфты и объекта управления. Редуктор и (или) муфта обладают ограниченной жесткостью, из-за чего в них при работе возникают упругие деформации. Объект управления (ОУ) представляет собой твердое тело с неизвестным моментом инерции, к которому приложены ступенчато изменяющиеся воздействия. Работа двигателя с редуктором и объекта управления сопровождается нелинейным трением. Система предназначена для позиционного управления объектом.

Анализ литературных источников. Традиционным методом управления такими системами является использование ПИ- и ПИД-регуляторов. Однако этот метод управления обладает недостаточной робастностью, плохо противодействует ступенчато изменяющимся внешним воздействиям и нелинейному трению. Этих недостатков лишены системы со скользящими режимами (ССР). К сожалению, скользящие режимы сопровождаются вибрациями, которые ухудшают надежность системы, повышают ее электропотребление, вызывают появление акустических шумов. Вибрации еще больше усиливаются при наличии высокочастотных помех. Кроме того, ССР могут возбуждать высокочастотную паразитную динамику (упругие колебания) вплоть до потери устойчивости. Хорошей робастностью к неопределенностям, быстрым реагированием на ступенчато изменяющиеся воздействия и одновременно при "мягком" управлении без скользящих режимов обладают комбинированные системы управления с оценкой и компенсацией неопределенностей динамики [1-3]. Поскольку в неопределенности включены и внешние воздействия, то указанные системы, помимо обеспечения робастности, обеспечивают высокую точность управления. Благодаря отсутствию скользящих режимов, эти системы в меньшей степени возбуждают паразитную высокочастотную динамику. В [4] рассматривалось управление упругой ЭМС с нелинейным трением посредством комбинированной системы управления при следующем составе измерителей: датчик тока якорной цепи двигателя постоянного тока (ДПТ), тахогенератор, измеряющий скорость ротора двигателя, и датчик положения ОУ. В отличие от [4] в данной работе тахогенератор отсутствует.

Постановка задачи. ЭМС описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$I_c \ddot{\varphi}_c = c(n^{-1}\varphi_m - \varphi_c) + f_c - f_l, \quad (1) \quad I_m \ddot{\varphi}_m = -n^{-1}c(n^{-1}\varphi_m - \varphi_c) + c_m i + f_m \quad (2) \quad Li + Ri = u - c_e \dot{\varphi}_m, \quad (3)$$

где φ_c, φ_m – углы поворота ОУ и ротора двигателя; i, u – ток и напряжение якорной цепи; I_c, I_m – моменты инерции ОУ и ротора двигателя; R, L – активное сопротивление и индуктивность якорной цепи; c_m, c_e – моментный и скоростной коэффициенты ДПТ; n – передаточное число редуктора; c – коэффициент жесткости упругой части; f_c, f_m – моменты нелинейного трения в ОУ и в двигателе соответственно; f_l – момент нагрузки.

В системе (1)-(3) неизвестными являются I_c, f_c, f_l, f_m . В состав ЭМС входят следующие измерители: датчик тока якорной цепи ДПТ и датчик положения ОУ. Таким образом, в системе пятого порядка измеряются 2 координаты: i, φ_c . Для обеспечения высокого качества управления необходимо оценить с помощью наблюдателей недостающие координаты вектора состояния: скорость ОУ, угол, скорость поворота ротора двигателя. При этом считается, что сопротивление R известно. В качестве модели трения использовалась модель LuGre [5], соответствующая ей зависимость трения от скорости представлена на рис. 1. Эту модель можно описать так:

$$f = -m \left[\dot{x} = 0, \forall |m| \leq f_0 \right] \quad (4) \quad f = -f_0 \operatorname{sign}(\dot{x}) \quad (5) \quad f = -\varphi(\dot{x}) \operatorname{sign}(\dot{x}) \quad [|\dot{x}| > 0], \quad (6)$$

где m – сумма всех внешних воздействий на объект, подверженный трению, f_0 – максимальный момент трения покоя, \dot{x} – относительная скорость трущихся поверхностей.

Поскольку точно функция трения $|f| = \varphi(\dot{x})$ не известна, то принято

$$f = f_0 + a|\dot{x}| \quad |\dot{x}| \leq |\dot{x}_{\min}|, \quad (7) \\ f = b + k|\dot{x}|, \quad k = \operatorname{tg} \alpha \quad |\dot{x}| > |\dot{x}_{\min}|.$$

где a, b – коэффициенты аппроксимации функции трения.

Целью данной работы является обеспечение высокой точности и быстродействия управления объектом с помощью компенсатора, состоящего из наблюдателей координат вектора состояния и неопределенностей и комбинированного регулятора.

Материалы исследования. Управляющее напряжение ограничено и представлено в виде

$$U = \operatorname{sat}(u_i + u_m + u_c), \quad (8)$$

где u_i, u_m, u_c – управляющие напряжения контуров тока, двигателя, объекта управления, синтезированные в виде

$$u_i = -Rk_i i, \quad (9) \quad u_m = -k_m \dot{\varphi}_m - kn^{-1}c(n^{-1}\dot{\varphi}_m - \dot{\varphi}_c) R c_{m1}^{-1}, \quad (10)$$

$$u_c = u_{c1} + u_{c2}, \quad (11) \quad u_{c1} = -k_{c1}(\varphi_c - \varphi_{cp}) - k_{c2}(\dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}_{cp}), \quad (12)$$

$$u_{c2} = -(1+k)(nc_{m1})^{-1} R \dot{f}_{c\Sigma}, \quad (13) \quad c_{m1} = c_m(1+k_i)^{-1} \quad (14)$$

где k_m, k, k_{c1}, k_{c2} – постоянные коэффициенты; символом «^» обозначены оценки соответствующих переменных;

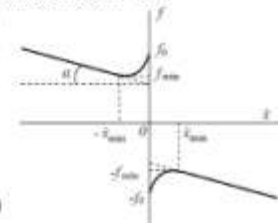


Рисунок 1 – Зависимость трения от скорости

u_{cz}, u_{cc} – управляющие напряжения стабилизации и компенсации неопределенности f_{cz} , оценку которой можно получить с помощью наблюдателя неопределенности k_c ,

$$\dot{\hat{f}}_{cz} = z - l_f (I_{c0} \dot{\hat{\phi}}_c + n I_m \dot{\hat{\phi}}_m + n c_m L R^{-1} i), \quad (15)$$

$$\dot{z} = l_f (\hat{f}_{cz} + n c_m R^{-1} (u - c_e \dot{\hat{\phi}}_m)), \quad (16)$$

где l_f – коэффициент передачи наблюдателя, $I_c = I_{c0} + I_{c\delta}$, I_{c0} – известное номинальное значение момента инерции ОУ, $I_{c\delta}$ – его неизвестное отклонение.

Алгоритм оценивания скорости ОУ имеет следующий вид [6]:

$$\dot{\hat{r}} = A \hat{r} + L_r (\hat{r}_1 - \phi_c), \quad (17)$$

где $\hat{r} = \begin{bmatrix} \hat{r}_1 \\ \hat{r}_2 \\ \hat{r}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\phi}_c \\ \dot{\hat{\phi}}_c \\ \ddot{\hat{\phi}}_c \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $L_r = \begin{bmatrix} l_{r1} \\ l_{r2} \\ l_{r3} \end{bmatrix}$,

L_r – матрица коэффициентов передачи асимптотического дифференциатора.

Наблюдатель координат вектора состояния двигателя синтезирован в виде

$$\dot{\hat{x}} = z + L_x L i, \quad (19) \quad \dot{z} = A \hat{x} + L_x (c_e \hat{x}_2 - u + R i) + B u, \quad (20)$$

где $\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\phi}_m \\ \dot{\hat{\phi}}_m \end{bmatrix}$, $z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -I_m^{-1} n^{-2} c & -I_m^{-1} c_m R^{-1} c_e \end{bmatrix}$,

$$B u = \begin{bmatrix} 0 \\ I_m^{-1} n^{-1} c \phi_c + I_m^{-1} c_m R^{-1} u \end{bmatrix}, L_x = \begin{bmatrix} l_{x1} \\ l_{x2} - I_m^{-1} c_m R^{-1} \end{bmatrix}.$$

l_{x1}, l_{x2} – коэффициенты наблюдателя.

При моделировании принимались следующие параметры: $I_{c0} = 250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, момент инерции считается неизвестным и находится в диапазоне $I_c = (0,83 \dots 1,5) I_{c0}$, $I_m = 27 \cdot 10^{-5} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $R = 0,075 \text{ Ом}$, $L = 3,375 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$, $n = 377$, $c_m = 0,062 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{А}^{-1}$, $c = 3 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{рад}^{-1}$, $c_e = 0,062 \text{ В}\cdot\text{с}\cdot\text{рад}^{-1}$, $f_f = 0 \dots 500 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $f_c = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $f_n = 0,15 \text{ Н}\cdot\text{м}$. На рис. 2–4 показан переходный процесс, возникающий при подаче ступенчатого программного сигнала величиной 3° ($\phi_{cp} = 0,05236 \text{ рад}$) при номинальном моменте инерции ОУ. Нагрузка в виде ступенчатого сигнала прикладывалась на $0,5 \text{ с}$ и снималась на $0,8 \text{ с}$. На рис. 2 показан весь переходный процесс, а на рис. 3, 4 – его фрагменты. На рис. 3 пунктирными линиями ограничена зона $\pm 30 \text{ усл. е}$, на рис. 4 – зона $\pm 0,1 \text{ усл. е}$. Анализ графиков показывает, что синтезированный алгоритм управления обеспечивает входение в зону $\pm 30 \text{ усл. е}$ за $0,13 \text{ с}$, а в зону $\pm 0,1 \text{ усл. е}$ – за $0,28 \text{ с}$, установившаяся ошибка составляет $5 \cdot 10^{-3} \text{ усл. е}$ и обусловлена автоколебаниями, возникающими из-за нелинейного трения. Следует отметить, что на длительность переходного процесса оказывает отрицательное влияние ограничение напряжения. Рис. 3 показывает, что система является астатической по отношению к нагрузке. На рис. 4 видно, что указанная точность в установившемся режиме $\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ усл. е}$ обеспечивается как при наличии нагрузки, так и без нее. На рис. 5 показаны фрагменты переходных процессов при значениях момента инерции ОУ 1) $0,83 I_{c0}$, 2) I_{c0} , 3) $1,5 I_{c0}$ подтверждающие работоспособность системы при неизвестных отклонениях момента инерции от его номинального значения в указанном пределе.

Выводы. В работе синтезирован алгоритм управления, обеспечивающий высокую точность и быстродействие при обработке программного сигнала. Время переходного процесса $0,13 \text{ с}$, точность управления в установившемся режиме $\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ усл. е}$ как без нагрузки, так и при ее наличии. Включение в неопределенность внешних воздействий делает систему астатической по отношению к нагрузке. Система хорошо работает при наличии нелинейного трения. Система работоспособна при отклонениях момента инерции ОУ в пределах $0,83 \dots 1,5$ от его номинального значения. Высокое качество управления при наличии упругости, нелинейного трения и нагрузки достигнуто за счет применения робастного комбинированного управления с наблюдателем неопределенности [1–3]. Описанная электромеханическая система является универсальной и может входить в состав обрабатывающих станков, роботов, телескопов, радиолокаторов, систем автоматического прицеливания стрелкового оружия, в том числе установленных на движущихся объектах, и тому подобное.

Литература. [1] Поталенко, Е.М. Сравнительная оценка робастных систем управления с различными типами наблюдателей / Е.М. Поталенко // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1995. – №1. – С. 109–116. [2] Поталенко, Е.М. Робастные комбинированные системы управления с наблюдателями / Е.М. Поталенко // Проблемы управления и информатики (Киев, НАНУ). – 1995. – №2. – С. 36–44. [3] Поталенко, Е.М. Исследование робастности систем управления с наблюдателями / Е.М. Поталенко // Изв. РАН. Теория и системы управления. (Москва) – 1996. – №2. – С. 104–108. [4] Казурова, А.Е. Высокоточное позиционное управление двухмассовой электромеханической системой / А.Е. Казурова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 4/2008 (51) частини 1. – 53–57. [5] Hirschorn, R. M. Control of Nonlinear Systems with Friction / R. M. Hirschorn, G. Miller // IEEE Trans. on Control Systems Technology. – 1999. – Vol. 7, N 5. – Pp. 588–595. [6] Дылевский, А.В. Применение метода пространства состояний для синтеза дифференциаторов / А.В. Дылевский, Г.И. Лозгачёв // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 9. – С. 13–20.

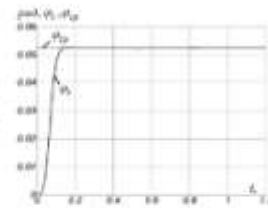


Рисунок 2

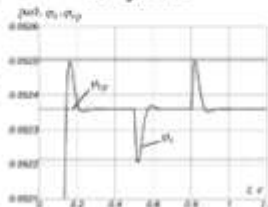


Рисунок 3

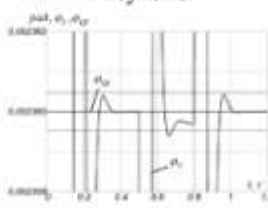


Рисунок 4

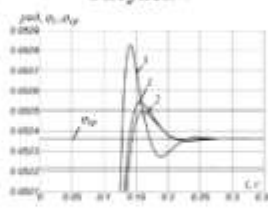


Рисунок 5