



УДК 681.513.6

В. В. Путов, В. Н. Шелудько, А. В. Путов,
К. В. Игнатъев, М. М. Копычев, Н. А. Русяев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Аналитический и интеллектуальный подходы в построении адаптивных систем управления нелинейными электромеханическими объектами с упругими деформациями

Строятся аналитические и интеллектуальные (нейронечеткие) системы адаптивного управления упругими нелинейными электромеханическими объектами и приводятся результаты анализа их работоспособности в подавлении упругих колебаний в условиях неполной измеримости, широкого изменения параметров и влияния таких характерных нелинейностей электромеханических объектов, как зазоры и сухое трение.

Нелинейный упругий электромеханический объект, неопределенное описание, неполное измерение, следящая система, система управления скоростью или скольжением, прямые и не прямые аналитические и интеллектуальные (нейронечеткие) системы, адаптивное управление, параметрическая и сигнальная настройки, параметрическое обучение

В последние годы в задачах построения адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами, описываемыми дифференциальными уравнениями с неопределенностями, одновременно с аналитическими (беспоисковыми) прямыми и непрямыми адаптивными системами рассматриваются интеллектуальные (нейронечеткие) системы управления [1]–[9]. В статье рассматриваются вопросы построения и сравнительного анализа аналитических (прямых и не прямых с параметрической и сигнальной настройками) и интеллектуальных (нечетких, нейросетевых и нейронечетких) адаптивных систем управления на примере трехмассового упругого нелинейного механического объекта управления, характерного для задач повышения точности и быстродействия подвижных роботизированных объектов в различных областях промышленности, специальной техники и транспорта [1], [2].

1. Нелинейный упругий электромеханический объект. Рассмотрим трехмассовый упругий электромеханический объект в рамках следящей системы, управляемой по положению третьего диска (по углу поворота нагрузки), и поставим задачу подавления упругих колебаний средствами управления с одновременным повышением точности и быстродействия в следящей системе с рассматриваемым упругим объектом до уровня, сравнимого с быстродействием жесткой системы.

Математическое описание трехмассового упругого электромеханического объекта с подчиненным регулированием при пренебрежении электромагнитной инерции представляет собой систему дифференциальных уравнений шестого порядка:

$$\dot{\varphi} = \omega_3; \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_3 = \frac{1}{J_3} f_{y2} - \frac{1}{J_3} M_{сх}; \quad (2)$$

$$\dot{m}_{y2} = -p_2 \omega_3 + p_2 \omega_2; \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_2 = \frac{1}{J_2} f_{y1} - \frac{1}{J_2} f_{y2}; \quad (4)$$

$$\dot{m}_{y1} = -p_1 \omega_2 + p_1 \omega_1; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_1 = & -\frac{k_m k_y k_{\Pi} \beta_c \beta_{\Pi}}{J_1 R_{\text{я}}} \Phi - \frac{1}{J_1} f_{y1} - \\ & - \frac{k_m (k_e + k_c k_y \beta_c)}{J_1 R_{\text{я}}} \omega_1 + \\ & + \frac{k_m k_y \beta_c \beta_{\Pi}}{J_1 R_{\text{я}}} u_{\Sigma}, \end{aligned} \quad (6)$$

где Φ – положение (угол поворота нагрузки); ω_1 , ω_2 , ω_3 – угловые скорости первого, второго и третьего дисков; m_{y1} , m_{y2} – моменты упругости при отсутствии зазоров; J_1 , J_2 , J_3 – моменты инерции первого, второго и третьего дисков; p_1 , p_2 – жесткости; $R_{\text{я}}$ – активное сопротивление якорной цепи; k_e , k_m – постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными данными электрической машины; k_y – коэффициент передачи усилителя мощности; k_c – коэффициент передачи датчика обратной связи по первой скорости; β_c , β_{Π} – коэффициенты передачи контурных регуляторов скорости положения; k_{Π} – коэффициент передачи датчика обратной связи по положению; f_{y1} , f_{y2} – моменты упругости, описываемые при учете зазоров $2\delta_1$ и $2\delta_2$ в упругих связях;

$$f_{y1} = \begin{cases} m_{y1} - p_1 \delta_1, & m_{y1} \geq p_1 \delta_1, \\ 0, & |m_{y1}| < p_1 \delta_1, \\ m_{y1} + p_1 \delta_1, & m_{y1} \leq -p_1 \delta_1; \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{y2} = \begin{cases} m_{y2} - p_2 \delta_2, & m_{y2} \geq p_2 \delta_2, \\ 0, & |m_{y2}| < p_2 \delta_2, \\ m_{y2} + p_2 \delta_2, & m_{y2} \leq -p_2 \delta_2; \end{cases} \quad (8)$$

$M_{\text{сх}}$ – момент сухого трения;

$$M_{\text{сх}} = M_{\text{сх}0} \text{sign } \omega_3, \quad M_{\text{сх}0} = (\alpha) M_{\text{н}}; \quad \alpha \in (0, 1); \quad (9)$$

где $M_{\text{н}}$ – номинальный вращающий момент приводного двигателя; u_{Σ} – суммарный управляющий сигнал, $u_{\Sigma} = u_0 + u_{\alpha}$; u_0 – задающее воздействие; u_{α} – сигнал управления, подлежащий определению.

В общем случае, моменты инерции и коэффициенты упругости являются неопределенными, поэтому рассмотрим их приближение с некоторыми усредненными значениями: $J_1 = J_{01}$, $J_2 = J_{02}$, $J_3 = J_{03}$; $p_1 = p_{01}$; $p_2 = p_{02}$. Положим $a_1 = 1/J_{03}$; $a_2 = p_{02}$; $a_3 = 1/J_{02}$; $a_4 = p_{01}$; $a_5 = -k_m k_y k_{\Pi} \beta_c \beta_{\Pi} / (J_{01} R_{\text{я}})$; $a_6 = -1/J_{01}$; $a_7 = -k_m (k_e + k_c k_y \beta_c) / (J_{01} R_{\text{я}})$; $b = k_m k_y \beta_c \times \beta_{\Pi} / (J_{01} R_{\text{я}})$. Тогда линейное приближение системы (1)–(6) с усредненными параметрами имеет следующий векторно-матричный вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u_{\Sigma}; \quad (10)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 & 0 & a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 & 0 & a_4 \\ a_5 & 0 & 0 & 0 & a_6 & a_7 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Phi \\ \omega_3 \\ m_{y2} \\ \omega_2 \\ m_{y1} \\ \omega_1 \end{bmatrix}.$$

В частности, при рассмотрении задач управления торможением колес транспортных средств в математическом описании (1)–(9) угол поворота Φ как переменная состояния исключается, а сухое трение $M_{\text{сх}}$ в уравнении (9) представляется как некоторая функция скольжения третьего диска [4].

2. Прямая адаптивная система управления с эталонной моделью, параметрической настройкой и мажорирующими функциями. Для построения аналитических адаптивных систем выберем наиболее подходящие здесь, как очевидно из описания (7)–(9) нелинейностей в виде зазоров и сухого трения, адаптивные структуры с алгоритмами, включающими мажорирующие функции только старших степеней роста, одинаковых по каждой из переменных состояния, вида [1]

$$\mathbf{u}_a(t) = \mathbf{K}_A(t) \text{diag}\{f_p(x_r)\}_1^n \mathbf{x} + \mathbf{K}_B(t) \mathbf{u}_0(t); \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{K}}_A(t) &= -\Gamma_A \mathbf{B}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{x}^T \text{diag}\{f_p(x_r)\}_1^n - \\ & - \Lambda_A \mathbf{K}_A(t); \quad r = \overline{1, n}; \\ \dot{\mathbf{K}}_B(t) &= -\Gamma_B \mathbf{B}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} u_0^T - \Lambda_B \mathbf{K}_B(t), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $\mathbf{K}_A(t)$ – $(m \times n)$ -мерная матрица, а $\mathbf{K}_B(t)$ – $(m \times m)$ -мерная матрица настраиваемых параметров нелинейного адаптивного закона (11);

$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_M$ – вектор ошибок, $\mathbf{x}_M = [x_{M1} \dots x_{Mn}]^T$ – вектор состояния эталонной модели вида

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{u}_0(t), \quad (13)$$

$\mathbf{A}_M, \mathbf{B}_M$ – $(n \times n)$ - и $(n \times m)$ - мерные постоянные матрицы, \mathbf{A}_M – гурвицева; $\mathbf{\Gamma}_A, \mathbf{\Lambda}_A, \mathbf{\Gamma}_B, \mathbf{\Lambda}_B$ – симметричные положительно определенные $(m \times m)$ - мерные произвольные матрицы постоянных коэффициентов усиления алгоритмов; \mathbf{P} – симметричная ($\mathbf{P} = \mathbf{P}^T$) положительно определенная ($P > 0$) матрица, удовлетворяющая уравнению Ляпунова вида

$$\mathbf{A}_M^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_M = -\mathbf{G}, \quad (14)$$

где \mathbf{G} – любая симметричная положительно определенная матрица; $\mathbf{diag}\{f_p(x_r)\}_1^n$ – диагональная функциональная матрица порядка n , составленная из мажорирующих функций старших степеней роста p , одинаковых по каждой из переменных состояния x_r ; $n = 6; m = 1$.

В качестве эталонной модели (13), участвующей в адаптивном законе и алгоритмах настройки ее параметров (11), (12), выбирается замкнутая система с модальным управлением. Модальное управление для линеаризованного объекта (10) имеет вид обратной связи по состоянию:

$$u_d = \mathbf{kx}; \mathbf{k} = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ k_6], \quad (15)$$

где \mathbf{k} – вектор коэффициентов обратных связей, рассчитываемых из условия обеспечения заданного желаемого распределения корней характеристического уравнения замкнутой системы, \mathbf{x} – вектор состояния линеаризованного объекта. Тогда эталонная модель имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_M &= \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{b}_M u_0; \\ \mathbf{A}_M &= \mathbf{A} + \mathbf{bk} = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 & 0 & a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 & 0 & a_4 \\ a_5 + bk_1 & bk_2 & bk_3 & bk_4 & a_6 + bk_5 & a_7 + bk_6 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{b}_M &= \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где $\mathbf{x}_M = [\varphi_M, \omega_{3M}, m_{y2M}, \omega_{2M}, m_{y1M}, \omega_{1M}]^T$ – вектор состояния эталонной модели.

Рассматриваемая структура (11), (12) может быть реализована только путем непосредственного измерения всех переменных состояния объекта. Если измерению доступны только некоторые переменные (в большинстве случаев это первая скорость ω_1 и положение нагрузки φ), то для осуществления управления используются асимптотические оценки переменных, вырабатываемые, например, наблюдателем состояния. Наблюдатель по измерению ω_1 линеаризованного объекта (10) имеет вид

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{lc}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}) + \mathbf{bu}_\Sigma, \quad (17)$$

где $\hat{\mathbf{x}}$ – вектор оценок переменных состояния; $\mathbf{c} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ k_c]$ – вектор измерения; $\mathbf{l} = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5 \ l_6]^T$ – вектор коэффициентов обратных связей наблюдателя, обеспечивающих заданное желаемое распределение корней характеристического уравнения наблюдателя, замкнутого по ошибке наблюдения.

В качестве мажорирующих функций целесообразно выбрать степенные (любой нечетной степени) функции тех переменных состояния нелинейного объекта, которые входят в аргументы функций, описывающих его нелинейности [1]:

$$\left. \begin{aligned} f_p(x_r) &= x_r^p, \quad p = 0, 1, 3, 5, \dots; \\ r &= \overline{1, n}; \quad n = 6, \quad r = 2, 3, 5, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

а мажорирующие функции по остальным аргументам примем единичными. Отметим, что согласно формулам (7) и (8), аргументами функций, описывающих зазоры, являются упругие моменты m_{y1} и m_{y2} соответственно, а по (9) аргументом функции, описывающей сухое трение, является угловая скорость нагрузки ω_3 , и поэтому адаптивная система с мажорирующими функциями вида

$$\left. \begin{aligned} f_p(\varphi) &= 1; \quad f_p(\omega_3) = \omega_3^p; \\ f_p(m_{y2}) &= m_{y2}^p; \\ f_p(\omega_2) &= 1; \quad f_p(m_{y1}) = m_{y1}^p; \\ f_p(\omega_1) &= 1; \quad p = 1, 3, 5, \dots \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

будет непосредственно ориентирована на подавление влияния зазоров и сухого трения.

Принимая во внимание то, что порядок рассматриваемого объекта равен 6 и задающее воздействие u_0 является скалярной величиной, перепишем прямую адаптивную структуру (11), (12) с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем состояния (17) для управления трехмассовым нелинейным упругим объектом следующим образом:

$$u_a(t) = \mathbf{k}_A(t) \mathbf{diag} \{ f_p(\bar{x}_r) \}_1^6 \bar{\mathbf{x}} + k_b(t) u_0(t), \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{k}}_A(t) &= -\gamma_a \delta(\bar{\mathbf{e}}) \bar{\mathbf{x}}^T \mathbf{diag} \{ f_p(\bar{x}_r) \}_1^6 - \\ &\quad - \lambda_a \mathbf{k}_A(t); \quad r = \overline{1, 6}, \\ \dot{k}_b(t) &= -\gamma_b \delta(\bar{\mathbf{e}}) u_0(t) - \lambda_b k_b(t), \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где $\mathbf{k}_A(t)$ – вектор-строка настраиваемых коэффициентов, а $k_b(t)$ – настраиваемый входной коэффициент адаптивного закона (20); $\gamma_a, \lambda_a, \gamma_b, \lambda_b$ – положительные коэффициенты усиления настроек; $\bar{\mathbf{e}} = \bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_M$ – вектор ошибок – разностей между переменными состояния наблюдателя (17) и эталонной модели (16); $\delta(\bar{\mathbf{e}}) = \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{e}}$. С учетом выбора мажорирующих функций в виде (19) имеем:

$$\mathbf{diag} \{ f_p(\bar{x}_r) \}_1^6 = \mathbf{diag} \{ 1, \bar{\omega}_3^p, \bar{m}_{y2}^p, 1, \bar{m}_{y1}^p, 1 \}. \quad (22)$$

Линейная составляющая u_{Σ} составного управления u_{Σ} имеет вид (15) с оценками переменных состояния, вырабатываемыми наблюдателем (17).

3. Прямая адаптивная система управления с эталонной моделью и сигнальной настройкой с мажорирующими функциями. Прямая адаптивная система с сигнальной настройкой для объекта (1)–(9) содержит согласно [1] эталонную модель (16), наблюдатель (17) и адаптивный закон с сигнальной (релейной) настройкой и мажорирующими функциями (19), имеющий следующий вид:

$$\begin{aligned} u_a(t) &= - \left[h_0 + h_1 f_p(\bar{\omega}_3) + h_2 f_p(\bar{m}_{y2}) + \right. \\ &\quad \left. + h_3 f_p(\bar{m}_{y1}) \right] \mathbf{sign} \delta(\bar{\mathbf{e}}) = - \left[h_0 + h_1 \bar{\omega}_3^p + \right. \\ &\quad \left. + h_2 \bar{m}_{y2}^p + h_3 \bar{m}_{y1}^p \right] \mathbf{sign} \delta(\bar{\mathbf{e}}), \end{aligned} \quad (23)$$

где h_0, h_1, h_2, h_3 – положительные коэффициенты усиления алгоритма (23).

Линейная составляющая u_{Σ} составного управления u_{Σ} вычисляется, как в п. 2.

4. Непрямая адаптивная система с сигнально настраиваемой моделью. Непрямая адаптивная система с сигнально настраиваемой моделью содержит, как, например, в [4], настраиваемую модель вида

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{L} \hat{\mathbf{e}}(t) + \mathbf{b} u_{\Sigma} + \mathbf{u}_{\Sigma}(t), \quad (24)$$

стационарный наблюдатель вида (17); векторный закон сигнальной настройки настраиваемой модели (24) вида

$$\mathbf{u}_{\Sigma}(t) = \left[h_0 + \sum_{r=1}^6 (h_r f_r) \right] \mathbf{sign} \{ \mathbf{P} \hat{\mathbf{e}}(t) \}; \quad (25)$$

линейную составляющую u_{Σ} составного управления u_{Σ} , которая вычисляется в виде (15), но, в отличие от пп. 2, 3, здесь содержит оценки переменных состояния, вырабатываемые настраиваемой моделью, а не наблюдателем (17), который в этой структуре играет вспомогательную роль в формировании оценок переменных состояния нелинейного упругого объекта (1)–(9); скалярный закон сигнальной адаптации объекта (1)–(9), вычисляемый по выражению

$$u_a^z(t) = -\mathbf{b}_M^+ \mathbf{u}_{\Sigma}(t). \quad (26)$$

В выражениях (24), (25), обозначено: $\hat{\mathbf{e}}(t) = \hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}$ – вектор ошибки переменных наблюдателя (17) и переменных настраиваемой модели (24); \mathbf{L} – матрица формирования независимой динамики настраиваемой модели (24); $h_0, h_r, r = \overline{1, 6}$ – положительные коэффициенты усиления; $f_r = f_r(\bar{x}_r)$ – мажорирующие функции вида (19), но с заменой переменных наблюдателя (17) на переменные настраиваемой модели (24); \mathbf{sign} – векторная знаковая функция, состоящая из знаковых функций компонент вектора, стоящего под ее знаком; \mathbf{b}_M^+ – вектор-строка есть псевдо-обратная вектора-столбца \mathbf{b}_M .

5. Нейронечеткая система управления. В последние годы для построения адаптивных систем управления сложными динамическими объектами с неопределенностью все чаще применяют так называемые интеллектуальные методы, базирующиеся на применении теории нечетких множеств, нейронных сетей и нейронечетких технологий. Нечеткие

логические системы управления стали одним из самых эффективных применений теории нечетких множеств, а их дальнейшее развитие в виде нейро-нечетких систем явилось продуктом естественного объединения нечетких логических систем и нейронных сетей, привнесших в нечеткие системы способность к обучению [3], [5]. Основное достоинство нейронечеткого подхода заключается в том, что функционирование нейронной сети получает систематическую интерпретацию, а нечеткие правила реализуются в виде, допускающем обучение и параллельную обработку.

Одним из эффективных типов нейронечетких систем управления является регулятор с нечеткими правилами TSK (Takagi–Sugeno–Kang) с параметрическим обучением нейронечеткой сети, когда настройке подлежат функции принадлежности и другие параметры нейронечеткой сети управления, а ее архитектура устанавливается предварительно на основе опыта, экспертных знаний и некоторых методов структурного обучения [6].

Структура нейронечеткого регулятора с правилами TSK основана на так называемой архитектуре ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Эта архитектура может обучаться на основе гибридного алгоритма с использованием метода обратного распространения ошибки и метода наименьших квадратов [8].

В результате исследований моделированием удалось выявить, что для управления нелинейным упругим электромеханическим объектом подходящей структурой нейронечеткого управления является структура, аналогичная аналитической структуре прямой адаптивной системы с эталонной моделью вида (16) и наблюдателем (17) и заменой аналитического закона и алгоритмов его настройки нейронечетким регулятором с правилами TSK. Обучение параметров прямого нейронечеткого регулятора предлагается осуществлять на основе прямых аналитических адаптивных систем с параметрической или сигнальной настройками, построенных в пп. 2 и 3, а чтобы уменьшить число нечетких правил предлагается использовать каскадные схемы нейронечеткого управления [2].

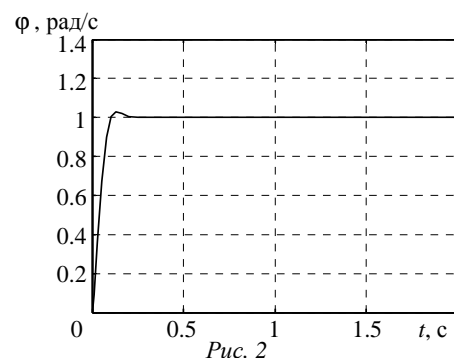
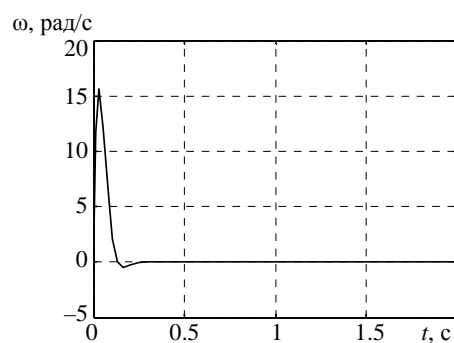
Не останавливаясь (в силу ограниченности объема статьи) на подробностях, отметим, что в Matlab-Simulink построены конкретные программы предлагаемого адаптивного обучения нейро-

нечеткого регулятора с правилами TSK. Данные для обучения получаются со входов и выходов аналитической адаптивной системы в процессе ее работы с разными задающими воздействиями u_0 и с изменением параметров управляемого объекта.

6. Результаты исследования моделированием.

6.1. Для исследования работоспособности построенных аналитических и интеллектуальных адаптивных систем разработаны программы моделирования в Matlab-Simulink для структуры трехмассового упругого нелинейного электромеханического объекта при следующих усредненных параметрах его линеаризованного описания (10): $J_{01}=0.05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $J_{02}=0.03 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $J_{03}=0.1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $p_{01}=30$; $p_{02}=25$; $R_{\text{я}}=2 \text{ Ом}$; $k_e=1 \text{ В}\cdot\text{с}$; $k_m=1 \text{ В}\cdot\text{с}$; $k_y=22$; $k_c=0.0095 \text{ В}\cdot\text{с/рад}$; $k_{\text{п}}=0.0095 \text{ В/рад}$; $\beta_c=86.32$; $\beta_{\text{п}}=25$ и при ступенчатом задающем воздействии $\Phi_{\text{зад}}=u_0=1k_{\text{п}}=0.0095 \text{ В}$.

6.2. На рис. 1, 2 показаны эталонные (желаемые) переходные процессы по угловой скорости (рис. 1) и положению (углу поворота) нагрузки (рис. 2) с предположением, что упругие связи заменены жесткими, и, таким образом, желаемое быстроедействие задается следящей системой с идеализированными «жестким» объектом.



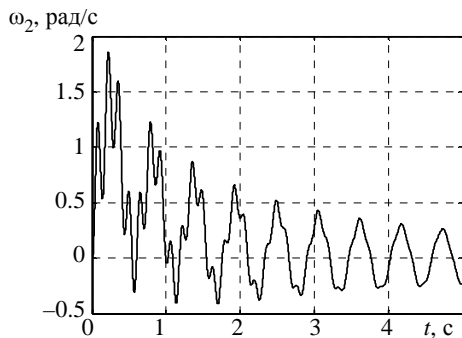


Рис. 3

Как показали исследования моделированием, использование в следящей системе с упругим объектом настроек контурных П-регуляторов $\beta_{\text{п}}$, $\beta_{\text{с}}$, рассчитанных на достижение максимально возможного быстродействия в рамках жесткой электромеханической следящей системы, приводит к возбуждению быстрорастущих упругих колебаний; поэтому, чтобы наблюдать за затухающими упругими колебаниями в рассматриваемом объекте, необходимо уменьшить настройку П-регулятора положения $\beta_{\text{п}}$ в 20 раз ($\beta_{\text{п}} = 1.25$), что приводит к соответствующему многократному снижению быстродействия следящей системы. На рис. 3 показан переходный процесс угловой скорости вращения второго диска, а на рис. 4 – переходный процесс угла поворота нагрузки при работе рассматриваемой следящей системы с трехмассовым упругим объектом без адаптивного управления. Как видно из полученных графиков (особенно из графика на рис. 3), в следящей системе возникают двухрезонансные упругие колебания с парциальными собственными частотами, соответствующими закреплённому первому диску и равными [2]:

$$f_{1_23} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a - \sqrt{a^2 - 4c}}{2}} = 1.80 \text{ Гц};$$

$$f_{2_23} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 - 4c}}{2}} = 7.04 \text{ Гц},$$

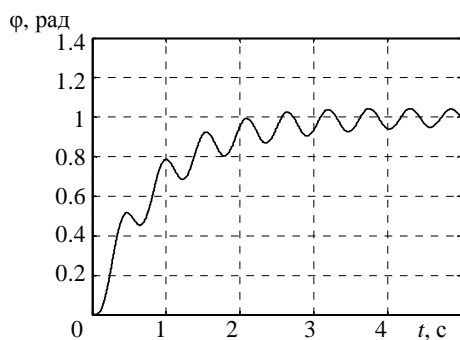


Рис. 4

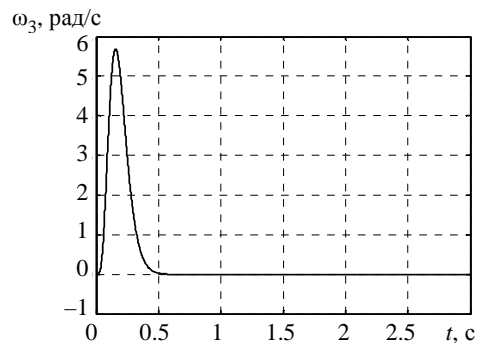


Рис. 5

где $a = (p_{01} + p_{02})/J_{02} + p_{02}/J_{03} = 2083.33$; $c = p_{01}p_{02}/(J_{02}J_{03}) = 250\,000$. В нашем случае эффект закреплённого первого диска создается с помощью глубокой обратной связи по первой скорости ($J_{01} \cong +\infty$).

6.3. На рис. 5, 6 показаны реакции прямой адаптивной системы управления с параметрической настройкой (АСУПН), разработанной в п. 2, на ступенчатое входное воздействие при усредненных постоянных параметрах объекта $p_1 = p_{01}$; $p_2 = p_{02}$; $J_1 = J_{01}$; $J_2 = J_{02}$; $J_3 = J_{03}$ и с рассчитанными в рамках «жесткой» системы коэффициентами передачи контурных П-регуляторов $\beta_{\text{п}}$, $\beta_{\text{с}}$, причем рис. 5, показывает переходный процесс угловой скорости третьего диска, а рис. 6 – переходный процесс угла поворота нагрузки. Из графиков на рис. 5, 6 видно, что в АСУПН не только успешно подавлены двухрезонансные упругие колебания, которые возникали в упругом объекте без адаптивного управления (рис. 3, 4), но и резко повышено быстродействие системы, которое стало сравнимым с быстродействием «жесткого» объекта, показанным на рис. 1, 2.

Отметим, однако, что если параметры объекта остаются равными или близкими к усредненным значениям, то с задачей подавления упругих колебаний может справиться и модальное управление (15), построенное по оценкам наблюдателя (17), поэтому проведены исследования эффективности работы АСУПН при изменении параметров объекта и сопоставлены с результатами работы неадаптивной системы с модальным управлением (МСУ). На рис. 7 показаны графики переходных процессов угла поворота нагрузки при работе АСУПН с наблюдателем состояния и при изменении коэффициента упругости p_2 , где кривая 1 – при $p_2 = p_{02}$; кривая 2 – при $p_2 = 3p_{02}$; кривая 3 – при $p_2 = p_{02}/3$. На рис. 8 показаны графики переходных процессов угла поворота нагрузки

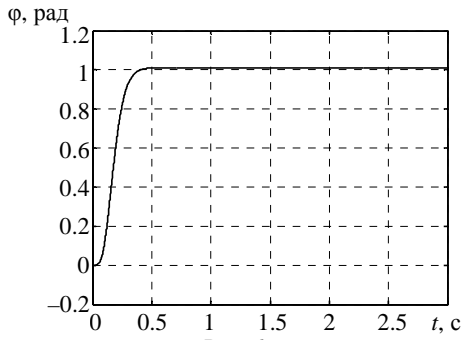


Рис. 6

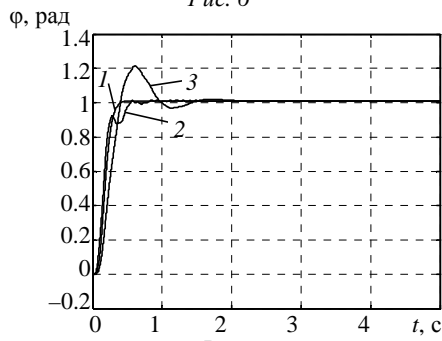


Рис. 7

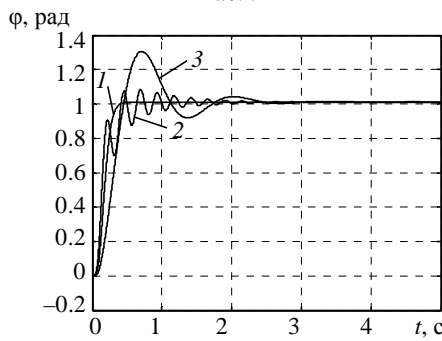


Рис. 8

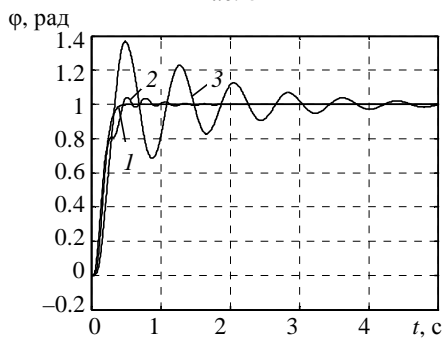


Рис. 9

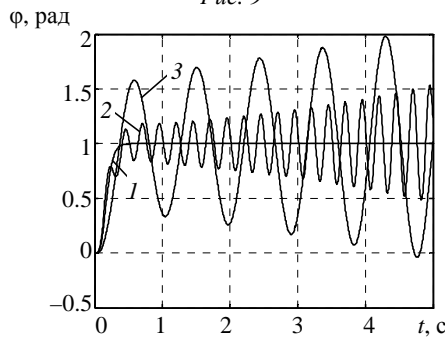


Рис. 10

при работе АСУПН с наблюдателем состояния и при изменении момента инерции третьего диска J_3 , где кривая 1 – при $J_3 = J_{03}$; кривая 2 – при $J_3 = J_{03}/2$; кривая 3 – при $J_3 = 3J_{03}$.

На рис. 9 для сравнения показаны графики неадаптивных переходных процессов угла поворота нагрузки при работе МСУ с наблюдателем состояния и при изменении коэффициента упругости p_2 , где кривая 1 – при $p_2 = p_{02}$; кривая 2 – при $p_2 = 3p_{02}$; кривая 3 – при $p_2 = p_{02}/3$. На рис. 10 показаны графики переходных процессов угла поворота нагрузки при работе МСУ с наблюдателем состояния и при изменении момента инерции третьего диска J_3 , где кривая 1 – при $J_3 = J_{03}$; кривая 2 – при $J_3 = J_{03}/1.5$; кривая 3 – при $J_3 = 3J_{03}$.

Из рис. 7–10 видно, что при девятикратном изменении параметра p_2 или шестикратном изменении параметра J_3 работоспособность адаптивной системы управления с наблюдателем состояния сохраняется при удовлетворительном качестве переходных процессов (рис. 7, 8), а система с модальным управлением с таким же наблюдателем при равном или даже меньшем диапазоне изменений параметров объекта неработоспособна (рис. 9, 10).

Исследования показывают, что применение стационарного наблюдателя при реализации прямой адаптивной системы с параметрической настройкой несколько снижает ее потенциальные возможности. Можно отметить, что указанный недостаток преодолевается в рамках некоей комбинированной адаптивной системы, в которой стационарный наблюдатель заменяется адаптивным наблюдателем с сигнальной настройкой [4], т. е. объединяющей прямую адаптивную систему с параметрической адаптацией (п. 3) и непрямую систему с сигнальной адаптацией (п. 4).

Существенное влияние на точность слежения рассматриваемых систем управления трехмассовым упругим электромеханическим объектом оказывают такие нелинейности, как зазоры в упругих связях (7), (8) и сухое трение (9). Сравнительное исследование эффективности работы АСУПН с мажорирующими функциями с работой неадаптивной МСУ в условиях действия указанных нелинейностей представлены на рис. 11 при ступенчатом задающем воздействии $\Phi_{зад} = u_0 = 3k_{\Pi} = 0.0285$ В. На рис. 11 показаны графики

переходных процессов угла поворота нагрузки при работе АСУПН с мажорирующими функциями и наблюдателем состояния (кривая 1), и при работе МСУ с таким же наблюдателем (кривая 2).

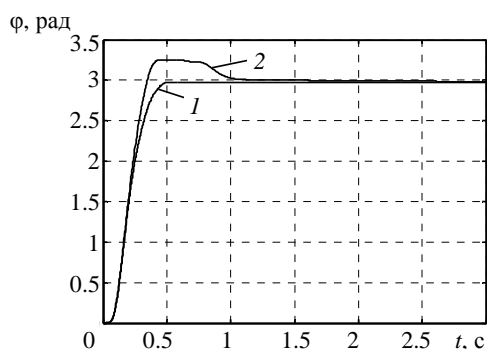


Рис. 11

Графики на рис. 11 показывают, что при наличии зазоров и сухого трения прямая адаптивная система с параметрической настройкой и мажорирующими функциями позволяет привести ошибки управления к минимуму, в то же время система с модальным управлением в таких же условиях работы не может устранить погрешности управления в задачах слежения для рассматриваемого трехмассового нелинейного упругого электромеханического объекта.

6.4. Исследование прямой и непрямой аналитических адаптивных систем с сигнальной настройкой, разработанных в пп. 3, 4, выявило, что они остаются работоспособными при меньшей «глубине» параметрических рассогласова-

ний объекта по сравнению с прямой адаптивной системой с параметрической настройкой и показывают сходные с ней результаты при изменении параметров объекта в 2–4 раза, однако при этом гораздо более просты в реализации.

6.5. Исследование моделированием работоспособности прямой нейронечеткой адаптивной системы с эталонной моделью (16) и наблюдателем (17), обученной по прямой аналитической адаптивной системе, показало, что в силу эвристичности нейронечетких систем, приобретаемые ими адаптивные свойства в процессе обучения их с помощью аналитических систем в рассматриваемых областях функционирования могут даже превосходить адаптивные свойства самих обучающих систем. При этом работоспособность нейронечетких систем в решении задач управления приближается к работоспособности прямых адаптивных систем с параметрической настройкой, хотя нейронечеткие адаптивные системы в силу их построения более просты, чем аналитические адаптивные системы, требующие при их микроконтроллерной реализации гораздо меньших вычислительных ресурсов, чем последние, а этап их отладки заканчивается обучением.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (номер контракта – 14.574.21.0081).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путов В. В., Шелудько В. Н. Адаптивные и модальные системы управления многомассовыми нелинейными упругими механическими объектами. СПб.: ООО «Техномедиа» / Элмор, 2007. 244 с.
2. Путов В. В., Шелудько В. Н. Системы управления многостепенными механическими объектами с упругими деформациями: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 167 с.
3. Lin C. T., Lee G. Neural Fuzzy Systems – A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems. N. J.: Prentice-Hall International, Inc., 1996. 797 p.
4. Путов В. В., Путов А. В., Андриевский Б. Р. Управление торможением транспортных колес с электромеханическими движителями // Мехатроника, автоматизация и управление. 2014. № 3. С. 33–42.
5. Buckley J. J., Hayashi Y. Fuzzy neural networks: A survey // Fuzzy Sets and Systems. 1994. Vol. 66, № 1. P. 1–13.
6. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. 1985. Vol. 15, № 1. P. 116–132.
7. Тюкин И. Ю., Терехов В. А. Адаптация в нелинейных динамических системах. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 384 с.
8. Jang J.-S. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. 1993. Vol. 23, № 1. P. 665–685.
9. Зунг Ч. А. Разработка и исследование адаптивных систем управления нелинейными электромеханическими объектами с упругими деформациями: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 190 с.

V. V. Putov, V. N. Sheludko, A. V. Putov, K. V. Ignatiev, M. M. Kopichev, N. A. Rusyaev
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

ANALYSIS AND INTELLECTUAL APPROACH IN CONSTRUCTION OF ADAPTIVE CONTROL
SYSTEMS ELECTROMECHANICAL OBJECTS ELASTIC DEFORMATION

Constructed analytical and intelligent (neuro) adaptive control of nonlinear elastic electromechanical objects and results of the analysis of their performance in the suppression of the two-frequency elastic waves in conditions of incomplete measurability wide parameter changes and the impact of such characteristic nonlinear electromechanical objects as gaps and dry friction.

Nonlinear elastic electromechanical object with uncertain and incomplete description of the measurements, the tracking system, speed control system, or slip, direct and indirect analytical and intelligent (neuro) adaptive control and signal parametric settings, parametric studies
