

Робастное управление многостепенным механическим объектом с адаптивной компенсацией возмущения

Ле Хонг Куанг¹, В. В. Путов², В. Н. Шелудько

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург, Россия

¹quang180880@gmail.com, ²vvputov@mail.ru,

Аннотация. В докладе рассматривается задача управления многостепенным нелинейным механическим объектом с неизвестным возмущением. Неизвестное возмущение представляется как выход линейной автономной модели с неизвестными постоянными параметрами. Для решения задачи адаптивной компенсации возмущения используется адаптивный наблюдатель внешних возмущений объекта. Предложен алгоритм нелинейного робастного управления лагранжевым объектом, синтезированный на основе метода обхода интегратора, объединенный с оценкой адаптивного наблюдателя возмущения. Моделирование построенного нелинейного робастного управления с адаптивным наблюдателем возмущения производится с помощью программы MATLAB/Simulink.

Ключевые слова: нелинейное робастное управление; адаптивный робастный наблюдатель возмущения; многостепенный нелинейный механический объект; каскадная структура; обратный обход интегратора

I. ВВЕДЕНИЕ

В докладе рассматриваются вопросы построения нелинейной робастной системы управления многостепенным нелинейным механическим объектом, эффективной в условиях действия внешних возмущений. Задачи повышения точности адаптивных систем в условиях действия неизмеримых внешних возмущений всегда привлекали внимание исследователей в силу сближения этих задач с реальными потребностями повышения точности управления техническими объектами, и разработка таких систем является одним из актуальных направлений исследований в этой области.

Широкое распространение получили методы огрубления адаптивных алгоритмов управления, обеспечивающих экспоненциальную устойчивость систем при отсутствии внешних возмущений и сохраняющих ограниченность всех сигналов при наличии возмущений. К таковым алгоритмам относятся алгоритмы с так называемой σ -модификацией, а именно, с квазиотрицательной обратной связью, с зоной нечувствительности и с переключением [1–3], а также проекционные алгоритмы (projection operator) [4, 5].

В то же время методы огрубления не решают задачи целенаправленного повышения точности адаптивных систем, и в последние десятилетия развиваются методы синтеза адаптивных наблюдателей внешних возмущений, решающих задачи активной компенсации возмущений [2]. Одним из таких подходов является метод внутренней модели, когда в предположении детерминированности возмущений строится так называемый генератор внешнего возмущения, играющий роль встроенного в систему управления наблюдателя возмущения, обеспечивающего задачу его компенсации [2, 6]. Однако такое решение задачи компенсации возмущений с помощью наблюдателей возможно при условии, что известны параметры модели возмущения и объекта управления, что вступает в противоречие с постановкой задачи адаптивного управления. Более естественным в постановке задач компенсации возмущений с помощью наблюдателей является предположение параметрической неопределенности как генераторов возмущений, так и самих объектов управления. Исследованию возможностей распространения методов внутренней модели на классы неопределенных генераторов возмущений и управляемых объектов посвящены работы [7, 8].

В докладе рассматриваются вопросы применения изложенных в [7, 8] методов построения адаптивных наблюдателей возмущений к задаче управления нелинейным многостепенным механическим объектом с возмущением, причем к построению нелинейной робастной системы управления динамикой лагранжевой модели многостепенного механического объекта, представленной двухкаскадной структурой, привлекается метод обратного обхода интегратора [2, 9–11].

Адаптивный наблюдатель возмущения. Будем рассматривать многостепенный нелинейный механический объект, описываемый векторно-матричным уравнением Лагранжа вида

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + \sigma, \quad (1)$$

где $q \in R^n$ – вектор обобщенных координат; $\dot{q} \in R^n$ – вектор обобщенных скоростей; $\tau \in R^n$ – вектор

управляющих входов (сил, моментов), $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in R^{n \times n}$ – функциональная матрица инерции, неособенная, симметричная и положительно определенная для всех \mathbf{q} , $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{n \times n}$ – функциональная матрица кориолисовых и центробежных сил, зависящих от скоростей; $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in R^n$ – вектор-функция гравитационных сил; $\boldsymbol{\sigma} \in R^n$ – вектор неизвестных ограниченных внешних возмущений, $\|\boldsymbol{\sigma}\| \leq \text{const}$; n – число степеней подвижности механического объекта.

Пусть неизвестное возмущение $\boldsymbol{\sigma}$ рассматривается как вектор, содержащий ограниченные периодические функции. Следуя [7,8], будем считать, что возмущение $\boldsymbol{\sigma}$ представимо в виде выхода линейного конечномерного генератора

$$\dot{\mathbf{w}} = \mathbf{V}\mathbf{w}, \quad \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{S}\mathbf{w}, \quad (2)$$

где $\mathbf{w} \in R^m$ – вектор состояния генератора, $\mathbf{V} \in R^{m \times m}$, $\mathbf{S} \in R^{n \times m}$ – матрицы неизвестных коэффициентов, причем матрица \mathbf{V} имеет все собственные значения, лежащие на мнимой оси; пара (\mathbf{S}, \mathbf{V}) является полностью наблюдаемой.

Вектор неизвестного возмущения $\boldsymbol{\sigma}$, описываемый как выход линейной системы (2) может быть сформирован как выход так называемой канонической формы представления генератора (2) удобной для применения в синтезе искомого наблюдателя неизвестного возмущения [7, 8]:

$$\dot{\boldsymbol{\chi}} = \mathbf{H}\boldsymbol{\chi} + \mathbf{L}\boldsymbol{\sigma}, \quad \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\Theta}^T \boldsymbol{\chi}, \quad (3)$$

где $\mathbf{H} \in R^{m \times m}$ – произвольная гурвицева матрица, $\boldsymbol{\Theta} \in R^{m \times n}$ – неизвестная матрица постоянных коэффициентов, вектор состояния $\boldsymbol{\chi} \in R^m$ связан с вектором состояния $\mathbf{w} \in R^m$ модели (2) соотношением подобия $\boldsymbol{\chi} = \mathbf{M}\mathbf{w}$, $\mathbf{M} \in R^{m \times m}$ – невырожденная матрица, являющаяся единственным решением матричного уравнения

$$\mathbf{M}\mathbf{G} - \mathbf{H}\mathbf{M} = \mathbf{L}\mathbf{S}; \quad (4)$$

\mathbf{H}, \mathbf{L} – полностью управляемая пара; $\boldsymbol{\Theta} = \mathbf{S}\mathbf{M}^{-1}$.

Как отмечается в [7], в канонической форме генератора возмущений (3) матрицы \mathbf{H}, \mathbf{L} выбираются произвольно, что сводит неопределенность возмущения $\boldsymbol{\sigma}(t)$ к неопределенности матрицы постоянных коэффициентов $\boldsymbol{\Theta}$, зависящей через уравнение для матрицы \mathbf{M} от неизвестных матриц параметров генератора (3). Поскольку фильтр (3) нереализуем в силу неизвестности вектора $\boldsymbol{\sigma}$, то уравнение (3) является виртуальным наблюдателем возмущения. Реальный нелинейный наблюдатель для

недоступного регрессора $\boldsymbol{\chi}$ строится с учетом уравнений объекта (1) следующим образом [7, 11]:

$$\hat{\boldsymbol{\chi}} = \boldsymbol{\eta} + \mathbf{L}\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}, \quad (5)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{H}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{H}\mathbf{L}\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{L}\dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{L}[\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\tau}], \quad (6)$$

где $\hat{\boldsymbol{\chi}}$ – оценка вектора $\boldsymbol{\chi}$ и $\boldsymbol{\eta}$ – вспомогательный вектор генерируется динамическим фильтром (6).

Неизвестный вектор возмущения $\boldsymbol{\sigma}$ может быть представлен в виде [7]

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\Theta}^T \hat{\boldsymbol{\chi}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\sigma}, \quad (7)$$

где оценка $\hat{\boldsymbol{\chi}}$ вырабатывается наблюдателем (5), (6), $\boldsymbol{\Theta}$ – матрица постоянных неизвестных коэффициентов, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\sigma}$ – экспоненциально затухающий вектор ошибок.

Введем в рассмотрение вектор ошибки оценки состояния генератора $\tilde{\boldsymbol{\chi}}$:

$$\tilde{\boldsymbol{\chi}} = \boldsymbol{\chi} - \hat{\boldsymbol{\chi}}. \quad (8)$$

Подставляя $\boldsymbol{\chi} = \hat{\boldsymbol{\chi}} + \tilde{\boldsymbol{\chi}}$ в (3) и учитывая (7), получаем $\boldsymbol{\varepsilon}_{\sigma} = \boldsymbol{\Theta}^T \tilde{\boldsymbol{\chi}}$. Дифференцируя (8) и учитывая (1), (3), (6) и (7), получим

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\boldsymbol{\chi}}} &= \mathbf{H}\boldsymbol{\chi} + \mathbf{L}\dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{L}\dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{L}\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{H}[\boldsymbol{\chi} - \boldsymbol{\eta} - \mathbf{L}\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}] = \mathbf{H}(\boldsymbol{\chi} - \hat{\boldsymbol{\chi}}), \\ \text{или } \dot{\tilde{\boldsymbol{\chi}}} &= \mathbf{H}\tilde{\boldsymbol{\chi}}, \end{aligned} \quad (9)$$

откуда следует сходимость $\tilde{\boldsymbol{\chi}} \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Отметим, что в рамках рассматриваемой задачи матрицы генератора \mathbf{V} и \mathbf{S} являются неизвестными, и поэтому матрица $\boldsymbol{\Theta}$ также является неизвестной. Таким образом, в модели (3) неопределенность внешнего возмущения $\boldsymbol{\sigma}$ сведена к неопределенности постоянных параметров $\boldsymbol{\Theta}$ параметризованной модели возмущения (3). Линейная регрессионная модель вида (3) с неизвестной матрицей постоянных коэффициентов $\boldsymbol{\Theta}$ широко распространена в задачах адаптивной идентификации и адаптивного управления, поэтому для компенсации возмущения, представленного в виде (5), могут быть применены известные методы адаптивного робастного управления [2, 6, 9].

Нелинейное робастное управление с адаптивной компенсацией возмущения. Учитывая (7), модель объекта управления (1) примет вид

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\Theta}^T \hat{\boldsymbol{\chi}} - \boldsymbol{\varepsilon}_{\sigma}. \quad (10)$$

Уравнение объекта (10), учитывая, что $\boldsymbol{\varepsilon}_{\sigma} = \boldsymbol{\Theta}^T \tilde{\boldsymbol{\chi}}$, перепишем в следующем виде

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\Theta}^T \hat{\boldsymbol{\chi}} - \boldsymbol{\Theta}^T \tilde{\boldsymbol{\chi}}. \quad (11)$$

Преобразуем уравнение Лагранжа (1) к форме Коши. Пусть $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}$, $\mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}$, тогда система дифференциальных уравнений объекта (1) может быть приведена к каскадной форме следующего вида:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2, \quad \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{C}\mathbf{x}_2 - \mathbf{G}) + \mathbf{M}^{-1}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{M}^{-1}\boldsymbol{\delta}, \quad (12)$$

где $\mathbf{M}=\mathbf{M}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}=\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{G}=\mathbf{G}(\mathbf{q})$.

Применим метод обратного обхода интегратора к построению нелинейной робастной системы управления многостепенным механическим объектом [2, 9–11].

Шаг 1. Введем следующие обозначения:

$$\mathbf{z}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1r}, \quad (13)$$

$$\mathbf{z}_2 = \mathbf{x}_2 - \boldsymbol{\alpha}, \quad (14)$$

где \mathbf{x}_{1r} – желаемый сигнал \mathbf{x}_1 , переменную $\boldsymbol{\alpha}$ будем рассматривать как виртуальное управление.

Дифференцируя \mathbf{z}_1 по (13) и принимая во внимание (14), получим $\dot{\mathbf{z}}_1 = \mathbf{z}_2 + \boldsymbol{\alpha} - \dot{\mathbf{x}}_{1r}$.

Выберем $\boldsymbol{\alpha} = -\mathbf{K}_1\mathbf{z}_1 + \dot{\mathbf{x}}_{1r}$, где \mathbf{K}_1 – положительно определенная симметричная матрица.

Шаг 2. Дифференцируя \mathbf{z}_2 по (14) и подставляя производную $\dot{\mathbf{z}}_2$ из уравнения (12), получим

$$\dot{\mathbf{z}}_2 = \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{C}\mathbf{x}_2 - \mathbf{G} + \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\delta} - \mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\alpha}}),$$

где $\mathbf{M}=\mathbf{M}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}=\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{G}=\mathbf{G}(\mathbf{q})$.

Закон управления объектом (1) с адаптивной компенсацией возмущения может быть представлен в виде

$$\boldsymbol{\tau} = -\mathbf{z}_1 - \mathbf{K}_2\mathbf{z}_2 + \mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\alpha}} + \mathbf{C}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{G} - \hat{\boldsymbol{\Theta}}^T \hat{\boldsymbol{\chi}}, \quad (15)$$

где $\mathbf{M}=\mathbf{M}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}=\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{G}=\mathbf{G}(\mathbf{q})$, \mathbf{K}_2 – положительно определенная симметричная матрица.

Адаптивный робастный алгоритм настройки матрицы коэффициентов $\hat{\boldsymbol{\Theta}}$ с параметрической проекцией (Parameter Projection) может быть представлен в следующем виде [3–5]:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\phi}}}_i = \mathbf{U}_i(\hat{\boldsymbol{\chi}}, \mathbf{z}_2, \hat{\boldsymbol{\phi}}_i) - \Gamma_i \text{proj}(z_{2,i} \hat{\boldsymbol{\chi}}_i, \hat{\boldsymbol{\phi}}_i), i = 1, \dots, n, \quad (16)$$

где $\hat{\boldsymbol{\phi}}_i$ – i -ый столбец оценки матрицы неизвестных коэффициентов $\hat{\boldsymbol{\Theta}} = [\hat{\boldsymbol{\phi}}_1, \hat{\boldsymbol{\phi}}_2, \dots, \hat{\boldsymbol{\phi}}_n]$, $\mathbf{U}_i(\hat{\boldsymbol{\chi}}, \mathbf{z}_2, \hat{\boldsymbol{\phi}}_i)$ – базовый алгоритм настройки в дифференциальной форме, Γ_i – симметричная положительно определенная матрица, $\text{proj}(z_{2,i} \hat{\boldsymbol{\chi}}_i, \hat{\boldsymbol{\phi}}_i)$ – проекционный оператор для i -го столбца $\hat{\boldsymbol{\phi}}_i$ оценки матрицы $\hat{\boldsymbol{\Theta}}$, который задается следующим образом [5]. Введем обозначения-векторы \mathbf{w} и $\boldsymbol{\theta}$:

$\mathbf{w} = z_{2,i} \hat{\boldsymbol{\chi}}$, где $z_{2,i}$ – i -я компонента вектора \mathbf{z}_2 ; $\boldsymbol{\theta} = \hat{\boldsymbol{\phi}}_i$. Пусть вектор коэффициентов $\boldsymbol{\theta}$ принадлежит компактному выпуклому множеству $\Omega := \{\boldsymbol{\theta} : \|\boldsymbol{\theta}\| \leq \boldsymbol{\theta}_o\}$, где $\boldsymbol{\theta}_o$ – известная положительная константа, $\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}$ – ошибка оценки вектора коэффициентов $\hat{\boldsymbol{\theta}}$. Тогда проекционный оператор определяется как

$$\text{proj}(\mathbf{w}, \hat{\boldsymbol{\theta}}) = \begin{cases} \mathbf{w}, & \text{если } p(\hat{\boldsymbol{\theta}}) < 0; \\ \mathbf{w}, & \text{если } p(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \geq 0 \text{ и } \nabla p(\hat{\boldsymbol{\theta}})^T \mathbf{w} \leq 0; \\ I - \frac{p(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \nabla p(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \nabla p(\hat{\boldsymbol{\theta}})^T}{\|\nabla p(\hat{\boldsymbol{\theta}})\|^2} \mathbf{w}, & \text{если } p(\hat{\boldsymbol{\theta}}) > 0 \text{ и } \nabla p(\hat{\boldsymbol{\theta}})^T \mathbf{w} > 0, \end{cases}$$

где I – единичная матрица, $p(\hat{\boldsymbol{\theta}})$ – выпуклая непрерывно дифференцируемая функция

$$p(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = \frac{\|\hat{\boldsymbol{\theta}}\|^2 - \boldsymbol{\theta}_0^2}{\varepsilon^2 + 2\varepsilon\boldsymbol{\theta}_0},$$

ε – произвольная положительная константа и $\nabla p(\hat{\boldsymbol{\theta}})$ – градиент $\boldsymbol{\theta}$ функции p , $\|\cdot\|$ – евклидова норма.

В заключение сведем воедино результаты синтеза, а именно, нелинейный робастный закон (15), адаптивный робастный алгоритм настройки параметров (16) и нелинейный наблюдатель возмущения (5), (6):

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau} = -\mathbf{z}_1 - \mathbf{K}_2\mathbf{z}_2 + \mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\alpha}} + \mathbf{C}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{G} - \hat{\boldsymbol{\Theta}}^T \hat{\boldsymbol{\chi}}, \mathbf{M}=\mathbf{M}(\mathbf{q}), \mathbf{C}=\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \mathbf{G}=\mathbf{G}(\mathbf{q}); \\ \dot{\hat{\boldsymbol{\phi}}}_i = \mathbf{U}_i(\hat{\boldsymbol{\chi}}, \mathbf{z}_2, \hat{\boldsymbol{\phi}}_i) - \Gamma_i \text{proj}(z_{2,i} \hat{\boldsymbol{\chi}}_i, \hat{\boldsymbol{\phi}}_i), i = 1, \dots, n; \\ \hat{\boldsymbol{\chi}} = \boldsymbol{\eta} + \mathbf{L}\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}; \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{H}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{H}\mathbf{L}\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{L}\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{L}[\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\tau}]; \\ \mathbf{z}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_r; \mathbf{z}_2 = \mathbf{x}_2 - \boldsymbol{\alpha}; \boldsymbol{\alpha} = -\mathbf{K}_1\mathbf{z}_1 + \dot{\mathbf{x}}_{1r}; \mathbf{x}_1 = \mathbf{q}; \mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}. \end{cases}$$

Пример. Рассмотрим двухступенный манипулятор, показанный на рис. 1. [11]

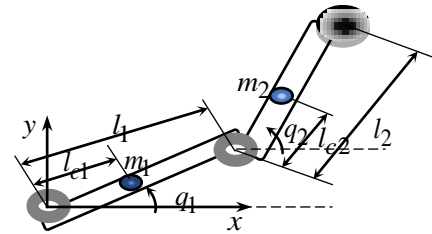


Рис. 1. Двухступенный манипулятор

В соответствии с уравнением (1) получаем

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix},$$

где

$$m_{11} = m_1 l_{c1}^2 + I_1 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos q_2) + I_2;$$

$$\begin{aligned}
m_{12} &= m_{21} = m_2 l_{c2} \cos q_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_2; \\
m_{22} &= m_2 l_{c2}^2 + I_2; & v_{11} &= -m_2 l_{c2} \sin q_2 \dot{q}_2; \\
v_{12} &= -m_2 l_{c2} \sin q_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2); & v_{21} &= -m_2 l_{c2} \sin q_2 \dot{q}_1; \\
v_{22} &= 0; \\
g_1 &= m_1 l_{c1} \cos q_1 + m_2 g (l_{c2} \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos q_1); \\
g_2 &= m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2), \quad g \text{ — ускорение свободного падения.}
\end{aligned}$$

Компьютерные исследования модели двухстепенного манипулятора проводились со следующими числовыми параметрами его сочленений:

$$\begin{aligned}
m_1 &= 4 \text{ кг}; \quad m_2 = 3 \text{ кг}; \quad l_1 = 1.5 \text{ м}; \quad l_2 = 1.5 \text{ м}; \quad I_1 = 0.012 \text{ кгм}^2; \\
I_2 &= 0.0025 \text{ кгм}^2; \quad g = 9.8.
\end{aligned}$$

Вектор программных траекторий манипулятора:

$$\mathbf{q}_d = \begin{bmatrix} q_{1d} \\ q_{2d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2 \sin(\pi t) \\ 0.1 + 0.2 \sin(\pi t) \end{bmatrix}.$$

Вектор внешнего возмущения определяется как

$$\mathbf{d}(t) = \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.3 + 2.5 \sin(2\pi t) + 4 \sin(3\pi t) \\ 1.4 + 5 \sin(2\pi t - \pi/2) + 0.6 \sin(5\pi t) \end{bmatrix}.$$

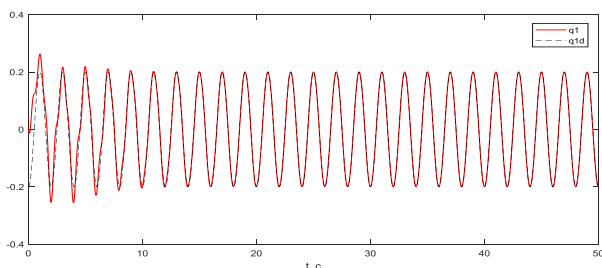


Рис. 2. Траектория манипулятора q_1, q_{1d}

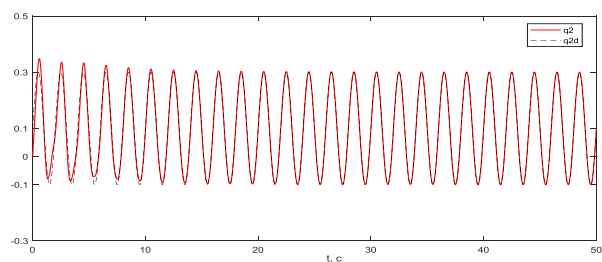


Рис. 3. Траектория манипулятора q_2, q_{2d}

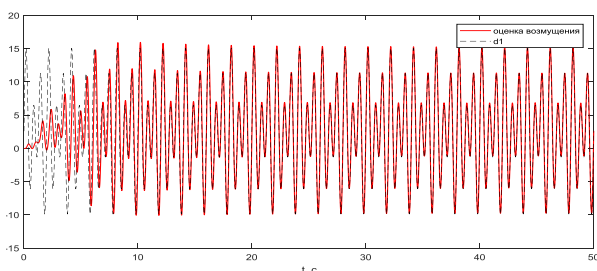


Рис. 4. Возмущение d_1 и его оценка

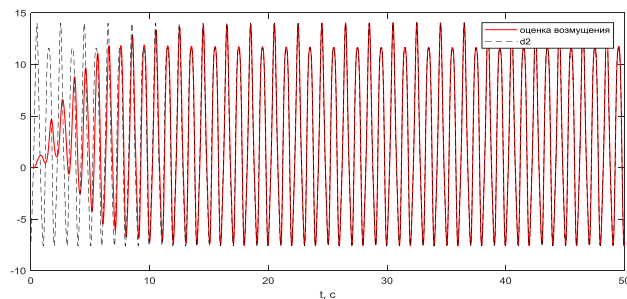


Рис. 5. Возмущение d_2 и его оценка

Результаты моделирования представлены на рис. 2–5. Из рис. 2, 3 видно, что положения звеньев робота-манипулятора отслеживают желаемые траектории с удовлетворительным качеством. Из рис. 4, 5 видно, что построенный адаптивный наблюдатель возмущения, состоящий из (5), (6) и (15), (16) вырабатывает удовлетворительно сходящиеся двухстепенным манипулятором оценки неизвестных возмущений. Результаты моделирования подтверждают эффективность нелинейного робастного закона управления с адаптивной робастной компенсацией неизвестного возмущения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Nikiforov V.O., Adaptive nonlinear servocompensation of unknown extremal disturbed // 14-th IFAC World Congress. Beijing, China, 1999. Vol. I.P., P. 283-289.
- [2] Fradkov A.L., Miroshnik I.V., Nikiforov V.O. Nonlinear and adaptive control of complex systems. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1999.
- [3] Iuannon P.A., Kokotovic, P.V. Instability analysis and improvement of robustness of adaptive control // Automatica. 1984. Vol. 20, №5., P. 583-594.
- [4] Ikhouane F.I., Krstic V. Adaptive backstepping with parameter projection: robustness and performance // Automatica. 1998. Vol. 34, №4., P. 429-435.
- [5] Z. Cai, M.S. de Queiroz, D.M. Dawson. A sufficiently smooth projection operator // IEEE. Transactions on Automatic Control. Vol. 51, №. 1, January, 2006.
- [6] Мирошник И.В., Никифоров В.О. Синтез линейных систем автоматического управления. СПб.: Изд-во СПбГУИТМО, 2000.
- [7] Никифоров В.О. Наблюдатели внешних детерминированных возмущений I. Объекты с известными параметрами // Автоматика и телемеханика. 2004, № 10, С.13–24.
- [8] Никифоров В.О. Наблюдатели внешних детерминированных возмущений II. Объекты с неизвестными параметрами // Автоматика и телемеханика. 2004, № 11, С.40–48.
- [9] Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V. Nonlinear and Adaptive Control Design. N.Y.: John Wiley and Sons. New York. 1995.
- [10] Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 384 с.
- [11] Путов В.В., Шелудько В.Н., Нгуен Дык Фу, Чу Чонг Шы. Исследования адаптивных следящих систем управления четырехзвенным манипуляционным роботом // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 12. С. 19–26.