

МЕХАНИКА МАШИН

УДК 621

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОПИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВОМ, ОСНАЩЕННЫМ ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С УПРУГИМ ЗВЕНОМ© 2019 г. А. В. Мальчиков¹, С. Ф. Яцун^{1,*}, А. С. Яцун¹¹ Юго-Западный Государственный университет, г. Курск, Россия

* e-mail: teormeh@inbox.ru

Поступила в редакцию 21.09.2018 г.

Принята к публикации 25.06.2019 г.

Статья посвящена разработке математической модели и исследованию копирующей системы управления робототехнического устройства, оснащенного линейным электроприводом с упругим звеном. Особое внимание уделено моделированию нелинейных свойств электропривода и измерительной системы. Разработан комплексный критерий оценки качественных показателей системы управления и изучены возможности минимизации влияния нелинейностей на устойчивость копирующей системы управления за счет оптимизации параметров.

Ключевые слова: математическая модель, копирующая система управления, линейный электропривод, упругое звено, нелинейные эффекты

DOI: 10.1134/S0235711919050055

Введение. Анализ современного состояния рассматриваемой проблемы. Начиная с 60-х годов XX века в зарубежных странах, и в России широкое распространение получили биотехнические системы управления, в которых манипулятор робота копирует движение руки или ноги оператора. Применение такого принципа управления, называемого копирующим, существенно расширяет функциональные возможности оператора, так как человек-оператор может выполнять движения, которые без робототехнического устройства он выполнить не в состоянии. Кроме того, управление может осуществляться на достаточно большом расстоянии от зоны выполнения работ, обеспечивая телеуправление роботом. Важным является и то, что задачи можно выполнять с масштабированием (например, смещение руки оператора на один сантиметр равно смещения манипулятора на один миллиметр и т.д.) [1].

Отдельно стоит выделить применение копирующих систем управления для задач так называемой носимой робототехники, в которой манипулятор робота совершает совместное движение с конечностями человека, усиливая или ускоряя работу мышц.

Однако, несмотря на наличие ряда публикаций [2–7], и реализованных систем с копирующей системой управления, методы исследования поведения КСУ с упругим элементом в приводе и синтеза параметров разработаны недостаточно.

Обоснование актуальности рассматриваемой проблемы. Одним из путей улучшения работы и повышения робастности копирующих систем управления (КСУ) является введение упругих элементов в электропривод, такие робототехнические системы, получили название эластичных или мягких роботов [8–13]. Такое техническое решение позволяет повысить эффективность и расширить область применения в первую очередь носимых робототехнических устройств, получивших название экзоскелеты, ко-

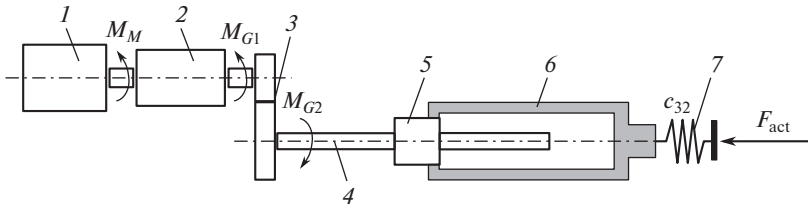


Рис. 1. Схема линейного электропривода КСУ.

торые могут одеваться на несколько частей тела или на отдельную конечность [14, 15]. Однако, дальнейшее распространение этих устройств сдерживается из-за того, что копирующее управление, применяемое в таких устройствах, часто не обеспечивают необходимые показатели качества. Связано это с тем, что введение упругих элементов в КСУ с нелинейными элементами, присущими электроприводам и измерительной системе в определенных режимах изменяет характер поведения системы автоматического управления, снижает точность, увеличивает время переходных процессов, то есть, ухудшаются показатели качества системы управления, ее устойчивость [16]. Для выявления таких режимов необходимо разработать математическую модель копирующей системы управления и методику исследования устойчивости.

При исследовании устойчивости системы автоматического управления с несколькими нелинейными элементами, удобно применить метод, основанный на зондировании пространства варьируемых параметров, и определении времени переходного процесса путем решения нелинейных дифференциальных уравнений, численными методами в каждой точке гиперпространства. Для зондирования многомерного пространства применяются неравномерные сетки, проекции которых на любую грань гиперкуба, имеющую меньшую размерность, не приводят к значительному сокращению количества точек. В качестве последовательности точек используют последовательности случайных точек. Процедура случайного поиска представлена в ряде источников [17, 18]. Размерность пространства варьирования определяется вектором варьируемых параметров $\bar{a} \in R^N$, где N – число параметров, определяющих свойства КСУ.

Изложение существа решения задачи. Расчетная схема. Одним из видов приводов, широко применяемых в робототехнике, являются линейные электроприводы, в основе которых лежит шарико-винтовая передача (ШВП), редуктор, электродвигатель. В зависимости от параметров такой трансмиссии, и в первую очередь шага ШВП, возможен режим функционирования, при котором реализуется эффект “самоторможение”, а также “сухое трение”. Кроме того, сам электродвигатель обладает нелинейными свойствами типа “зона нечувствительности и насыщение”. Копирующая система управления должна быть обеспечена системой связи человека и робота, чтобы движения оператора и машины были практически синхронны. Для этого КСУ оснащена датчиками перемещения или силы, а в ряде случаев и мускульной активности, которые передают информацию в бортовой вычислитель, который формирует управляющие воздействия, поступающие на приводы. Измерительная система КСУ, выполненная с использованием этих датчиков, так же обладает нелинейными свойствами типа “воздушный зазор”, “натяг”, “насыщение”. На рис. 1 приведена схема электропривода с упругим элементом, приводящего в движение звено робота.

На схеме: 1 – электродвигатель, развивающий крутящий момент M_M ; 2 – редуктор с передаточным числом k_{G1} ; 3 – цилиндрический редуктор с передаточным k_{G2} ; 4 – винт шарико-винтовой передачи; 5 – гайка ШВП; 6 – исполнительное звено привода, 7 – дополнительный упругий элемент.

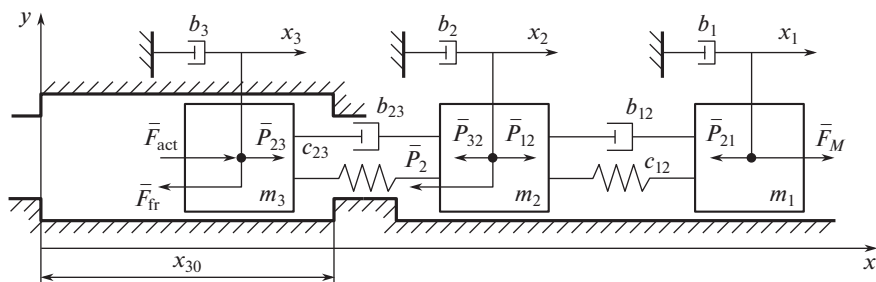


Рис. 2. Расчетная схема устройства с КСУ.

Математические модели элементов системы управления. Рассмотрим расчетную схему КСУ (рис. 2), которая состоит из трех твердых тел, связанных между собой упруго-вязкими элементами.

На схеме приняты следующие обозначения: масса m_1 – моделирует биологическое звено, m_2 – исполнительное звено робота, m_3 – исполнительное звено привода, c_{12} , b_{12} – коэффициенты жесткости и вязкости измерительной системы; c_{23} , b_{23} – коэффициенты жесткости и вязкости упругого элемента, соединяющего электропривод и исполнительное звено робота; x_1 , x_2 , x_3 – абсолютные координаты масс; b_1 , b_2 , b_3 – коэффициенты абсолютного вязкого сопротивления; F_{act} – сила, развиваемая электроприводом; F_{fr} – сила трения в механической передаче электропривода; F_M – задающая сила, действующая на m_1 со стороны оператора; $P_{12} = P_{21}$ – сила, измеряемая датчиками измерительной системы; $P_{23} = P_{32}$ – сила упругого элемента, встроенного между исполнительным звеном электропривода и звеном робота; P_2 – сила, которую необходимо преодолеть при движении. На звено m_1 действуют силы F_M , P_{12} . На m_2 действуют силы P_{12} , P_{32} , P_2 . На m_3 действуют F_{act} , P_{23} , F_{fr} . Кроме того, на все тела действуют силы вязкого сопротивления.

Математическую модель силы, развиваемой электроприводом, определим по формуле

$$F_{\text{act}} = \begin{cases} 0, & \text{если } I < I_0 \\ k_{\text{act}} I, & \text{если } I_0 < I < I_{\text{max}}, \\ k_{\text{act}} I_{\text{max}}, & \text{если } I > I_{\text{max}} \end{cases} \quad (1)$$

k_{act} – силовой коэффициент электропривода.

$$k_{\text{act}} = \frac{k_G \times 2\pi C_M}{n} \eta, \quad (2)$$

где k_G – суммарное передаточное число планетарного и цилиндрического редукторов, C_M – моментный коэффициент электродвигателя, n – шаг шарико-винтовой передачи, η – приведенный суммарный КПД механизма.

В формуле (1) I_0 – минимальное значение тока электропривода, I_{max} – максимальный пусковой ток электропривода.

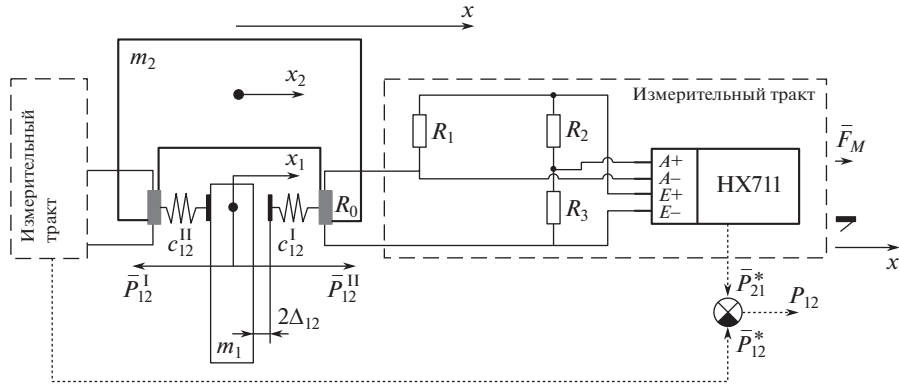


Рис. 3. Схема измерительной системы КСУ.

Силу сухого трения, определим по формуле

$$F_{fr} = \begin{cases} -F_{fr}^{max} \text{sign}(\dot{x}_3), & \text{если } \dot{x}_3 \neq 0; \\ -\sum_{j=0}^n F_j^{m3}, & \text{если } \dot{x}_3 = 0 \text{ и } \left| \sum_{j=0}^n F_j^{m3} \right| \leq F_{fr}^{max}; \\ -F_{fr}^{max} \text{sign} \left(\sum_{j=0}^n F_j^{m3} \right), & \text{если } \dot{x}_3 = 0 \text{ и } \left| \sum_{j=0}^n F_j^{m3} \right| > F_{fr}^{max}. \end{cases} \quad (3)$$

$\sum_{j=0}^n F_j^{m3}$ – сумма внешних сил, действующая на массу m_3 , исключая силу трения F_{fr} ; F_{fr}^{max} – предельная сила трения, определяемая экспериментально. Моделирование эффекта самоторможения, выражающегося в том, что движение исполнительного звена с массой m_3 , возможно только под действием силы, создаваемой электроприводом F_{act} при условии, что она превышает сумму сил действующих на m_3 .

Запишем дифференциальное уравнение движения m_3

$$m\ddot{x}_3 + b\dot{x}_3 = P_{32} - F_{fr} - \sum_{j=0}^n G_j^{m3} \quad (4)$$

$$\dot{x}_3 = 0, \quad \text{если } \left| \sum_{j=0}^n G_j^{m3} \right| > |F_{act}|, \quad \text{sign} \left(\sum_{j=0}^n G_j^{m3} \right) \neq \text{sign}(F_{act}),$$

где $\sum_{j=0}^n G_j^{m3}$ – сумма внешних сил, действующих на m_3 , исключая силу электропривода F_{act} . Кроме того, существуют ограничения по рабочему ходу x_3 , обусловленного конструкцией электропривода. Представим их в виде $0 \leq x_3 \leq x_{30}$.

Теперь рассмотрим схему измерительной системы КСУ (рис. 3).

Измерительная схема КСУ состоит из двух тензорезистивных чувствительных элементов, каждый из которых установлен на упругом основании с жесткостями c_{12}^I и c_{12}^{II} . Схема закрепления чувствительных элементов позволяет регулировать зазор Δ_{12} между ними и массой m_1 (рис. 3).

Для оценки деформации каждого из двух тензорезисторов используется полумостовая схема, показанная на рис. 3. На схеме R_0 – измерительный тензорезистор; $R_1, R_2,$

R_3 – компенсирующие резисторы. В качестве аналого-цифрового преобразователя используется специализированная микросхема НХ711. Далее цифровые сигналы с обоих АЦП поступают на микроконтроллер, который формирует задающее воздействие для системы управления электроприводом, при этом выходная величина, используемая в САУ \bar{P}_{12} , определяется как разность показаний с обоих АЦП датчиков (5)

$$\bar{P}_{12} = P_{21}^I - P_{12}^{II} = c_{12}^I(x_1 - x_2) - c_{12}^{II}(x_2 - x_1) \quad (5)$$

Если датчики измерительной системы установлены с зазором, то считая жесткость обоих чувствительных элементов равными $c_{12}^I = c_{12}^2 = c_{12}$, получим

$$P_{12} = \begin{cases} 0, & \text{если } |x_1 - x_2| \leq \Delta_{12} \\ c_{12}((x_1 - x_2) - \Delta_{12}\text{sign}(x_1 - x_2)), & \text{если } |x_1 - x_2| > \Delta_{12}, \end{cases} \quad (6)$$

где $2\Delta_{12}$ – величина зазора.

Если $\Delta_{12} = 0$, то $P_{12} = c_{12}(x_1 - x_2)$, следовательно любое перемещение оператора приводит к появлению измеряемой величины \bar{P}_{12} .

$$P_{12} = c_{12}(x_1 - x_2). \quad (7)$$

Для зондирования пространства параметров вектора $\bar{a} \in R^N$ дифференциальные уравнения, описывающие движение рассматриваемой механической системы представим в виде

$$M\ddot{X} + \Phi(X, \dot{X}) = Q, \quad (8)$$

где

$$M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$\Phi(X, \dot{X}) = \begin{pmatrix} P_{21} + b_1\dot{x}_1 \\ -P_{12} + P_{32} + b_2\dot{x}_2 \\ -F_{act} - P_{23} + F_{fr} + b_3\dot{x}_3 \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$Q = \begin{pmatrix} F_M \\ P_2 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Для обобщения результатов исследования и оптимизации приведем систему уравнений (8) к безразмерному виду, для этого введем обозначения: $\tau = \frac{t}{T}$ – безразмерное время (T – масштаб времени), $\bar{x}_i = \frac{x_i}{L}$ – безразмерное перемещение (L – масштаб перемещения).

Тогда для сил P_{12} и P_{23} справедливы выражения

$$P_{12} = c_{12}(x_1 - x_2) = c_{12}L(\bar{x}_1 - \bar{x}_2); \quad (12)$$

$$P_{23} = c_{23}(x_2 - x_3) = c_{23}L(\bar{x}_2 - \bar{x}_3). \quad (13)$$

Преобразовав систему (8), получим

$$\begin{cases} \ddot{\bar{x}}_1 = \bar{f}_M - \xi_{12}^2(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \zeta_1\dot{\bar{x}}_1 \\ \ddot{\bar{x}}_2 = \bar{f}_P - \bar{m}_{32}\xi_{32}^2(\bar{x}_2 - \bar{x}_3) + \bar{m}_{12}\xi_{12}^2(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \zeta_2\dot{\bar{x}}_2, \\ \ddot{\bar{x}}_3 = \bar{f}_{act} - \bar{f}_{fr} + \xi_{32}^2(\bar{x}_2 - \bar{x}_3) - \zeta_3\dot{\bar{x}}_3 \end{cases} \quad (14)$$

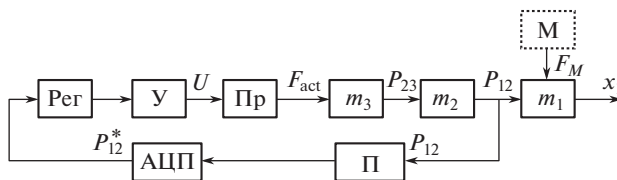


Рис. 4. Схема системы управления электроприводами.

$$\text{где } \bar{f}_M = \frac{F_M T^2}{m_1 L}, \bar{f}_{\text{act}} = \frac{F_{\text{act}} T^2}{m_3 L}, \bar{f}_P = \frac{P_2 T^2}{m_2 L}, \bar{f}_{\text{fr}} = \frac{F_{\text{fr}} T^2}{m_2 L}, \xi_{12}^2 = k_{12}^2 T^2 = \frac{c_{12}}{m_1} T^2, \xi_{32}^2 = k_{32}^2 T^2 = \frac{c_{32}}{m_3} T^2, \zeta_i = 2n_i T = \frac{b_i}{m_i} T; \bar{m}_{12} = \frac{m_1}{m_2}, \bar{m}_{32} = \frac{m_3}{m_2}.$$

Структурная схема копирующей системы управления. Рассмотрим структурную схему копирующей системы управления электроприводом, приведенную на рис. 4, которая состоит из регулятора, усилителя, привода, исполнительного звена привода, исполнительного звена робота, биологического звена, преобразователя.

Сила F_M , создаваемая мышцами оператора создает перемещение биологического звена m_1 . Силовой пропорционально дифференцирующий (ПД) регулятор, формирует управляющее напряжение

$$u^{k+1} = k_p(P_{12}^k) + k_d \left(\frac{P_{12}^k - P_{12}^{k-1}}{\Delta t} \right), \tag{15}$$

где P_{12}^k – усилие измеряемой датчиком манжеты на k -м шаге опроса датчика, P_{12}^{k-1} – показания датчика на предыдущем шаге (опроса датчика), Δt – отрезок времени между соседними измерениями, k_p и k_d – коэффициенты регулятора. Усилитель преобразует напряжение регулятора $U = k_{\text{амп}} u$, которое поступает на электропривод, формирующий силу F_{act} – в результате происходит перемещение масс m_3 и m_2 .

Математическое моделирование. Обсуждение результатов в научном и прикладном аспектах. Полученная математическая модель управляемой электромеханической системы позволяет решить задачу оптимального синтеза параметров управляемой системы в следующей постановке. Получив значения x_1 и x_2 , находим ошибку по положению $\varepsilon = x_1 - x_2$ и устанавливаем параметры электропривода и регулятора позволяющие минимизировать ε . Введем три критерия эффективности работы системы: $K_1 = \frac{1}{T} \int_0^T |x_1 - x_2| dt$ – интегральный критерий ошибки; $K_A = \max(x_1 - x_2)$, $t \in [0, T]$ – амплитудный критерий ошибки; $K_T = t_s$ – время переходного процесса, определяемого вхождением ошибки в 5% коридор от установившегося значения. В качестве целевой функции примем критерий, учитывающий и интегральную, амплитудную ошибку и время переходного процесса

$$In = In(\bar{a}) = \alpha_1 K_I + \alpha_2 K_A + \alpha_3 K_T, \tag{16}$$

где α_1 , α_2 и α_3 – весовые коэффициенты.

Параметры, определяющие нелинейные свойства КСУ, можно разделить на неизменяемые, например массы, коэффициенты трения и т.д. и варьируемые, образующие вектор $\bar{a} = (k_{\text{act}} k_p k_d c_{12} c_{32})$. В пространстве этих параметров проведем серию вычислительных экспериментов для определения поверхности отклика In . Будем считать, что

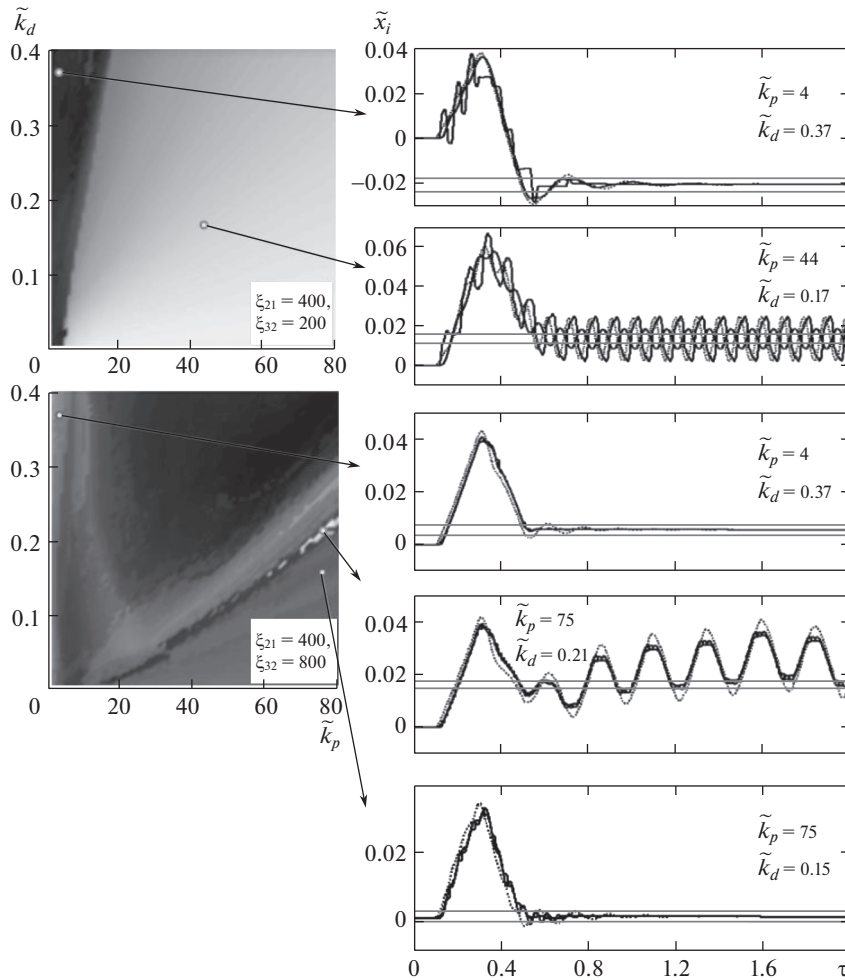


Рис. 5. Комплексный параметр эффективности КСУ в области параметров ПД-регулятора и набор переходных характеристик при различных параметрах.

если $In < In_0$, то система удовлетворяет требованиям устойчивости и точности. При моделировании были использованы следующие значения неизменяемых параметров двигателя (для коллекторного двигателя постоянного тока мощностью 60 Вт): $k_{act} = 6.8$; $R = 1.2$; $L = 0.008$, и механизма: $m_1 = 10$; $m_2 = 25$; $m_3 = 2$; $b_1 = b_2 = b_3 = 100$, $\Delta_{12} = 0.002$.

В качестве задающего усилия была использована прямоугольная функция, описываемая уравнением

$$\bar{f}_M = \begin{cases} 0, & t \in [0, 0.1) \\ 100, & t \in [0.1, 0.3) \\ -100, & t \in [0.3, 0.5) \\ 0, & t \in [0.5, +\infty) \end{cases} \quad (17)$$

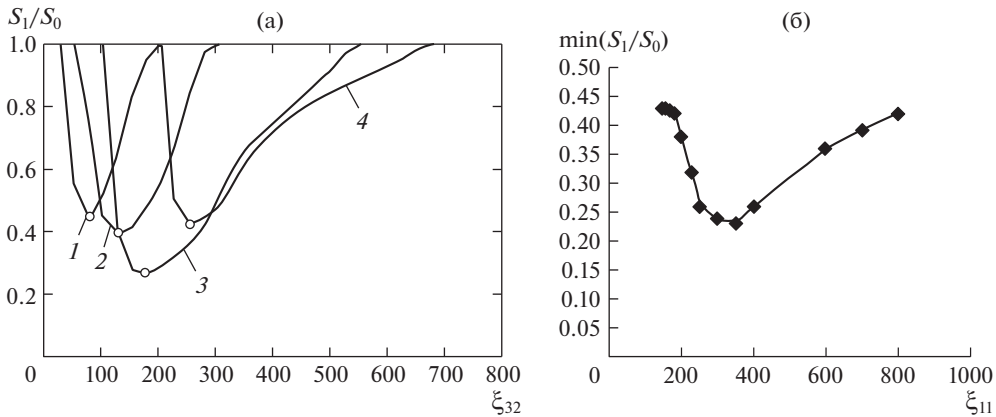


Рис. 6. Оценка влияния жесткостей упругого звена привода и жесткости измерительной системы на устойчивость системы: 1 – результаты для параметра $\xi_{12} = 150$; 2 – результаты для параметра $\xi_{12} = 200$; 3 – результаты для параметра $\xi_{12} = 400$; 4 – результаты для параметра $\xi_{12} = 800$.

На рис. 5 построены графики зависимости комплексного критерия $ln(\bar{a})$ от значений коэффициентов k_p, k_d . На этих диаграммах определены области удовлетворительных в смысле критерия ln и неудовлетворительных режимов. Здесь же показаны примеры переходных процессов для устойчивых и неустойчивых режимов.

Для оценки размеров области удовлетворительности (устойчивости) системы, введем критерий качества управления $\lambda = S_1/S_0$, определяемый отношением количества экспериментов с устойчивым режимом к общему количеству вычислительных экспериментов (рис. 6). При этом, удовлетворительным режимом будем считать тот, при котором время переходного процесса t_s меньше заданного. Также введем параметр $\lambda_m = \min(S_1/S_0)$, соответствующий минимуму отношения (S_1/S_0) в исследуемом диапазоне значений безразмерной жесткости ξ_{32} . График этой величины в зависимости от безразмерной жесткости ξ_{21} показан на рис. 6б.

Анализ полученных диаграмм, представленных на рис. 6а показал, что величина области устойчивых режимов по отношению к общему числу $\lambda = S_1/S_0$ существенно зависит от величины жесткостей ξ_{32} и ξ_{21} . Имеет место немонотонный характер изменения критериев λ и λ_m . Область параметров с наименее удовлетворительными режимами определяется $\xi_{32} = 70\text{--}350$ и $\xi_{21} = 350$ при $\Delta_{12} = 0.002$.

Заключение. В работе разработана математическая модель нелинейного электропривода копирующей системы управления с учетом нелинейных эффектов с неизменяемыми и варьируемыми параметрами. Предложен комплексный критерий оценки качества управления, учитывающий интегральную и максимальную ошибки, а также время переходного процесса. Особое внимание уделено исследованию влияния на качественные показатели системы управления, жесткости дополнительного упругого элемента, установленного в электроприводе и жесткости измерительной системы. Показано, что критерий качества управления $\lambda = S_1/S_0$ зависит от жесткости упругого элемента. На диаграмме оценки влияния жесткостей упругого звена привода и жесткости измерительной системы на устойчивость системы можно выделить три области: первая соответствует высокому уровню $\lambda = 1$ при малых значениях ξ_{32} и с ростом ξ_{21} эта область увеличивается, вторая – низкому $\lambda = 0.3\text{--}0.4$ при средних значениях ξ_{32} и

характеризуется смещением вправо при росте ξ_{21} ; третья соответствует высокому уровню $\lambda = 1$ при больших значениях ξ_{32} . Минимальное значение критерия качества управления λ_m зависит немонотонно от ξ_{21} имея минимум при $\xi_{21} = 350$. В практическом плане установлена область параметров упругого подвеса, позволяющего обеспечить удовлетворительные показатели качества проектируемого устройства.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-08-00773А “Изучение закономерностей взаимодействия стоп экзоскелета с шероховатой опорной поверхностью”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Furuta K. et al.* Master-slave manipulator based on virtual internal model following control concept // Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on. IEEE. 1987. V. 4. P. 567.
2. *Pratt G.A., Williamson M.M.* Series elastic actuators // Intelligent Robots and Systems 95. “Human Robot Interaction and Cooperative Robots”, Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE. 1995. V. 1. P. 399.
3. *Robinson D.W. et al.* Series elastic actuator development for a biomimetic walking robot // Advanced Intelligent Mechatronics, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/ASME International Conference on. IEEE. 1999. P. 561.
4. *Pratt G.A., Williamson M.M.* Elastic actuator for precise force control, USA Patent 5650704, 1997.
5. *Sakawa Y., Matsuno F., Fukushima S.* Modeling and feedback control of a flexible arm // J. Robotic Systems. 1985. V. 2. № 4. P. 453.
6. *De Luca A.* Dynamic control of robots with joint elasticity // Robotics and Automation, 1988. Proceedings. 1988 IEEE International Conference on. IEEE. 1988. P. 152.
7. *Spong M.W.* Modeling and control of elastic joint robots // J. Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1987. V. 109. № 4. P. 310.
8. *Tomei P.A.* Simple PD controller for robots with elastic joints // IEEE Transactions on Automatic Control. 1991. V. 36. № 10. P. 1208.
9. *Kepler M., Lakatos D., Ott Ch., Albu-Schäffer A.* Elastic Structure Preserving (ESP) Control for Compliantly Actuated Robots IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS.
10. *Albu-Schäffer A. et al.* “Anthropomorphic soft robotics from torque control to variable intrinsic compliance,” in Robotics Research (Springer Tracts in Advanced Robotics), vol. 70, C. Pradaliere, R. Siegwart, and G. Hirzinger, Eds. New York, USA: Springer, 2011. P. 185.
11. *Ortega R., Kelly R., Loria A.* A class of output feedback globally stabilizing controllers for flexible joints robots, IEEE Trans. Robot. Autom. 1995. V. 11. № 5. P. 766.
12. *Albu-Schäffer A., Hirzinger G.* A globally stable state feedback controller for flexible joint robots, Adv. Robot. 2001. V. 15. № 8. P. 799.
13. *Ott C.* Cartesian Impedance Control of Redundant and Flexible-Joint Robots, B. Siciliano and O. Khatib, Eds. New York, USA: Springer, 2008.
14. *Jatsun S. et al.* Study of controlled motion of exoskeleton moving from sitting to standing position // Advances in Robot Design and Intelligent Control. Springer, Cham, 2016. P. 165.
15. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A.* Parameter optimization for exoskeleton control system using sobol sequences // ROMANSY 21-Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Cham, 2016. P. 361.
16. *Westervelt E.R. et al.* Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion. CRC Press, 2007.
17. *Растрюгин Л.А.* Случайный поиск в задачах оптимизации многопараметрических систем. Рига: Изд-во Зинатне, 1965.
18. *Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы // Ж. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 1998. Т. 8. № 2.
19. *Иванов Г.Г., Алфёров Г.В., Ефимова П.А.* Устойчивость селекторно-линейных дифференциальных включений. Вестник пермского университета. 2017 Математика. Механика. Информатика Вып. 2(37) С. 25.