

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕХАТРОННЫМ МОДУЛЕМ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ

**Бохонский А.И., Круговой А.Н., Барашова Л.В.**  
(СевНТУ, г. Севастополь, Украина)

*Influence of parameters the module on dynamic behavior is investigation optimum moved nonrigid object.*

В настоящее время при разработке автоматизированных систем, требующих большого количества точек позиционирования, особенно при сборке, используются мехатронные модули, например типа DGE-ZR производства фирмы “Фесто” (рисунок 1). В этих модулях вращательное движение вала электродвигателя преобразуется в поступательное с помощью зубчатых шкивов и ремня, а датчик перемещения (энкодер) устанавливается на валу двигателя. При этом конечная жесткость зубчатого ремня оказывает существенное влияние на закон перемещения и точность позиционирования выходного элемента.

В [1,2] рассмотрены оптимальные (по быстродействию) управления переносным движением деформируемых объектов из исходного в конечное состояния абсолютного покоя (с допущением колебаний переносимого упругого объекта только на временном интервале движения). Практическая реализация таких управлений сопряжена с необходимостью учета влияния свойств приводов (сопротивления движению, упругости элементов, возмущений и др.). При оптимальном по быстродействию перемещении нежестких элементов приводами возникают их колебания как упругих систем, снижающие качество выполняемых работ.

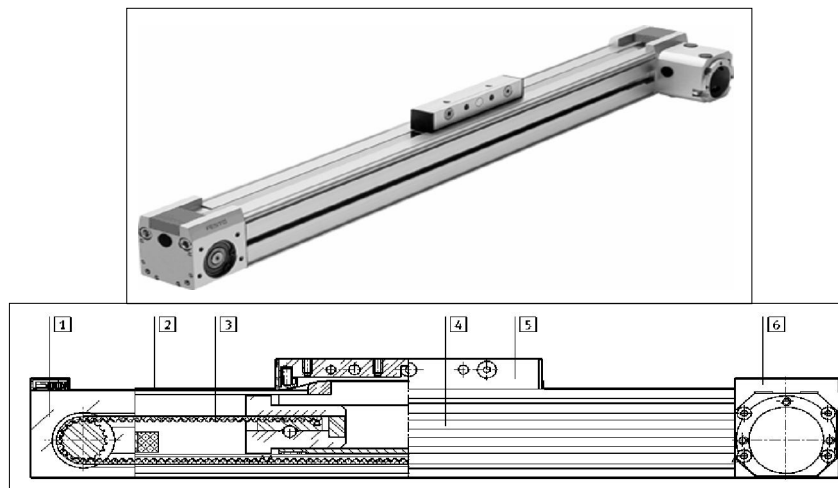


Рис. 1. Мехатронный модуль типа DGE-ZR, 1,6 – крышки, 2 – направляющая, 3 – зубчатый ремень, 4 – корпус, 5 – каретка

В [1] найден специальный класс управлений, обеспечивающих минимальное время перемещения деформируемого объекта из исходного в конечное состояние абсолютного покоя (с допущением колебаний только на временном интервале движения).

В настоящее время продолжают оставаться актуальными задачи создания высокопроизводительных манипуляторов минимальной массы с обеспечением высокой точности позиционирования. Для таких манипуляторов должны использоваться специальные законы управления движением, учитывающие колебания исполнительных органов как упругих систем с конечным либо бесконечным числом степеней свободы.

Реальные оптимальные управления движением мехатронными модулями с электроприводами должны непосредственно учитывать ряд существенных факторов: сопротивление движению, физические и геометрические параметры элементов конструкций мехатронных модулей, случайные процессы и другие факторы.

Целью исследований является оценка влияния физических параметров привода (например, конечной жесткости ремня) на характер колебаний оптимально переносимого мехатронным модулем упругого объекта.

#### **Упрощенная модель привода.**

Уравнения движения составлены на основании допущений, использованных в задаче синтеза ременного привода печатающего устройства принтера [3]: момент инерции ведомого шкива  $J_2 = 0$  и отсутствует трение на ведомом шкиве. В этом случае для системы с двумя степенями свободы уравнения движения без учета перемещаемого упругого объекта (рисунок 3) следующие:

$$\begin{aligned} J_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + b \frac{d\varphi_1}{dt} + r(T_1 - T_2) &= -rT_0 + M(t), \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} - T_1 + T_2 &= T_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\varphi_1$  – угол поворота ведущего шкива;  $x$  – перемещение массы  $m$ ;  $J_1$  – момент инерции ведущего шкива (вместе с двигателем);  $r$  – радиус шкива;  $T_1 = c(r\varphi_1 - x)$ ,  $c$  – коэффициент жесткости ремня;  $T_2 = c(x - r\varphi_1)$ ;  $b$  – коэффициент демпфирования;  $M(t)$  – момент в двигателе, который должен обеспечить оптимальное перемещение упругого объекта. Ранее [1] для идеального управления в виде момента в задаче анализа, например, принималось:

$$M(t) = J_1 \frac{Lp^2}{2\pi r} \sin(pt), \quad (2)$$

где  $L$  – расстояние, на которое перемещается масса  $m$ ;  $p = 2\pi/t_*$ , где  $t_*$  – общее время движения.

С использованием уравнений (1) для определения  $M(t)$  решена обратная задача динамики – по заданному закону перемещения массы  $m$  (согласно [1] задано перемещение сосредоточенной массы  $x(t) = \frac{L}{2\pi}(pt - \sin pt)$ ) в системе аналитических вычислений найдено:

$$M(t) = -\frac{Lp}{4\pi cr} \left[ (J_1 p^2 m - 2J_1 pc - 2r^2 mcp) \sin pt + (2bc - bmp^2) \cos pt - 2bc \right]. \quad (3)$$

Исходные данные для численного примера (в Maple):  $\omega = 6.2832 \text{ с}^{-1}$ ;  $r = 0.04 \text{ м}$ ;  $m = 2 \text{ кг}$ ;  $J = mr^2/2$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $L = 0.3 \text{ м}$ ;  $b = 0.005 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ ;  $p = \omega/2$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;  $T = 2\pi/p$ ,  $\text{с}$ ;  $c = 10000 \text{ Н/м}$ .

На рисунке 2 изображены графики моментов в электродвигателе в случае абсолютно жесткого ремня  $M_1(t)$  и ремня конечной жесткости  $M(t)$ . При  $b \neq 0$  нарушается косая симметрия для  $M(t)$  – наблюдается отклонение от идеального закона вращения. На вращение ротора двигателя накладываются колебания, обусловленные не нулевыми начальными условиями и другими возмущениями.

Следует отметить, что при некотором достаточно большом коэффициенте жесткости ремня его дальнейшее увеличения практически не влияет на характер управления. Коэффициент демпфирования существенно влияет на управление при любом коэффициенте жесткости ремня.

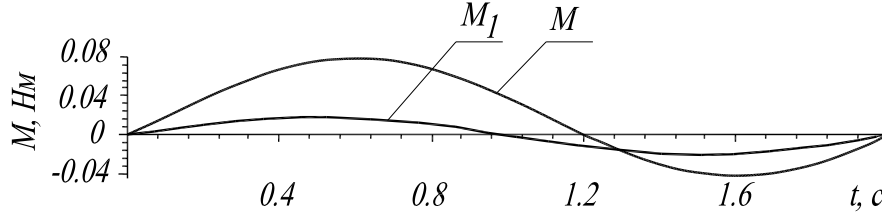


Рис. 2. Графики управлений:  $M_1(t)$  – момент в двигателе, при абсолютно жестком ремне,  $M(t)$  – момент при использовании ремня конечной жесткости

**Динамическая модель, учитывающая оптимально перемещаемый упругий объект.**

При составлении уравнений движения системы с тремя степенями свободы в качестве обобщенных координат приняты:  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $x_1$ , где  $x_1$  – перемещение упругого объекта в связи с его деформированием (рисунок 3). Переносное движение массы  $m_1$  является абсолютным для массы  $m$ , моменты инерции шкивов  $J_1 \neq 0$  и  $J_2 \neq 0$ , ремень обладает конечной жесткостью, следовательно:

$$x = r(2\varphi_1 - \varphi_2), \quad \dot{x} = r(2\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2). \quad (4)$$

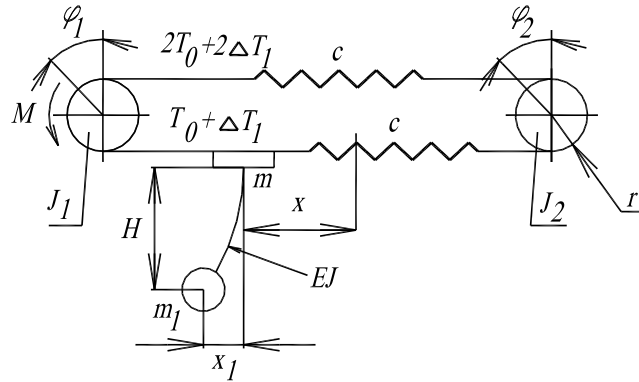


Рис. 3. Схема оптимального перемещения упругого объекта

Уравнения движения, составленные с использованием уравнений Лагранжа второго рода:

$$\begin{aligned} a_1 \ddot{\varphi}_1 + a_2 \ddot{\varphi}_2 + a_3 \ddot{x}_1 &= Q_1, \\ b_1 \ddot{\varphi}_1 + b_2 \ddot{\varphi}_2 + b_3 \ddot{x}_1 &= Q_2, \\ c_1 \ddot{\varphi}_1 + c_2 \ddot{\varphi}_2 + c_3 \ddot{x}_1 &= Q_3, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $a_1 = J_1 + 4r^2(m + m_1)$ ;  $a_2 = J_2 - 2r^2(m + m_1)$ ;  $a_3 = 2m_1 r$ ;  $b_1 = -2r^2(m + m_1)$ ;  $b_2 = J_2 + r^2(m + m_1)$ ;  $b_3 = -m_1 r$ ;  $c_1 = 2m_1 r$ ;  $c_2 = -mr$ ;  $c_3 = m_1$ .

Обобщенные силы  $Q_1 = M(t) - T_0 r - cr\varphi_1 + cr\varphi_2$ ;  $Q_2 = T_0 r + cr\varphi_1 - cr\varphi_2$ ;  $Q_3 = -cx_1$ .

В качестве численного примера возьмем исходные данные:  $m=50$  кг;  $m_1=40$  кг;  $r=0,05$  м;  $J_1 = J_2 = mr^2/2$ ;  $T_0=0$ ;  $\omega = 2\pi \text{ с}^{-1}$ ;  $c = \omega^2$ ;  $L=0,6$  м;  $p = \omega/2 \text{ с}^{-1}$ .

После преобразований из уравнений (5) следует:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_1 &= d_1 x_1 - d_1 \varphi_1 + d_2 \varphi_2 + e_1 \sin \pi t, \\ \ddot{\varphi}_2 &= -d_3 x_1 + d_4 \varphi_1 - d_4 \varphi_2 + e_2 \sin \pi t, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\ddot{\varphi}_3 = d_5 \varphi_1 - d_5 \varphi_2 - d_6 x_1 + e_3 \sin \pi t,$$

где  $d_1 \dots d_6$ ,  $e_1 \dots e_3$  – константы.

Решение системы (6) найдено в программной среде Maple. Один из графиков  $x_1(t)$ , отражающий поведение транспортируемого упругого объекта, изображен на рисунке 4.

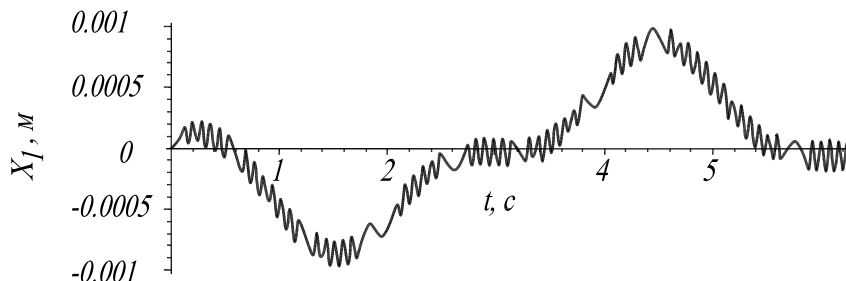


Рис. 4. график колебаний оптимально переносимого упругого объекта с учетом конечной жесткости ремня

На колебания упругого объекта, в связи с его оптимальным перемещением, накладываются колебания системы. Для подавления возмущений различной природы предложен ПИД – регулятор, который обеспечивает снижение влияния различного рода возмущений на точность воспроизведения управления электродвигателем, реализующим оптимальное переносное движение заданного упругого объекта при обеспечении устойчивости движения [3-4].

На основании исследований дано обоснование выбора параметров – электродвигателя, шкивов, коэффициента жесткости ремня и коэффициентов регулятора (на основании теории аналитического конструирования регуляторов) для обеспечения требуемого закона перемещения одного класса упругих объектов техники.

**Список литературы:** 1. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский / Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с. 2. Бохонский А.И. Управление переносным движением упругих систем / А.И. Бохонский / Динамические системы: Межвед. науч. сб. – Симферополь: Изд-во «КФТ», 2004. – Вып. 18. – с. 56-63. 3. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова, – М.: Лаборатория Базовых знаний, 2002. – 832 с. 4. Методы классической и современной теории автоматического управления: Т.1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 656 с.

Надійшла до редколегії 15.05.2009 р.

#### **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕХАТРОННЫМ МОДУЛЕМ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ Бохонский А.И., Круговой А.Н., Барашова Л.В.**

У статті дано обґрунтування вибору параметрів – електродвигуна, шківів, коефіцієнта жорсткості ремня і коефіцієнтів регулювальника (на підставі теорії аналітичного конструювання регулювальників) для забезпечення необхідного закону переміщення одного класу пружних об'єктів техніки

*мехатронный модуль, управление, жесткость ремня, оптимальные перемещения*