

УДК 621.657

А.И. Бохонский, д-р техн. наук, профессор,**А.Н. Круговой, канд. техн. наук, доцент***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ОПТИМАЛЬНОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ОБЪЕКТА С УЧЕТОМ НЕЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ**

С использованием алгоритма решения обратной задачи динамики найдено управление в виде момента на валу двигателя мехатронного модуля, реализующего оптимальное переносное движение упругодеформированной системы.

Ключевые слова: автоматизация сборки; оптимальное перемещение; мехатронный модуль; упругодеформируемая система; электрический и пневматический приводы.

При автоматизации операций упаковки возникает задача укладки изделий в тару в несколько рядов, столбцов и уровней. Для решения такой задачи могут быть использованы мехатронные модули с электроприводом, производимые фирмой “Фесто”. На рисунке 1 изображена типовая конструкция трехкоординатной системы, состоящей из мехатронных модулей. Для перемещения изделий вдоль оси Z (вертикальная ось) используется два пневматических цилиндра модели DGO-25-550-PPV-A-B, так как отсутствует необходимость позиционирования вдоль этой оси. Для перемещения вдоль оси Y используется мехатронный модуль с зубчатым ремнем и шариковой направляющей типа DGE-40-1000-ZR-LK-RV-GK-KF-KG-SED, для перемещения пакета вдоль оси X – DGE-40-850-ZR-LB-GK-KF-KG-SED. В качестве второй направляющей по координате X используется привод типа DGE-40-850-ZR-LK-RB-GK-KF без приводного двигателя.

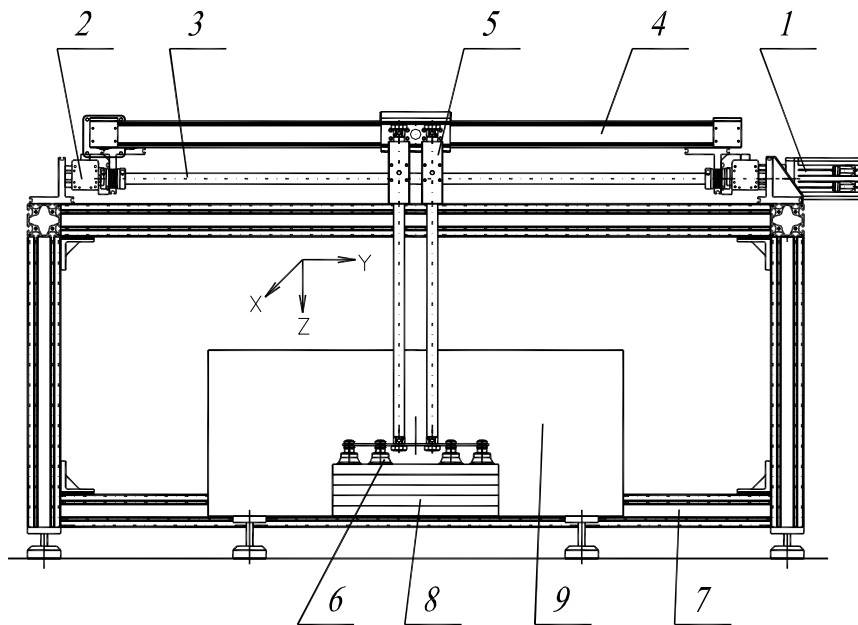


Рисунок 1 – Конструкция трехкоординатной системы на базе мехатронных модулей

Конструкция трехкоординатной системы состоит из приводов координаты X: ведущего 1 (оснащенного сервомотором) и ведомого 2. Валы приводов координаты X соединены между собой соединительным валом 3 с упругими муфтами. Привод 4 координаты Y закреплен на подвижных каретках приводов координаты X. На каретке привода координаты Y установлены два привода 5 координаты Z с захватными устройствами 6. Система приводов смонтирована на основании 7.

Изделие 8 подается внешними устройствами на позицию захвата, удерживается захватом и поднимается в верхнее положение, в котором приводами координат X и Y переносится в заданное место укладки. При опускании привода координаты Z изделие устанавливается либо на дно тары 9, либо на ранее установленное изделие. После этого захват отпускает и возвращается на позицию захвата и цикл повторяется снова. После заполнения тары, она извлекается из-под устройства и передается на

последующую обработку. При больших габаритах тары штоки приводов координаты Z представляют собой нежесткую систему, а переносимое изделие – сосредоточенную массу на упругой связи.

При оптимальном по быстродействию перемещении нежестких элементов приводами возникают их колебания как упругих систем, снижающие качество выполняемых работ. 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.

При практической реализации известного оптимального управления движением [1] мехатронными модулями с электроприводами в моделях должны учитываться ряд существенных факторов: сопротивление движению, реальные физические и геометрические параметры элементов конструкций мехатронных модулей, случайные процессы и др.

Целью исследований является определение закона изменения момента на валу электропривода мехатронного модуля, обеспечивающего заданное оптимальное движение упругой системы с учетом сухого трения и линейно-вязкого сопротивления.

Одно из терминальных управлений оптимальным переносным движением упругой системы с одной степенью свободы из исходного в конечное состояние покоя в общем виде [2] записывается следующим образом:

$$U_e(t) = \frac{2\pi L}{T^2} \cdot \sin^{2n_1-1}(\omega t/n), \quad (1)$$

где L – расстояние, на которое необходимо переместить упругую систему; $T = \frac{2\pi}{p}$ – общее время

движения $p = \omega/n$; ω – частота собственных колебаний упругой системы; $n = 2, 3, 4, \dots$; $n_1 = 2, 3, 4, \dots$. Выбор общего времени движения T зависит от мощности электродвигателя и периода свободных колебаний перемещаемого упругого объекта.

В наиболее простом случае при $n_1 = 1$ и $n = 2$ из (1) следует выражение для оптимального переносного ускорения:

$$U_e(t) = \frac{2\pi L}{T^2} \cdot \sin(\omega t/2). \quad (2)$$

Схема мехатронного модуля, при помощи которого реализуется оптимальное транспортирование упругого объекта на расстояние L , изображена на рисунке 2. Определение момента M на валу электродвигателя осуществляется на основании алгоритма решения обратной задачи динамики.

Дифференциальные уравнения (рисунок 2) движения составлены с использованием уравнений Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_\varphi; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} = Q_{x_1}, \quad (3)$$

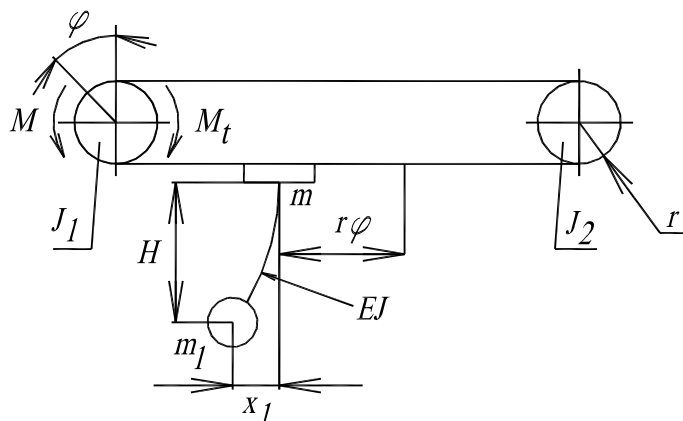


Рисунок 2 – Схема оптимального перемещения упругого объекта с одной степенью свободы с использованием мехатронного модуля

где φ – угол поворота ротора электродвигателя; x_1 – перемещение транспортируемой массы в связи с ее колебаниями; $\dot{\varphi}$, $\dot{x}_1$ – обобщенные скорости; Q_φ , Q_{x_1} – обобщенные силы. Кинетическая энергия системы равна

$$T = \frac{1}{2}(J_1 + J_2)\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}m(r\dot{\varphi})^2 + \frac{1}{2}m_1(r\dot{\varphi} + \dot{x}_1)^2, \quad (4)$$

где m – масса каретки; m_1 – сосредоточенная масса упругой системы; J_1 , J_2 – физические моменты инерции; r – радиус барабана. Из (2) и (4) после преобразований следует система дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} (J_1 + J_2 + (m + m_1)r^2)\ddot{\varphi} + m_1r\ddot{x}_1 &= M - M_t, \\ m_1r\ddot{\varphi} + m_1\ddot{x}_1 &= -cx_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь M – активный (управляющий) момент, подлежащий определению; c – коэффициент жесткости упругой связи. Здесь $c = 3EJ/H^3$; EJ – изгибная жесткость; $M_t = M_*\text{sign}(\dot{\varphi}) + k_1\dot{\varphi}$ – момент сопротивления, учитывающий сухое трение и линейно-вязкое сопротивление.

Наиболее простой вариант решения задачи – определение $M(t)$ при $M_t = 0$. Для нахождения вращающего момента $M(t)$ использован алгоритм решения обратной задачи динамики, т.е. по известным геометрическим (кинематическим) свойствам оптимального движения ($\varphi(t)$ и $x_1(t)$) находится причина, вызывающая такое оптимальное движение – в данном случае определяется вращающий момент.

Согласно [1] оптимальное вращательное движение барабана должно быть

$$\varphi(t) = \frac{L}{2\pi r}(pt - \sin pt), \quad (6)$$

где L – расстояние, на которое должен переместиться упругий объект из исходного состояния покоя.

Следовательно

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{Lp}{2\pi r}(1 - \cos pt), \quad (7)$$

$$\ddot{\varphi}(t) = \frac{Lp^2}{2\pi r}\sin pt, \quad (8)$$

где $p = \omega/n$; $\omega = \sqrt{c/m_1}$. Далее принято $n = 2$.

Для зависимостей (4) – (6) характерно, что при $t = 0$ $\varphi(0) = 0$, $\dot{\varphi}(0) = 0$, $\ddot{\varphi}(0) = 0$, т.е. переносное движение системы начинается из состояния покоя. При $t = T = 2\pi/p$, где T – общее время движения, следует – $\varphi(T) = L/r$, $\dot{\varphi}(T) = 0$, $\ddot{\varphi}(T) = 0$, т.е. сосредоточенная масса через время T , преодолев путь L , приходит в переносном движении в состояние покоя. При этом барабан повернется на угол $\varphi_* = L/r$.

Характер колебаний перемещаемой упругой системы с сосредоточенной массой m_1 в относительном движении [1] на временном интервале движения известен:

$$x_1(t) = \frac{Lp^2}{2\pi(\omega^2 - p^2)} \cdot \left(\frac{p}{\omega} \sin \omega t - \sin pt \right). \quad (9)$$

Скорость и ускорение в относительном движении равны:

$$V_1(t) = \frac{Lp^3}{2\pi(\omega^2 - p^2)} \cdot (\cos \omega t - \cos pt), \quad (10)$$

$$a_1(t) = -\frac{Lp^3}{2\pi(\omega^2 - p^2)} \cdot (\omega \sin \omega t - p \sin pt). \quad (11)$$

Из (9) – (11) следует: при $t = 0$, $x_1(0) = 0$; $V_1(0) = 0$, $a_1(0) = 0$, т.е. относительное движение массы m_1 происходит из состояния относительного покоя; при $t = T = 2\pi/p$ и $p = \omega/2$ перемещение, скорость

и ускорение в относительном движении отсутствуют ($x_1(T) = 0$, $V_1(T) = 0$, $a_1(T) = 0$). Таким образом, масса m_1 перемещается на расстояние L из исходного состояния *абсолютного покоя* в конечное состояние *абсолютного покоя* с допущением колебаний во время движения.

После подстановки $\ddot{\varphi}(t)$ и $\ddot{x}_1(t)$ в первое уравнение системы (3) и преобразований, выражение для момента $M(t)$ с учетом $\omega = 2p$ принимает вид:

$$M(t) = \frac{Lp^2}{3\pi} \left[\frac{3(J_1 + J_2) + r^2(3m + 4m_1)}{2r} \sin pt - m_1 r \sin 2pt \right]. \quad (12)$$

При этом второе дифференциальное уравнение системы (5) удовлетворяется автоматически.

Численный пример. Исходные данные: $\omega = 6,2832 \text{ c}^{-1}$; $r = 0,02 \text{ м}$; $m_1 = m = 1 \text{ кг}$; $J_1 = J_2 = mr^2/2$; $L = 0,2 \text{ м}$; $M_t = 0$.

Графики функций $x_1(t)$, $\dot{x}_1(t)$ и $\ddot{x}_1(t)$ изображены на рисунке 3, а графики $\varphi(t)$, $\dot{\varphi}(t)$ и $\ddot{\varphi}(t)$ – на рисунке 4. Графики моментов $M(t)$ без учета сопротивления и с учетом сопротивления вида $M_* = 0,001 \text{sign}(\dot{\varphi}) + 0,0603\dot{\varphi}$ изображены на рисунке 5. Графики подтверждают достижение состояния абсолютного покоя в конце движения. Как и следовало ожидать, при учете сопротивления кососимметричность в управлении нарушается.

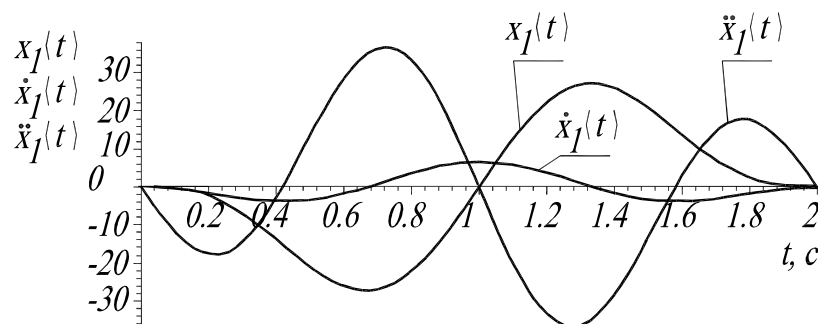


Рисунок 3 – Графики перемещения $x_1(t)$, скорости $\dot{x}_1(t)$ и ускорения $\ddot{x}_1(t)$ в относительном движении

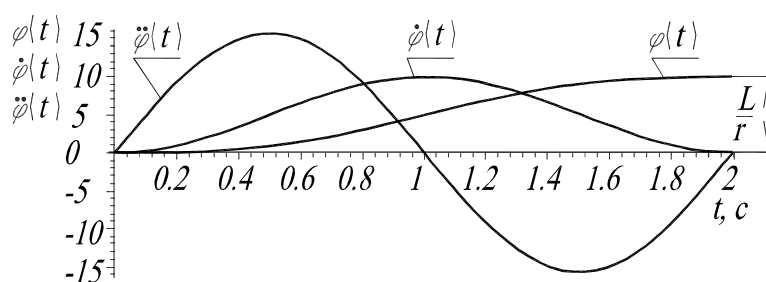


Рисунок 4 – Графики угла поворота $\varphi(t)$, угловой скорости $\dot{\varphi}(t)$ и углового ускорения $\ddot{\varphi}(t)$ в переносном движении

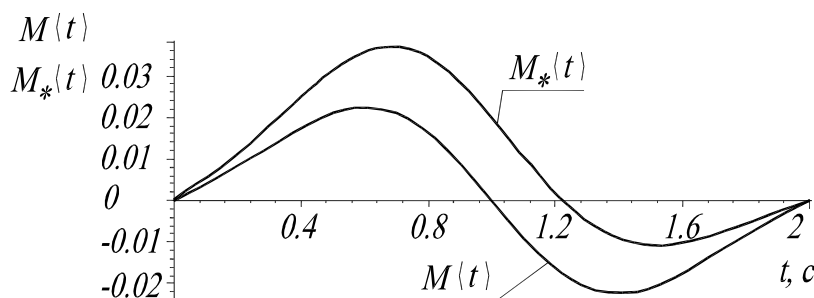


Рисунок 5 – Графики $M(t)$ и $M_*(t)$

Выводы

Найдено управление вращением приводного электродвигателя мехатронного модуля, которое учитывает физические и геометрические параметры модуля и перемещаемой упругодеформируемой системы.

Перспективная тенденция в проектировании приводов мехатронных модулей и исполнительных органов манипуляторов предполагает использование таких законов управления, которые исключают применение специальных демпферов для гашения колебаний в конце движения, при этом снижаются как энергоемкость операций транспортирования, так и стоимость приводов.

В дальнейшем предполагается проведение теоретических и экспериментальных исследований различных электрических и пневматических приводов для практической реализации полученного оптимального управления движением.

Библиографический список

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. Пашков С.В. Промислові мехатронні системи на основі пневмоприводу: навч. посібник / С.В. Пашков, Ю.О. Осінський. — Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2007. — 401 с.

Поступила в редакцию 15.01.2010 г.