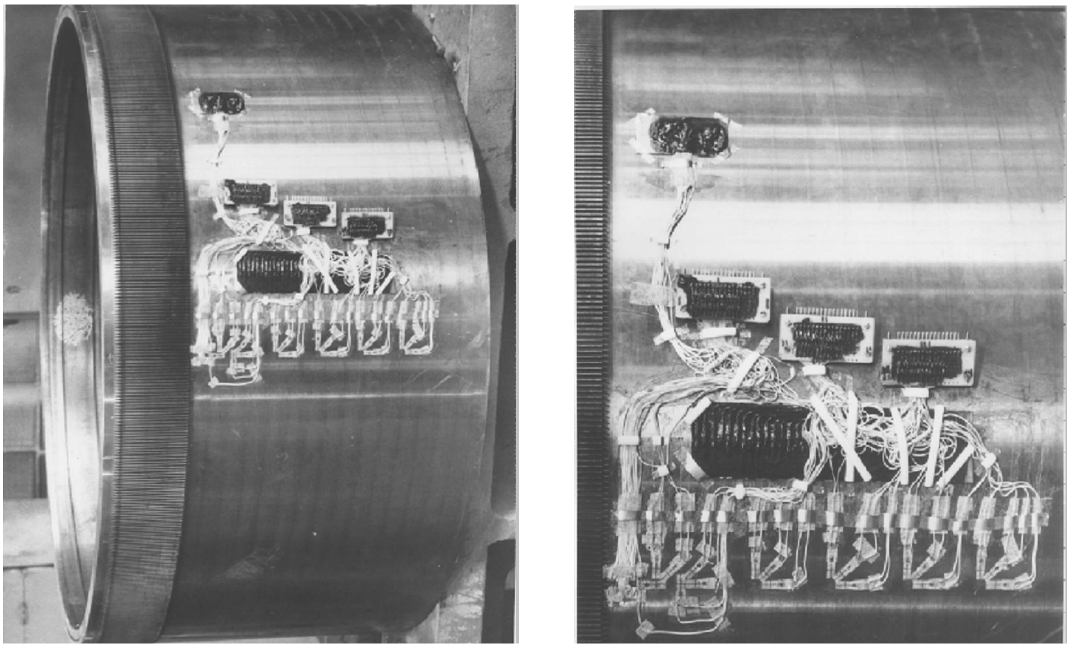

Рис. 6 Гибкое колесо волнового редуктора механизма поворота передвижного миксера МП – 600 АС грузоподъёмностью 600 т расплавленного металла

Список литературы: 1. Цейтлин Н. И., Михеев М. Б. Определение податливости диафрагмы гибкого колеса – стакана волновой зубчатой передачи // Волновые передачи: Сб. тр. – М.: Станкин, 1978. – Вып. 4.- С. 153-165. **2.** Шувалов С.А., Горелов В.Н. Исследование напряжений в гибком зубчатом венце методом конечных элементов // Вестник машиностроения.– 1983.-№1.– С. 10–12. **3.** Гинзбург Е.Г.Волновые зубчатые передачи. – Л.: Машиностроение, 1969.– 160с. **4.** Ковалёв Н. А. Общие основы теории передач гибкими колёсами // Машиноведение. – 1977. - № 5. – С. 59 – 65. **5.** Волков Д. П., Крайнев А. Ф. Волновые зубчатые передачи. – К.: Техника, 1976. – 224 с.

Сдано в редакцию 11.04.06
Рекомендовано д.т.н., проф. Михайлов А.Н.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ОБЪЕКТОВ МАНИПУЛЯТОРАМИ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УЧАСТКЕ

Бохонский А.И., Варминская Н.И. *(СевНТУ. Севастополь, Украина)*

The transportation controls of objects (on the nominated or found trajectories) by the elastic manipulators with final number of degrees of freedom are investigated; these controls eliminate the manipulator fluctuations at the final point of positioning and achieve the given speed of portable movement. The optimum controls of forward and rotary movement of the not rigid manipulator (as systems with the distributed parameters) are found, and fluctuation are absent at the final moment of time. The models of functioning of a robot-based site with moving of objects on the given probable trajectories of movement of the manipulator are developed.

Существующие роботы-манипуляторы при малой массе переносимого полезного груза, как правило, достаточно массивны. Энергетические затраты, необходимые для операций транспортирования объектов жесткими и нежесткими манипуляторами, существенно отличаются.

Манипуляторы малой жесткости обеспечивают снижение металлоемкости и энергозатрат. Необходимы исследования функционирования таких манипуляционных систем, в том числе – оптимального управления манипуляторов на роботизированных технологических участках (РТУ). При транспортировании за минимальное время нежестких деталей больших габаритов возникают не только колебания манипуляторов, но и транспортируемых объектов.

Колебания, возникающие в процессе оптимальных движений манипуляторов конечной жесткости, нуждаются в дополнительных исследованиях. Остаются актуальными многие задачи устранения колебаний в конечной точке позиционирования, обусловленных деформациями исполнительных устройств либо перемещаемых нежестких объектов при оптимальном (в смысле быстродействия) движении. Применение для манипуляторов малой жесткости специальных оптимальных управлений позволяет экономить (≈ на порядок) энергоресурсы без снижения точности позиционирования и производительности [1 – 6].

Задачи исследования: поиск оптимального управления перемещением нежесткого объектов жесткими манипуляторами; управление движением манипуляторов малой жесткости как систем с конечным числом степеней свободы; оптимальное перемещение объекта из возмущенного состояния в конечное состояние абсолютного либо относительного покоя центра масс схвата; поиск управления движением нежестких манипуляторов – с достижением заданной скорости объекта манипулирования и отсутствием колебаний в конечном состоянии; задачи поступательного и вращательного оптимального движения упругих объектов с распределенными массами; разработка моделей оптимизации транспортирования объектов на технологическом участке с манипулятором.

Управление переносным движением упругого объекта в конечное состояние абсолютного покоя использовалось в виде:

$$u_e(t) = \frac{2\pi L}{T^2}\sin^{2n_1-1}(pt), \tag{1}$$

где L – расстояние, на которое перемещается объект; T – время движения; $T = 2\pi / p$; $p = k / n$; n = 2, 3, 4, …; n_1 = 1, 2, 3, 4, …; k – частота собственных колебаний объекта. При $n_1 = 1$ из (1) следует:

$$u_e(t) = Lp^2 \sin pt / 2\pi \,. \tag{2}$$

Из (2) скорость и перемещение:

$$v_e(t) = Lp(1 - \cos pt)/2\pi \,, \qquad s_e(t) = L(pt - \sin pt)/2\pi \,. \tag{3}$$

Для нежестких объектов с сосредоточенными и распределенными массами использовались управления движением, теоретическое обоснование которых дано с привлечением теории моментов.

Найдено такое управление $u_e(t)$ переносным движением упругого объекта из исходного в конечное состояния абсолютного покоя, при котором выполняются моментные соотношения и движение реализуется за минимально возможное время T.

Необходимым и достаточным условием полного подавления колебаний в конечном состоянии переносного движения системы (например, с одной степенью свободы, с переменными состояниями: x_r, $\dot{x}_r$ - управляемые, s_e, $\dot{s}_e$, u_e, где $u_e = \ddot{s}_e$ - управляющие переменные) из положения абсолютного покоя является выполнение моментных соотношений $\left(\int_0^T u_e(t)\cos ktdt = 0, \quad \int_0^T u_e(t)\sin ktdt = 0 \right)$, которые, для оптимального управления переносным движением, например, при $n_1 = 1$ с учетом $p = k/n$, $T = 2\pi/p$ преобразуются к виду:

$$\cos 2n\pi - 1 = 0, \qquad \sin 2n\pi = 0,$$

где n = 2, 3, 4,… Функция $s_e(t)$ является решением уравнения Эйлера $F_{s_e} - \frac{d}{dt}F_{\dot{s}_e} = 0$ для функционала $\int_0^T F(s_e, \dot{s}_e, t)dt$, т.е. уравнения $\frac{d^2 s_e}{dt^2} + p^2 s_e = \frac{Lp^3}{2\pi}t$ для функционала $\int_0^T \left(m\frac{\dot{s}_e^2}{2} - \frac{cs_e^2}{8} + m\frac{Lp^3}{2\pi}ts_e \right)dt$, стационаризуемого в программном движении.

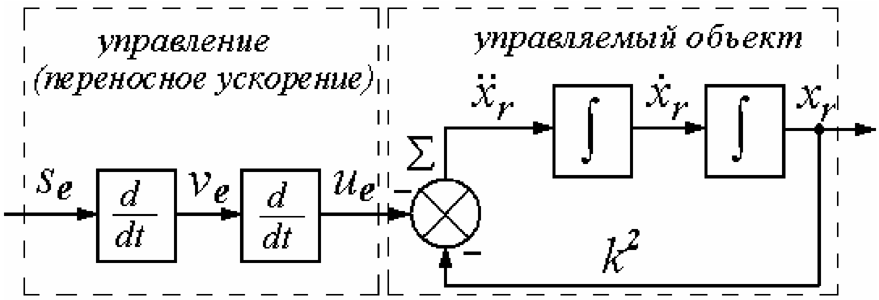

Рис. 1. Структурная схема управления переносным движением объекта

Объект с линейно-вязким сопротивлением (рис. 1) движется как эталонный согласно (3) при управлении вида:

$$u_e^*(t) = Lp\big(6p\sin pt + 4n_*(\cos pt - \cos 2pt)\big)/12\pi,$$

где n_* - коэффициент сопротивления.

Исследовано оптимальное переносное поступательное движение нежесткой руки с распределенной массой с исключением колебаний в конце движения. Если период первого тона собственных изгибных колебаний в целое число раз меньше времени переносного поступательного движения T, то в конечной точке позиционирования нежесткой руки манипулятора наступает абсолютный покой. Колебания наблюдаются только в процессе движения. Поэтому в точке позиционирования исключаются погрешности, обусловленные изгибными колебаниями руки с распределенной массой.

Исследовано поведение рук как упругих систем с конечным числом степеней свободы при оптимальных переносных движениях (управление по ускорению) – с устранением колебаний в конце движения и достижением заданной скорости переносного движения. Управление осуществляется на временном интервале, согласованном с периодом основного тона колебаний перемещаемого упругого объекта. Найдены периоды собственных колебаний руки как упругой системы с конечным числом степеней свободы.

Исследованы колебания телескопической руки с конечным числом степеней свободы при различных законах оптимального поступательного переносного движения. Исследовано управление переносным движением упругих объектов малой жесткости с конечным числом степеней свободы, которое обеспечивает за конечное время достижение заданной скорости объекта и отсутствие колебаний в относительном движении; за время движения колебания нежесткого объекта отсутствуют (динамический коэффициент равен единице).

Найдено управление переносным движением упругого объекта из исходного состояния абсолютного покоя в конечное состояние относительного покоя, при котором движение реализуется за минимально возможное время T и исключаются колебания упругого объекта в процессе его движения.

Это обеспечивается за счет выбора параметров управления: $T = 2\cdot\pi/k$; $u_0 = c\cdot x_{ст}/m$, где c – коэффициент жесткости упругого объекта; m – сосредоточенная масса; $x_{ст}$ – заданная величина статического деформирования.

Для системы с одной степенью свободы на первом временном интервале $T/2 \geq t > 0$ достигается перемещение $x_{ст}$; на втором – при $T/2+T_* \geq t > T/2$ система остается в относительном покое с деформацией $x_{ст}$, а затем при $T_*+T \geq t > T/2+T_*$ она возвращается в исходное недеформированное состояние. Время T соответствует периоду собственных колебаний объекта. Оптимальное переносное ускорение записывается с использованием функции Хевисайда:

$$u_e(t) = u_0\left(\frac{1}{2}Heaviside(t) + \frac{1}{2}Heaviside\left(t - \frac{T}{2}\right)\right) -$$
$$- u_0\left(\frac{1}{2}Heaviside\left(t - \left(\frac{T}{2} + T_*\right)\right) + \frac{1}{2}Heaviside\left(t - \left(T + T_*\right)\right)\right),$$

где T_* – время движения, при котором $u_e(t) = u_0 = const$; u_0 – максимальное значение ускорения.

Для систем с конечным числом степеней свободы колебания в конце движения устраняются по всем модам, если частоты собственных колебаний отличаются в целое число раз. Например, для системы с двумя степенями свободы следует $p_2 = r\cdot p_1$, где p_1, p_2 – соответственно частоты первого и второго тона колебаний; r – целое число.

Исследована возможность использования суперпозиции управлений на конечном временном интервале при движении нежесткой руки – оптимального переносного движения в конечное состояние абсолютного или относительного покоя с подавлением колебаний, обусловленных не нулевыми начальными условиями.

Найдена такая суперпозиция управлений переносным движением упругого объекта, которые за минимальное время обеспечивают подавление свободных колебаний объекта, обусловленных начальным возмущением, и достижение состояния абсолютного либо относительного покоя в конце переносного движения.

Общее управление: $u^*(t) = u_e(t) + u(t)$. В относительном движении (колебания) перемещение и скорость: $x^*(t) = x_r(t) + x(t)$, $v^*(t) = v_r(t) + v(t)$.

Колебания объекта, обусловленные не нулевыми начальными условиями, подавляются резонансным управлением (например, за один период колебаний), и за общее время движения достигается конечное положение абсолютного покоя.

Рассмотрен характерный случай перемещения объекта на РТУ.

Необходимо найти управления – функции $U_1(t)$, $U_2(t)$, закон движения объекта в полярной системе координат – функции r(t), φ(t), доставляющие экстремум (min) функционалу J при известных уравнениях движения и краевых условиях, которые на правом конце обеспечивают попадание объекта на прямую (транспортер) с заданным модулем и направлением скорости движущегося объекта.

Задача управления перемещением объекта в полярной системе координат с фиксированной точки на транспортер, лента которого движется с постоянной скоростью, решена в данном случае методом Ритца. Исходные данные: уравнения движения объекта, критерий оптимальности, краевые условия и время движения; движение осуществляется по назначенным (предписанным) траекториям.

В сборочном и машиностроительном производствах наиболее часто встречаются технологические участки, состоящие из многопозиционного поворотного стола, двух или более манипуляторов, нескольких загрузочных устройств и отводящего конвейера. Исследовано оптимальное перемещение объектов по заданным траекториям движения. Управление найдено с использованием общего алгоритма решения обратной задачи динамики, когда на основании известных геометрических свойств движения находятся причины, его вызвавшие: задается траектория и движение по траектории, а находятся – силовые управляющие воздействия. В зависимости от вида оптимального управления (переносного ускорения) достигается как нулевая, так и заданная скорость центра масс схвата манипулятора в конце движения.

Исследовано оптимальное перемещение груза по траектории в виде окружности, заданной в декартовой системе координат; найдены усилия в приводах и зависимости площадей дроссельных отверстий от времени. Рассмотренные типы траекторий охватывают характерные случаи структурно - компоновочных схем расположения оборудования в РТУ.

Задачи перемещения объектов в соответствии с рассмотренной иерархией поиска управлений решены в три этапа: поиск управлений, прикладываемых к перемещаемому объект; расчет усилий в пневмоприводах, обеспечивающих оптимальное движение руки; определение законов изменения во времени площадей дроссельных отверстий пневмоприводов при оптимальном транспортировании груза.

Выводы.

1. На основании теории оптимального управления колебаниями деформируемых систем (метода моментов) обоснован выбор управления переносным движением упругих систем из начального в конечное состояния абсолютного покоя и показано, что управление системами с линейно-вязким сопротивлением осуществимо по эталонной системе (без сопротивления).

2. Впервые предложено оптимальное управление переносным движением упругих объектов (манипуляторов – в том числе) с динамическим коэффициентом, равным единице; в результате выбора параметров управления движением объектов с сосредоточенными и распределенными массами достигается требуемая скорость центра масс схвата и исключаются колебания манипулятора.

3. Установлено, что применение предложенных оптимальных управлений позволяет использовать манипуляторы конечной жесткости для транспортирования жестких и нежестких объектов с устранением колебаний схвата в точке позиционирования или достижением заданной скорости в конце движения (без потери производительности, обеспечиваемой жесткими манипуляторами). Анализ энергозатрат на выполнение рабочих операций манипуляторами показывает, что нежесткие манипуляторы менее энергоемкие.

Показано, что стабилизация жесткости телескопической руки при совмещении оптимального поступательного движения руки с ее выдвижением возможна путем вращения элементов поперечного сечения руки вокруг продольной оси.

4. Решены новые обратные задачи динамики, характерные при оптимизации транспортирования объектов на РТУ. С использованием систем компьютерной алгебры созданы математические модели для расчета параметров оптимальных управлений манипуляторами и усилий в пневмоприводах при перемещении объектов, которые могут найти применение при обосновании геометрической конфигурации технологических участков с назначением траекторий движения объектов.

5. Рассмотренные оптимальные по быстродействию управления перемещением исполнительных устройств конечной жесткости с известными собственными частотами, предполагающие непосредственное устранение колебаний в конце движения (без специальных гасителей), могут найти эффективное применение для оптимального транспортирования упругих объектов во многих областях современной техники.

Решены характерные задачи оптимизации транспортирования объектов на РТУ. Разработаны модели функционирования типового технологического участка, на основании которых находятся оптимальные управления как усилия в приводах. При проектировании РТУ их структурно-компоно-вочные схемы расположения оборудования необходимо согласовывать с траекториями движения объектов.

Список литературы: **1**. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Некоторые актуальные задачи механики манипуляторов минимальной массы // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Вып. 25: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2003. – С. 34 – 38. **2**. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Оптимальное управление перемещением груза телескопическим манипулятором с пневмоприводом // Вестн. СевГТУ. Сер. Автоматизация процессов и управление. – Севастополь, 2004. – Вып. 57. – С. 125 – 131. **3**.Бохонский А.И., Варминская Н.И. Моделирование захвата груза с транспортера телескопическим манипулятором с пневмоприводом // Оптимизация производственных процессов. Вып. 7: Сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2004. – С. 17 – 23. **4**. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Управление объектом при перемещении с одной траектории на другую // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Вып. 27: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2004. – С. 36 – 42. **5**. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Оптимальные движения нежесткой руки манипулятора // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Вып. 28: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2004. – С.13 – 17. **6**. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Некоторые задачи механики при проектировании манипуляторов минимальной массы // Сборка в машиностроении, приборостроении. Вып. 1.– Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2004.– С.27 – 30.

Сдано в редакцию 18.04.06
Рекомендовано д.т.н., проф. Михайлов А.Н.