

УДК 628.543.52

А.И. Бохонский, Н.И. Варминская

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАХВАТА ГРУЗА С ТРАНСПОРТЕРА ТЕЛЕ- СКОПИЧЕСКИМ МАНИПУЛЯТОРОМ С ПНЕВМОПРИВОДОМ

Решены задачи оптимального управления дросселированием пневмоприводов руки телескопического манипулятора при выполнении рабочих операций захвата груза с транспортера, лента которого движется с постоянной скоростью.

В [1] дано решение задач оптимизации рабочих операций транспортирования груза телескопическим манипулятором, и найденные управления предложено реализовывать пневматическими приводами с дросселированием. В [2] найдено приближенное решение задачи оптимального перемещения груза в горизонтальной плоскости с фиксированной точки на транспортер, который произвольно расположен в плоскости. Возможность практической реализации управлений в этой работе не рассматривалась.

В [3] показано, что для реализации оптимального закона нагружения упругой системы (с равным единице динамическим коэффициентом) также применимы пневмоприводы с управляемым дросселированием.

В [4] приведены наиболее характерные структурно-компоновочные схемы многопозиционных гибких технологических ячеек сборки (ГТЯС, в том числе – на базе линейного транспортера и манипулятора), для которых продолжают оставаться актуальными задачи оптимизации рабочих операций. Отметим также, что в настоящее время возрос интерес к задачам механики управляемого движения манипуляторов. Теоретический и практический интерес представляет разработка и совершенствование алгоритмов оптимального перемещения грузов манипуляторами с пневмоприводами, что является целью исследований. Построение алгоритмов управления иллюстрируется на характерных примерах.

1. Оптимальное движение по прямой материальной точки единичной массы без учета сопротивления движению описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2x}{dt^2} = u(t), \quad (1)$$

где $u(t)$ – управление на единицу массы. Если критерием оптимальности

является минимум энергетических затрат $J = \int_{t_0}^{t_1} u^2(t) dt = \min$ или с учетом

$$(1) \quad J = \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right)^2 dt = \min, \text{ то, как известно, из решения уравнения Эйлера}$$

– Лагранжа $\left(\frac{d^4 x}{dt^4} = 0 \right)$ следуют зависимости:

$$x(t) = \frac{c_1}{6} t^3 + \frac{c_2}{2} t^2 + c_3 t + c_4, \quad v(t) = \frac{c_1}{2} t^2 + c_2 t + c_3, \quad u(t) = c_1 t + c_2. \quad (2)$$

Произвольные постоянные в (2) определяются из граничных условий:

$$x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0; \quad x(t_1) = l_0 + Vt_1, \quad \dot{x}(t_1) = V. \quad (3)$$

Условия (3) учитывают на правом конце, что груз уже прошел некоторое расстояние l_0 к моменту начала движения схвата руки и продолжает двигаться с постоянной скоростью V (рисунок 1).

С учетом краевых условий (3), в результате решения системы линейных алгебраических уравнений получены выражения для перемещения, скорости и ускорения центра масс схвата вдоль транспортера (в сторону движения груза):

$$x(t) = \frac{(3l_0 + 2Vt_1)t^2}{t_1^2} - \frac{(2l_0 + Vt_1)t^3}{t_1^3}, \quad v(t) = 2 \frac{(3l_0 + 2Vt_1)t}{t_1^2} - 3 \frac{(2l_0 + Vt_1)t^2}{t_1^3},$$

$$u(t) = 2 \frac{(3l_0 + 2Vt_1)}{t_1^2} - 6 \frac{(2l_0 + Vt_1)t}{t_1^3}.$$

Компоненты управлений (в радиальном и трансверсальном направлениях) для телескопической руки записываются следующим образом:

$$u_1(t) = u(t) \sin \varphi, \quad u_2(t) = u(t) \cos \varphi.$$

Из рисунка 1 следует, что для полярной системы координат, в которой работает телескопическая рука, справедливы зависимости

$$r(t) = \sqrt{h^2 + (x(t))^2},$$

$$\varphi(t) = \arctg(x(t)/h),$$

где h – кратчайшее расстояние от оси вращения манипулятора до ленты транспортера.

Для определения усилий в пневмоприводах телескопического манипулятора воспользуемся дифференциальными уравнениями поступательного движения эле-

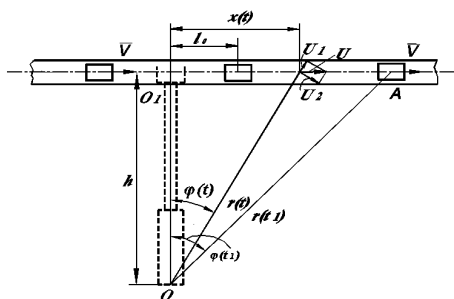


Рисунок 1 – Операция захвата груза с ленты транспортера при движении схвата из точки O_1 в точку A (груз движется с постоянной скоростью $V = \text{const}$)

ментов телескопической руки в радиальном направлении и вращения руки, которые с учетом линейно-вязкого сопротивления движению записываются как

$$F(t) = m \frac{d^2 r}{dt^2} + k_1 \frac{dr}{dt}, \quad M_*(t) = J(t) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + k_2 \frac{d\varphi}{dt}, \quad (4)$$

где m – масса поступательно движущихся частей руки вместе с перемещаемым полезным грузом; $J(t)$ – физический момент инерции руки относительно оси вращения, который в общем случае зависит от времени (например, $J(t) = m_c r^2(t) + \frac{1}{3} m_* r^2(t)$, где m_c – масса груза, m_* – распределенная по длине масса руки); k_1, k_2 – коэффициенты линейно-вязкого сопротивления при поступательном и вращательном движениях телескопической руки.

Для получения выражений $F(t)$ и $M_*(t)$ достаточно в правой части уравнений (4) подставить полученные ранее аналитические зависимости $r(t)$ и $\varphi(t)$.

Законы изменения площадей дроссельных отверстий в пневмоприводах находятся при известных допущениях [3]. В произвольный момент масса воздуха в рабочей полости пневмопривода поступательного перемещения руки в радиальном направлении вычисляется следующим образом:

$$M(t) = \frac{F(t)(r_0 + r(t))}{RT}. \quad (5)$$

Здесь r_0 – координата, определяющая длину полости предварительно-го наполнения; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура воздуха. Аналогично моделям работы [3] зависимость массового расхода от давления при наполнении камеры из магистрали может быть представлена формулой

$$\frac{dM}{dt} = 0,0015 d^2 p_m \sqrt{1 - p_1 / p_m}, \quad (6)$$

где d – диаметр условного прохода распределителя (дроссельного отверстия); p_m – давление в магистрали; $p_1 = F(t)/S$, где S – площадь поршня.

Тогда из (5) следует выражение для производной:

$$\frac{dM(t)}{dt} = \frac{1}{RT} \left(\frac{dF(t)}{dt} (r_0 + r(t)) + F(t) \frac{dr}{dt} \right). \quad (7)$$

Из (6) и (7) после преобразований (с учетом $\delta_s = \pi d^2/4$) получена формула для площади дроссельного отверстия, как функции времени:

$$\delta_s(t) = \frac{\pi (\dot{F}(r_0 + r(t)) + F\dot{r}(t))}{4 \cdot 0,0015 p_m \sqrt{1 - p_1 / p_m} RT}.$$

Численный пример. Исходные данные: $V=1$ м/с, $L_0=1$ м, $h=1$ м, $m_z=3$ кг, $k_1=1$ кг/с, $k_2=3$ Н/м, $L=3$ м, $m^*=30$ кг. Граничные условия: $x(0)=0$, $\dot{x}(0)=0$, $x(t_1)=l_0+V \cdot t_1$, $\dot{x}(t_1)=V$. Графики компонентов управлений $U_1(t)$, $U_2(t)$ и полного управления $U(t)$, полярных координат $r(t)$ и $\varphi(t)$, изменения положения груза на транспортере $x(t)$ и площади дроссельного отверстия $\delta_s(t)$ изображены на рисунке 2.

2. Движение руки телескопического манипулятора из начального положения (точка O_1), определяемого начальными координатами r_0 , φ_0 (рисунок 3).

Как и ранее, при задании

$$x(t) = \frac{c_1}{6}t^3 + \frac{c_2}{2}t^2 + c_3t + c_4, \quad \dot{x}(t) = \frac{c_1}{2}t^2 + c_2t + c_3$$

и краевых условий: при $t=0$ $x(0)=0$, $\dot{x}(0)=0$, а при $t=t_1$ $x(t_1)=l$, $\dot{x}(t_1)=V_1$ после определения производных постоянных выражения для перемещения, скорости и ускорения записываются в виде:

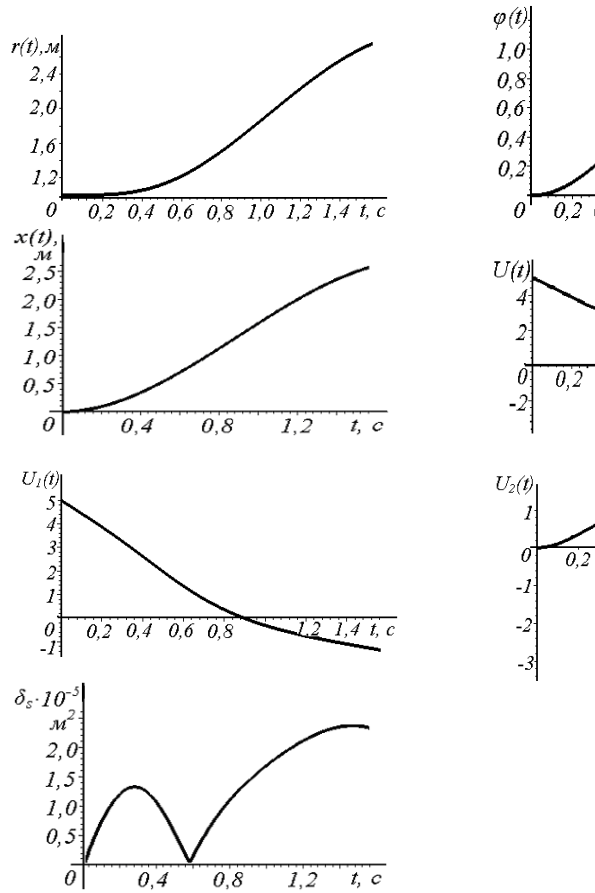


Рисунок 2 – Графики управлений $U(t)$, $U_1(t)$, $U_2(t)$ как функций времени; полярных координат $r(t)$, $\varphi(t)$; изменения положения

$$\begin{aligned}
 x(t) &= -\frac{(-t_1 V + 2 \sin \beta \cdot L) t^3}{t_1^3 \sin \beta} + \frac{(-t_1 V + 3 \sin \beta \cdot L) t^2}{t_1^2 \sin \beta}, \\
 V(t) &= -3 \frac{(-t_1 V + 2 \sin \beta \cdot L) t^2}{t_1^3 \sin \beta} + 2 \frac{(-t_1 V + 3 \sin \beta \cdot L) t}{t_1^2 \sin \beta}, \\
 u(t) &= -6 \frac{(-t_1 V + 2 \sin \beta \cdot L) t}{t_1^3 \sin \beta} + 2 \frac{(-t_1 V + 3 \sin \beta \cdot L)}{t_1^2 \sin \beta}.
 \end{aligned}$$

Компоненты управления в данном случае записываются следующим образом (рисунок 3):

$$u_1(t) = u(t)\cos(\beta - \varphi), \quad u_2(t) = u(t)\sin(\beta - \varphi).$$

На основании теорем косинусов и синусов получены зависимости

$$r(t)^2 = r_0^2 + x(t)^2 + 2r_0x(t)\cos\beta, \quad \varphi = \arcsin\left(\frac{x(t)\sin\beta}{r(t)}\right), \quad L = \frac{(h - r_0)}{\cos\beta},$$

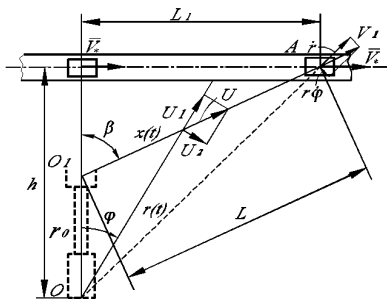


Рисунок 3 – Схема операции захвата груза на транспортере (при движении схвата по заданной траектории из точки O_1 в точку A)

где r_0 – координата, определяющая начальное положение руки манипулятора; h – кратчайшее расстояние от оси вращения манипулятора до ленты транспортера; L – полное перемещение, которое необходимо совершить руке манипулятора для захвата груза.

Скорость движения руки манипулятора в конечный момент времени t_1 находится как:

$$V_1 = \frac{V^*}{\sin\beta},$$

где V^* – скорость движения ленты транспортера (или груза); V_1 – скорость движения руки манипулятора.

При этом путь, пройденный грузом с момента начала движения схвата, равен:

$$L_1 = L\sin\beta = V^*t_1.$$

Пример. Исходные данные: $h = 1,0$ м, $r_0 = 0,5$ м, $V = 0,8$ м/с, $N = 5$ м²/с. Путь, пройденный центром масс схвата, равен:

$L = \sqrt{(V^*t_1)^2 + (h - r_0)^2}$. Время движения схвата до встречи с транспортером вычисляется из уравнения:

$$N = \int_0^{t_1} U^2(t)dt,$$

т.е. $t_1 = 0,951$ с, $\beta = (h - r_0)/L = 0,9893$ рад, $L = (h - r_0)/\cos\beta = 0,9104$ м.

Следует отметить, что в условиях серийного сборочного производства часто используются различные схемы захвата грузов, когда движение руки манипулятора начинается с произвольной точки на плоскости или в пространстве, определяемой начальными координатами.

Для многих характерных структурно-компоновочных схем многопозиционных ГТЯС, в которых используются линейные транспортеры и телекопические загрузочные манипуляторы, оптимизация операции транспортирования деталей может осуществляться при использовании предлагаемых простых алгоритмов оптимального управления.

Предложенный подход может быть использован для решения задач захвата груза с транспортера, расположенного произвольным образом в пространстве, а также параметров дросселирования; при этом лента транспортера может двигаться как с постоянной, так и переменной скоростями. Конкретная привязка предлагаемых алгоритмов к реальному оборудованию является направлением дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Бохонский А.И. Расчет и проектирование телескопических исполнительных органов манипуляторов: Учеб. пособие / А.И. Бохонский, Г.Г. Макухина, Ю.А. Хашин. — К.: УМК ВО УССР, 1989. — 132 с.
2. Бохонский А.И. Управление движением манипулятора / А.И. Бохонский // Вестн. СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экологи: Сб. науч. тр. — Севастополь, 1996. — Вып. 3. — С. 50–54.
3. Бохонский А.И. Реализация оптимальных нагружений упругой системы с помощью пневмопривода / А.И. Бохонский, Е.В. Исаева // Вестн. СевГТУ: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2002. — Вып. 5. — С. 175–179.
4. Пашков Е.В. Транспортно-накопительные и загрузочные системы в сборочном производстве: Учеб. пособие / Е.В.Пашков, В.Я.Копп, А.Г.Карлов. — К.: УМК ВО УССР, 1992. — 536 с.

Поступила в редакцию 22.10.2003 г.