

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 519.71

© 2004 г. Крутько П.Д., Кузьмин Д.В.

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МАНИПУЛЯТОРА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПОГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Синтезированы алгоритмы управления унифицированной структуры, реализующие заданные динамические характеристики. Структура алгоритмов синтезируется методом обратных задач динамики по отдельным моделям изолированных движений по каждой степени свободы. Теоретические выводы иллюстрируются результатами математического моделирования.

Задачи управления движением сложных механических систем рассматриваются в многочисленных публикациях отечественных и зарубежных авторов. В методическом отношении почти все работы этого направления используют традиционные методы синтеза, основанные на линеаризации исходных нелинейных уравнений динамики. Практическое применение алгоритмов управления традиционной структуры связано с необходимостью использования специальных средств стабилизации динамических характеристик – идентификации и настройки параметров.

В последние два десятилетия получены важные теоретические результаты, которые позволяют синтезировать алгоритмы управления нетрадиционной структуры. Системы с такими алгоритмами обладают естественными свойствами адаптивности по отношению к изменению параметров управляемых объектов и возмущающим силам. Такие структуры алгоритмов синтезируются методом обратных задач динамики в сочетании с минимизацией локальных функционалов, характеризующих мгновенные значения энергии движения в окрестности фазовых траекторий эталонных моделей, с помощью которых назначаются динамические характеристики проектируемой системы. При этом процедура синтеза выполняется непосредственно по нелинейным уравнениям динамики. В работах [1, 2] показано, что синтез можно выполнять по отдельным моделям изолированных движений управляемой системы. Полученные таким путем алгоритмы обеспечивают децентрализованное управление. Организация координированного управления осуществляется в результате агрегирования отдельных алгоритмов. В настоящей статье эти вопросы рассмотрены применительно к задаче управления погрузочным манипулятором.

Уравнения движения манипулятора. Постановка задачи. Рассмотрим задачи управления движением манипулятора, кинематическая схема которого показана на рис. 1. Рука 3 выдвигается в горизонтальном направлении. Ее поворот в горизонтальной плоскости обеспечивается узлом поворота 2, вертикальное перемещение – узлом подъема 1. Такую кинематическую схему имеет исполнительный механизм робота-манипу-

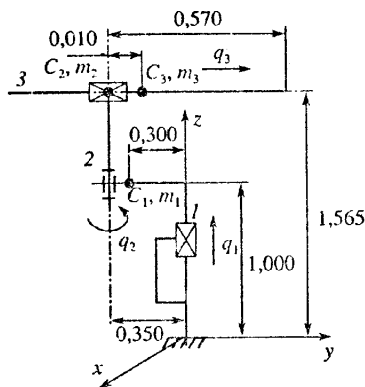


Рис. 1

лятора "МНУ Senior", предназначенного для выполнения погрузочных операций. Робот имеет три степени свободы – вертикальное перемещение q_1 , угол поворота q_2 и горизонтальное перемещение q_3 . Для удобства выполнения расчетов геометрические размеры механизма на кинематической схеме заданы в метрах.

Массы звеньев обозначим m_1 , m_2 и m_3 . Будем считать, что они сосредоточены в точках C_1 , C_2 и C_3 соответственно. Принимаем, что силы и моменты сил трения в кинематических парах пренебрежимо малы.

Движение манипулятора описывается уравнениями Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right] - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = P_j, \quad (1)$$

где P_j – обобщенные управляющие силы, создаваемые приводами в кинематических парах;

$$T(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 m_i \dot{r}_i^2, \quad \Pi(q) = \sum_{i=1}^3 m_i g r_i \quad (2)$$

кинетическая и потенциальная энергии; r_i – радиус-векторы положения масс в системе координат $Oxuz$. Согласно рис. 1 имеем

$$r_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,300 \\ 1,000 + q_1 \end{bmatrix}, \quad r_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,350 \\ 1,565 + q_1 \end{bmatrix}, \quad r_3 = \begin{bmatrix} -Sq_2(0,010 + q_3) \\ -0,350 + Cq_2(0,010 + q_3) \\ 1,565 + q_1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Здесь и далее $Sq_2 \equiv \sin q_2$, $Cq_2 \equiv \cos q_2$. Дифференцируя (3) по времени и возводя в квадрат полученные векторы скоростей, имеем

$$\dot{r}_1^2 = \dot{r}_2^2 = \dot{q}_1^2, \quad \dot{r}_3^2 = \dot{q}_1^2 + \dot{q}_3^2 + (0,010 + q_3)^2 \dot{q}_2^2. \quad (4)$$

Потенциальная энергия манипулятора, согласно (2), равна $\Pi(q) = \sum_{i=1}^3 \Pi_i(q) = -m_1 g(1,000 + q_1) - (m_2 + m_3)g(1,565 + q_1)$. С учетом (4) находим выражение для кинетической энергии $T(q, \dot{q})$ и после выполнения операций, указанных в (1), запишем уравнения Лагранжа в векторной форме

$$A(q)\dot{q}(t) + B(q, \dot{q})\dot{q}(t) + C(q) = P, \quad (5)$$

где $P = [P_1 \ P_2 \ P_3]^T$, $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$, $C(q) = [(m_1 + m_2 + m_3)g \ 0 \ 0]^T$ – векторы, а

$$A(q) = [a_{sv}(q)] = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & 0 \\ 0 & (0,010 + q_3)^2 m_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$B(q, \dot{q}) = [b_{sv}(q, \dot{q})] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2(0,010 + q_3)m_3\dot{q}_3 & 0 \\ 0 & -(0,010 + q_3)m_3\dot{q}_2 & 0 \end{bmatrix}$$

– матрицы.

Задачу управления формулируем следующим образом. В начальный момент времени $t = 0$ состояние управляемого манипулятора характеризуется значениями

$$q_s^{(\mu)}(0) = q_{s0}^{(\mu)}, \quad s = 1, 2, 3, \quad \mu = 0, 1. \quad (7)$$

Требуется найти обобщенные управляющие силы, которые переводят манипулятор из состояния (7) в стационарное состояние равновесия

$$q_s = \bar{q}_s, \quad \dot{q}_s = 0, \quad s = 1, 2, 3. \quad (8)$$

При этом необходимо, чтобы динамика манипулятора по каждой степени свободы была практически идентична динамике соответствующих эталонных моделей, процессы в которых определяются уравнениями

$$\ddot{q}_s^*(t) = \sum_{\mu=0}^2 \gamma_{s\mu} \frac{d^\mu q_s^*(t)}{dt^\mu} = r_{s1} \dot{q}_{sb} + r_{s0} q_{sb}, \quad q_{sb} = \bar{q}_s = \text{const}, \quad s = 1, 2, 3. \quad (9)$$

Коэффициенты уравнений (9) такие постоянные числа, что $\gamma_{s1}\gamma_{s2} > \gamma_{s0}$, $r_{sj} = \gamma_{sj}$, $s = 1, 2, 3$, $j = 0, 1$. Отсюда следует, что эталонные модели асимптотически устойчивы, поэтому процессы $q_s^*(t) \rightarrow \bar{q}_s$, что и требуется по постановке задачи. Далее порядок астатизма моделей может быть первым или вторым, что обеспечивается равенством соответствующих коэффициентов.

Определение обобщенных управляющих сил. Для решения задачи управления по отдельным моделям необходимо выполнить следующее.

1. Из полных уравнений динамики управляемой системы выделить отдельные модели, описывающие ее движение по изолированным степеням свободы.
2. Для каждой отдельной модели (независимой подсистемы) сформулировать задачу управления в строгом соответствии с общей формулировкой задачи для управляемой системы.

3. Найти обобщенные управляющие силы (синтезировать алгоритм управления) для каждой подсистемы, рассчитать ориентировочные значения коэффициентов усиления в контурах управляющих функций (обобщенных сил) и выполнить математическое моделирование процессов управления в отдельных подсистемах. Исследование динамики выполнить во всем диапазоне изменения параметров отдельных моделей при наличии возмущающих сил (моментов). По результатам математического моделирования уточнить расчетные значения параметров алгоритмов управления.

Синтезированные алгоритмы управления изолированными подсистемами можно принять в качестве алгоритмов децентрализованного (независимого по степеням свободы) управления движением исходной системы.

4. По взаимосвязанным уравнениям выполнить математическое моделирование процессов управления исходной системой. По результатам моделирования оценить степень взаимного влияния между каналами управления и при необходимости установить такой уровень усиления в каждой подсистеме, при котором взаимное влияние будет в допустимых пределах.

5. Для организации координированного (согласованного по степеням свободы) управления движением системы необходимо агрегировать синтезированные алгоритмы автономного управления. Если, например, обобщенные управляющие силы $P_s = P_s(q_s, \dot{q}_s)$, $s = 1, 2, 3$ найдены для отдельных подсистем, то управляющие силы координированного управления следует определить в виде линейной комбинации P_s

$$P_s^*(q, \dot{q}) = \sum_{v=1}^3 \rho_{sv} P_v(q_v, \dot{q}_v), \quad s = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Коэффициенты ρ_{sv} являются элементами положительно определенной матрицы $\rho = [\rho_{sv}]$. Числовые значения ρ_{sv} назначаются такими, чтобы динамические характеристики системы по каждой степени свободы отвечали требованиям задания на проектирование.

Обобщенные управляющие силы в рассматриваемой задаче будем определять по отдельным моделям

$$a_{ss}(q_s)\ddot{q}_s(t) = P_s + \Psi_s(q, \dot{q}), \quad s = 1, 2, 3, \quad (11)$$

где функции Ψ_s характеризуют взаимное динамическое влияние между степенями свободы (кроме звена 1) и выступают в роли возмущений. Согласно (5), (6) имеем

$$\Psi_1 = -(m_1 + m_2 + m_3)g, \quad \Psi_2 = -2(0,010 + q_3)m_3\dot{q}_2\dot{q}_3, \quad \Psi_3 = (0,010 + q_3)m^3\dot{q}_2^2.$$

В соответствии с общей постановкой задачи искомые управляющие силы должны перевести каждую подсистему (11) из начального состояния (7) в стационарное состояние равновесия (8). При этом управляемые процессы $q_s(t) \rightarrow \bar{q}_s$ должны проходить в малой окрестности эталонных процессов $q_s^*(t) \rightarrow \bar{q}_s$, определяемых уравнениями (9) при соответствующих начальных условиях.

Степень приближения этих процессов будем оценивать величиной функционалов

$$G_s(P_s) = \frac{a_{ss}}{2}[\dot{q}_s^* - \dot{q}_s(P_s)]^2, \quad s = 1, 2, 3, \quad (12)$$

которые численно равны энергии ускорения в их относительном движении. В соответствии с общей теорией обратных задач динамики [1, 2] обобщенные силы в процессе движения объектов должны удерживать значения функционалов в малой окрестности экстремумов-минимумов. Следуя [1, 2], минимизацию функционалов организуем по градиентной схеме первого порядка, определив дифференциальные законы управления в виде

$$dP_s/dt = -k_s(dG_s(P_s)/dP_s), \quad k_s = \text{const}, \quad s = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Согласно (11), ускорения

$$\ddot{q}_s(P_s) = a_{ss}^{-1}(P_s + \Psi_s). \quad (14)$$

Дифференцируя (12) с учетом (14), найдем составляющие градиента функционалов

$$dG_s(P_s)/dP_s = -(\dot{q}_s^* - \dot{q}_s). \quad (15)$$

Из (13) и (15) следуют законы управления в дифференциальной форме

$$\dot{P}_s = k_s(\dot{q}_s^* - \dot{q}_s), \quad s = 1, 2, 3. \quad (16)$$

Переменные \dot{q}_s^* характеризуют движение эталонных моделей и выступают в роли требуемых значений ускорений для каждой управляемой подсистемы. Расчетные формулы для вычисления \dot{q}_s^* следует вывести из уравнений эталонных моделей (9) с учетом текущего состояния управляемого манипулятора по каждой степени свободы. Для этого необходимо проинтегрировать по времени обе части (9). Затем выполнить замену $q_s^*(t) = q_s(t)$, $\dot{q}_s^*(t) = \dot{q}_s(t)$, как этого требуют концепции обратных задач динамики. Принимая равными нулю начальные значения переменных, после выполнения указанных преобразований получим

$$\dot{q}_s^* = \gamma_{s0} \int_0^t (\bar{q}_s - q_s) dt + r_{s1}\bar{q}_s - \gamma_{s1}q_s - \gamma_{s2}\dot{q}_s, \quad r_{s0} = \gamma_{s0}, \quad s = 1, 2, 3. \quad (17)$$

ных числовых значениях k_s . В [3] показано, что для рассматриваемых моделей движения такие значения всегда существуют.

С помощью алгоритмов (18) осуществляется децентрализованное управление. При этом возможно реализовать сколь угодно высокую (теоретическую) точность приближения процессов $q_s(t) \rightarrow \bar{q}_s$ к эталонным, так как структура моделей движения допускает неограниченное повышение уровней усиления при сохранении устойчивости. В силу этого справедливы предельные равенства

$$\lim_{k_s \rightarrow \infty} [q_s(t, k_s)] = q_s^*(t), \quad s = 1, 2, 3. \quad (19)$$

Это означает, что в асимптотике при одновременном, неограниченном повышении уровня усиления в каждом канале нелинейные взаимосвязанные уравнения распадаются на два независимых линейных уравнения, идентичных уравнениям эталонных моделей.

Для организации координированного управления алгоритмы (18) необходимо агрегировать. Пусть постоянные числа ρ_{sv} в своей совокупности составляют положительно определенную матрицу размерностью $n \times n$. Тогда, согласно (10), координирующие

управляющие силы будут $P_s^* = \sum_{v=1}^n \rho_{sv}(\dot{q}_v^* - \dot{q}_v)$, $s = 1, 2, \dots, n$. При этом требуемые

значения \dot{q}_v^* вычисляются по формулам, аналогичным (18).

Расчет коэффициентов усиления ρ_{sv} можно выполнить путем параметрической оптимизации контуров управления по интегральным показателям $J(k_s) =$

$$= \int_0^T [q_s^*(t) - q_s(t, k_s)]^2 dt, \text{ характеризующим отклонение управляемых процессов от эталонных.}$$

Так как выполняются асимптотические равенства (19), то процедуру параметрической оптимизации можно построить следующим образом. Сначала нужно определить коэффициенты k_s , исследуя динамику независимых подсистем с децентрализованным управлением, как это изложено в общей схеме синтеза алгоритмов управления по отдельным моделям. Найденные значения k_s следует принять в качестве диагональных элементов ρ_{ss} агрегирующей матрицы при организации процесса оптимизации по критерию минимума $J(k_s)$.

Результаты математического моделирования процессов управления. Исследование динамики выполнено при следующих условиях. Привод манипулятора электрический, динамика привода не учитывается. Геометрические размеры звеньев указаны на рис. 1, а числовые значения массы звена 3 приняты $m_3 = 5, \dots, 15$ кг. Величина m_3 включает массу груза, $m_r = 0, \dots, 10$ кг. Значение координаты вертикального хода q_1 фиксировано. При математическом моделировании исследовались: перемещение манипулятора из начального состояния $q_2(0) = 0$ рад, $q_3(0) = 0,25$ м в назначенное состояние $\bar{q}_2 = \pi/6$ рад, $\bar{q}_3 = 0,55$ м с максимальным грузом $m_r = 10$ кг в схвате; возврат манипулятора, освобожденного от груза, из состояния $q_2(0) = \pi/6$ град, $q_3(0) = 0,3$ м в состояние $\bar{q}_s = 0$, $s = 2, 3$ (рис. 1). Параметры алгоритма управления (18) определяются следующими требованиями к динамике системы: порядок астатизма – первый, длительность переходного процесса $t_n = 0,7$ с, перерегулирование $\sigma = 0\%$. Этим требованиям удовлетворяет эталонная модель с передаточной функцией в разомкнутом состоянии $W_M(p) = k_{ск}^M (T_3 p + 1) / p (T_1 p + 1) (T_2 p + 1)$, $T_1 = 2$ с, $T_2 = 0,02$ с, $T_3 = 0,3$ с, $k_{ск}^M = 80$ с⁻¹. Передаточ-

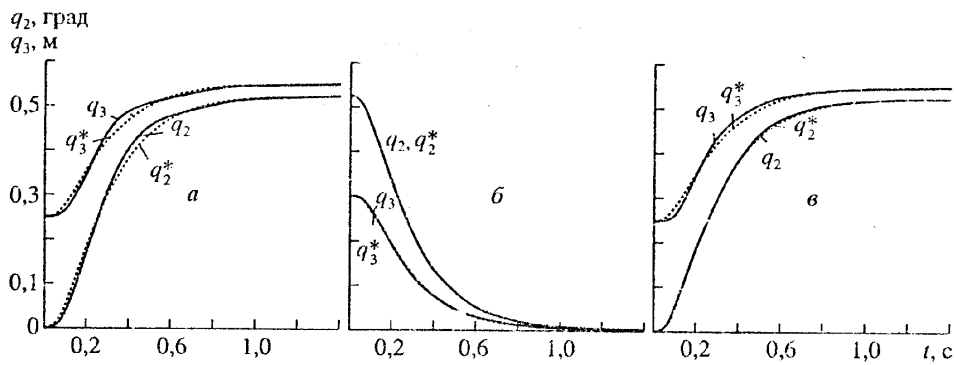


Рис. 3

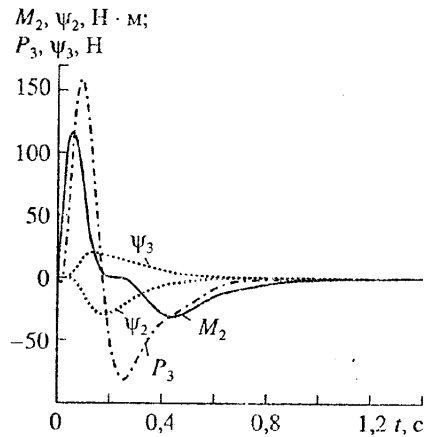


Рис. 4

ная функция модели в замкнутом состоянии $K_M(p) = (r_1 p + r_0)/(p^3 + \gamma_2 p^2 + \gamma_1 p + \gamma_0) = q^*(p)/\bar{q}(p)$, где $r_0 = \gamma_0 = 2000$, $r_1 = 600$, $\gamma_1 = 625$, $\gamma_2 = 50$.

На рис. 3, а приведены графики перемещений $q_2(t)$, $q_3(t)$ манипулятора с максимальным грузом в схвате. Значения коэффициентов усиления $k_2 = 250$, $k_3 = 400$. Процессы, характеризующие возврат ненагруженного манипулятора из положения $q_2 = \pi/6$ рад, $q_3 = 0,3$ м в исходное $\bar{q}_{2,3} = 0$, изображены на рис. 3, б. Полученные результаты показывают, что манипулятор, управляемый по алгоритму (18), следует за процессами в эталонных моделях при максимальных и минимальных значениях инерционных нагрузок. Это означает, что алгоритм управления, синтезированный по отдельным моделям, обладает свойствами адаптивности к изменению инерционных нагрузок во всем диапазоне, даже при невысоких значениях коэффициентов усиления k_2 , k_3 в контурах управления. Паряются также динамические взаимовлияния каналов управления звеньями 2 и 3, которые принимаются изолированными подсистемами как внешние возмущения. Следовательно, алгоритм (18) обладает свойством адаптивности к возмущающим воздействиям. На рис. 3, в приведены графики перемещений манипулятора с максимальным грузом в схвате, соответствующие координированному управлению. Управляющий момент M_2 и сила P_3 вычисляются по соотношению (10), где $s, v = 2, 3$, а значения коэффициентов $\rho_{22} = 250$, $\rho_{23} = 250$, $\rho_{32} = -400$, $\rho_{33} = 400$. Сравнительный анализ графиков на рис. 3, а и в показывает, что при координированном управлении от-

клонения перемещений $q_2(t)$, $q_3(t)$ от процессов $q_2^*(t)$, $q_3^*(t)$, задаваемых эталонными моделями, существенно меньше, чем в случае децентрализованного управления.

На рис. 4 даны графики управляющего момента $M_2(t)$, силы $P_3(t)$ и взаимовлияний каналов управления $\Psi_2(t)$ и $\Psi_3(t)$, вычисленных для случая координированного управления манипулятором.

Результаты математического анализа подтверждают, что синтезированный методом обратных задач динамики по отдельным моделям изолированных движений алгоритм управления действительно придает существенно нелинейному управляемому объекту требуемые динамические свойства, задаваемые линейными эталонными моделями. Алгоритм управления имеет унифицированную структуру, обладает свойствами естественной адаптивности к изменению инерционных параметров объекта управления и к возмущающим воздействиям, которые достигаются без специальных алгоритмов идентификации и настройки. Эти свойства проявляются при невысоких значениях коэффициентов усиления в исполнительных контурах и при отсутствии необходимости измерения ускорений. Это важно с точки зрения технической реализации алгоритмов управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крутько П.Д. Управление исполнительными системами роботов. М.: Наука, 1991.
2. Крутько П.Д. Координированное и автономное управление движением лагранжевых систем. Синтез алгоритмов по отдельным моделям // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2002. № 2.
3. Крутько П.Д., Кузьмин Д.В. Адаптивное управление пространственной конфигурацией сборочного манипулятора // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2003. № 5.

Москва–Северодвинск

Поступила в редакцию 17.XII.2003