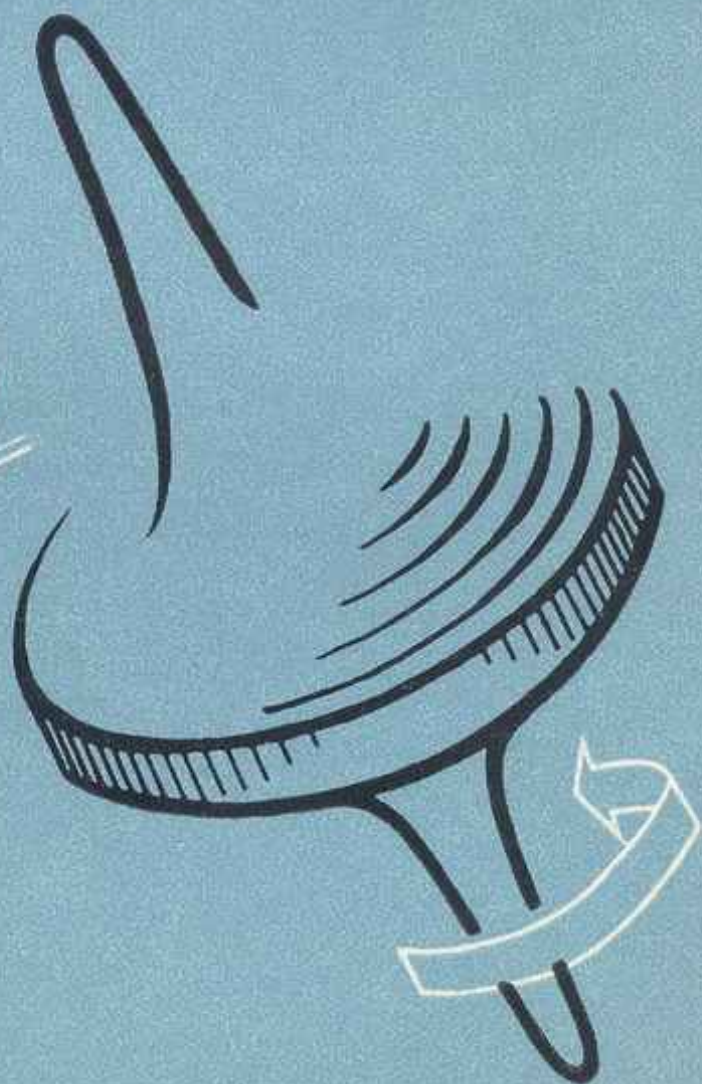


ISSN 0203-3771

МЕХАНИКА ГИРОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ



1987



КОМПЕНСАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРИВОД
МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА
В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО ДВИЖЕНИЕМ

Характерной особенностью манипуляционных роботов (МР) антропоморфного типа является существенная зависимость приведенных моментов инерции звеньев от конфигурации МР. Для обеспечения нормальной работы силового привода манипуляторов необходимо изменять коэффициент усиления цепи обратной связи пропорционально изменению приведенных моментов инерции звеньев, а также действию сил тяжести. В работе [1] показано, что возмущающий момент в шарнире i -го звена, обусловленный моментами сил инерции звеньев и сил тяжести, может быть вычислен по формуле

$$M_i = I_i(\theta_i) \ddot{\theta}_i + T_{gi}, \quad (1)$$

где $I_i(\theta_i) = \sum_{j=i}^n \text{tr}(U_{ji} H_j U_{ji}^T)$ — приведенный (эффективный) момент инерции i -го звена; $T_{gi} = - \sum_{j=i}^n m_j G^T U_{ji} R_i^*$ — момент сил тяжести.

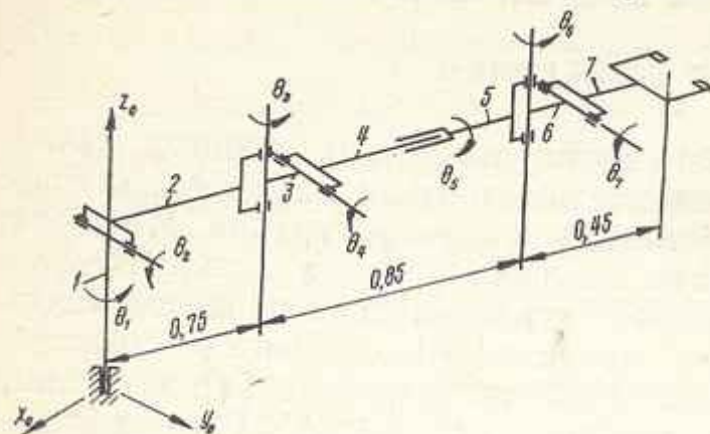
В этих формулах сохранены обозначения, принятые в книге [1]: $U_{ji} = A_1 A_2 \dots A_{i-1} Q A_i A_{i+1} \dots A_j$; H_j — матрица моментов инерции звеньев МР; $G^T = (0; 0; g; 0)$; $R_i^* = (X_i^*, Y_i^*, Z_i^*)$ — координаты центра масс i -го звена; t — символ транспонирования;

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$A_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & s_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Как видно из структуры матриц преобразования координат A_i , вычисление матриц U_{ji} , а тем более приведенных моментов инерции $I_i(\theta_i)$ и моментов T_{gi} весьма трудоемкое. Это обстоятельство не позволяет использовать формулу (1) для расчета возмущающих моментов в реальном масштабе времени, т. е. управлять движением манипуляционного робота с учетом динамических нагру-

зок [2]. Цель статьи — изложить методику упрощенного вычисления приведенных моментов инерции звеньев МР и моментов сил тяжести в приращениях. Эта методика базируется на линеаризации тригонометрических функций приращений углов θ_i , входящих в матрицы преобразования A_i , путем разложения их в степенные



ряды с сохранением только первых членов рядов. Такая линеаризация возможна, поскольку в течение времени τ , необходимого для выдачи управляющих команд от ЦВМ на силовой привод МР ($\tau \leq 5 \cdot 10^{-2}$ с), приращения углов θ_i не будут превышать 0,1 рад. Относительная погрешность линеаризации тригонометри-

ческих функций при $\theta_i \leq 5^\circ$ не превышает 0,12 % для синуса и 0,38 % для косинуса.

Рассмотрим семистепенной МР антропоморфного типа средней грузоподъемности (до 1500 Н), кинематическая схема которого представлена на рисунке. Приближенная оценка экстремальных значений приращений $\Delta\theta_i$ за время $\tau = 0,1$ с (при максимальных значениях линейных скоростей и ускорений движения схвата $0,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ соответственно) показала, что они не превышают 4° . Это свидетельствует о приемлемости предложенной линеаризации тригонометрических функций углов $\Delta\theta_i$.

Для расчета приращений приведенных моментов инерции звеньев ΔI_i [кг·м²] и приращений моментов сил тяжести ΔT_{gi} [Н·м] по формуле (1) приняты следующие данные: массы звеньев [кг] $m_1 = 850$; $m_2 = 740$; $m_3 = 450$; $m_4 = 380$; $m_5 = 210$; $m_6 = 160$; $m_7 = 85$; координаты центров масс звеньев в матричном виде [м] $R_1^* = (0; 0,50; 0; 1)^T$; $R_2^* = (0,54; 0; 0,10; 1)^T$; $R_3^* = (0; 0; 0,10; 1)^T$; $R_4^* = (0; 0,16; 0,20; 1)^T$; $R_5^* = (-0,04; -0,15; 0; 1)^T$; $R_6^* = (-0,01; 0; 0; 1)^T$; $R_7^* = (0; -0,02; 0,20; 1)^T$; $R_8^* = (0; 0; 0,45; 1)^T$; масса груза $m_r = 150$ кг.

Представим груз в виде параллелепипеда со сторонами a , b , c . После несложных, но громоздких вычислений получим следующие приближенные выражения для определения искомых величин:

$$\Delta I_1 = 586,13 + m_r \left(\frac{b^2 + c^2}{12} + 4,16 \right) + 9,66\Delta\theta_2 - 41,02\Delta\theta_3 - 0,32\Delta\theta_6;$$

$$\Delta I_2 = 584,24 + m_r \left(\frac{a^2 + c^2}{12} + 4,16 \right) - 37,03\Delta\theta_3 - 0,98\Delta\theta_6;$$

$$\Delta I_3 = 76,34 + m_r \left(\frac{b^2 + c^2}{12} + 1,68 \right) - 2,75\Delta\theta_6;$$

$$\Delta I_4 = 71,96 + m_r \left(\frac{a^2 + c^2}{12} + 1,68 \right) - 3,41 \Delta \theta_7; \quad (2)$$

$$\Delta I_5 = 2,14 + m_r \frac{a^2 + b^2}{12} - 0,33 \Delta \theta_6;$$

$$I_6 = 4,97 + m_r \left(\frac{b^2 + c^2}{12} + 0,20 \right);$$

$$I_7 = 4,21 + m_r \left(\frac{a^2 + c^2}{12} + 0,20 \right);$$

$$I_8 = m_r \frac{a^2 + b^2}{12};$$

$$\Delta T_{g1} = 0;$$

$$\Delta T_{g2} = 6370,4 + 20,4m_r + 2256,3\Delta\theta_2 - 2682,4\Delta\theta_3 + 158,6\Delta\theta_6;$$

$$\Delta T_{g3} = -3735,7\Delta\theta_2;$$

$$\Delta T_{g4} = 1759,1 + 12,9m_r + 158,6\Delta\theta_6; \quad (3)$$

$$\Delta T_{g5} = 336,5 - (4,5m_r + 187,2) \Delta\theta_6;$$

$$\Delta T_{g6} = 158,6 (\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3) - (4,5m_r + 187,2) \Delta\theta_7;$$

$$T_{g7} = 187,2 + 4,5m_r.$$

Эти уравнения имеют простую структуру, и приращения приведенных моментов ΔI_i можно вычислять на мини-ЭВМ в реальном масштабе времени. В связи с этим можно учесть динамические воздействия на силовой привод МР и обеспечить своевременное изменение его коэффициента усиления в процессе управления движением манипулятора. Кроме того, уравнения (2) и (3) позволяют оценить влияние моментов инерции отдельных звеньев на суммарную динамическую нагрузку. Как видно из уравнений (2), наибольшее влияние на изменение $I_i(\theta_i)$ оказывают третье и шестое звенья МР. Приведенные моменты инерции шестого и седьмого звеньев манипулятора не зависят от конфигурации МР и остаются постоянными (в рамках принятых допущений) в процессе его движения. Это позволяет ограничиться постоянными коэффициентами передачи в цепях обратных связей силовых приводов этих звеньев. Приведенные моменты инерции третьего и пятого звеньев зависят (в первом приближении) только от угла $\Delta\theta_6$, а четвертого — от $\Delta\theta_7$, что облегчает настройку коэффициентов усиления приводов указанных звеньев.

Рассмотренная методика вычисления $\Delta I_i(\Delta\theta_i)$ и ΔT_{gi} , значит, и ΔM_i может быть распространена на МР с произвольным числом степеней свободы.

1. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. М., 1976. 104 с. 2. Динамика управления роботами. М., 1984. 336 с.

Поступила в редколлегию 11.11.85