Филаретов В.Ф. **Россия** **Владивосток**

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Введение. В настоящее время создано много методов, позволяющих синтезировать системы управления многозвенными манипуляторами. Однако многие из них не удается использовать при синтезе регуляторов для приводов всех их степеней подвижности. Причина заключается в существенной переменности динамических свойств и сложности описания этих манипуляторов с учетом полного взаимовлияния между всеми приводами при изменениях параметров нагрузок во время быстрых перемещений схвата по произвольным пространственным траекториям. В данной работе на основе обобщенного подхода, подробно изложенного в публикации [1], решается задача синтеза адаптивных систем управления для отдельных электроприводов сложного многозвенного манипулятора, имеющего четыре переносные степени подвижности и движущегося с большими скоростями по сложным траекториям.

Постановка задачи исследования. С использованием подхода, основанного на решении обратной задачи динамики, на примере одной степени подвижности многозвенного манипулятора, изображенного на рис. 1, синтезировать адаптивную коррекцию, обеспечивающую стабилизацию динамических свойств и показателей качества каждого из электроприводов этого манипулятора на некотором номинальном уровне в процессе его произвольного движения по любым пространственным траекториям с любыми скоростями в пределах допустимой мощности всех усилительных и исполнительных элементов.

Описание динамики манипулятора. В данной работе задача синтеза адаптивного регулятора будет рассмотрена только для четвертой степени подвижности манипулятора, изображенного на рис.1. Для остальных степеней указанная задача решается аналогично. На рис.1 введены следующие обозначения: q_i – соответствующие обобщенные координаты манипулятора ($i = 1 \div 4$); m_i - массы соответствующих звеньев манипулятора ($i = 2, 3$); $m_Г$ - масса захваченного груза; l_2, l_3 - длины соответствующих звеньев; l^*_2, l^*_3 - расстояния от осей вращения соответствующих звеньев до их центров масс. С помощью координаты q_4 манипулятор может перемещаться вдоль непрерывно движущихся конвейеров, обеспечивая выполнение произвольных технологических операций без остановки этих конвейеров.

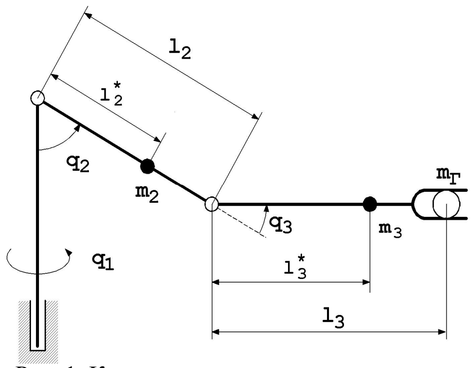

Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора

Для определения силового воздействия F_4 на четвертую степень подвижности манипулятора при движении схвата по сложной траектории можно использовать уравнение Лагранжа второго рода, получив аналитические выражения для кинетической Т и потенциальной П энергий этого многозвенника. С учетом введенных обозначений потенциальная и кинетическая энергии рассматриваемого манипулятора соответственно имеют вид:

$$
\begin{aligned}
T = {} & \frac{1}{2}\dot q_1^2 (J_{s1} + m_2 l_2^{*2}\cos^2 q_2 + J_{s2}\sin^2 q_2 + J_{n2}\cos^2 q_2 + m_3 l_2^2 \cos^2 q_2 + m_3 l_3^{*2}\cos^2(q_2+q_3) + J_{s3}\sin^2(q_2+q_3) + \\
& + J_{n3}\cos^2(q_2+q_3) + m_{г} l_2^2\cos^2 q_2 + m_3 l_3^{*2}\cos^2(q_2+q_3) + J_{s3}\sin^2(q_2+q_3) + J_{n3}\cos^2(q_2+q_3) + m_{г} l_2^2 \cos^2 q_2 + \\
& + m_{г} l_3^2 \cos^2(q_2+q_3) + 2(l_2 l_3^* m_3 + l_2 l_3 m_{г})\cos q_2 \cos(q_2+q_3)) + \frac{1}{2}\dot q_2^2 (m_2 l_2^{*2} + J_{n2} + m_3 l_2^2 + m_3 l_3^{*2} + 2 m_3 l_2 l_3^* \cos q_3 + \\
& + J_{n3} + m_{г} l_2^2 + m_{г} l_3^2 + 2 m_{г} l_2 l_3 \cos q_3) + \frac{1}{2}\dot q_3^2 (m_3 l_3^{*2} + m_{г} l_3^2 + J_{n3}) + \frac{1}{2}\dot q_4^2 (m_1 + m_2 + m_3 + m_{г}) + \\
& + \dot q_2 \dot q_3 (m_3 l_3^{*2} + m_3 l_2 l_3^* \cos q_3 + J_{n3} + m_{г} l_3^2 + m_{г} l_2 l_3 \cos q_3) - \dot q_1 \dot q_4 (m_2 l_2^* \sin q_1 \cos q_2 + m_3 l_3^* \sin q_1 \cos(q_2+q_3) + \\
& + m_3 l_2 \sin q_1 \cos q_2 + m_{г} l_3 \sin q_1 \cos(q_2+q_3) + m_{г} l_2 \sin q_1 \cos q_2) - \dot q_2 \dot q_4 (m_2 l_2^* \cos q_1 \sin q_2 + m_3 l_3^* \cos q_1 \sin(q_2+q_3) + \\
& + m_3 l_2 \cos q_1 \sin q_2 + m_{г} l_3 \cos q_1 \sin(q_2+q_3) + m_{г} l_2 \cos q_1 \sin q_2) - \dot q_3 \dot q_4 (m_3 l_3^* \cos q_1 \sin(q_2+q_3) + m_{г} l_3 \cos q_1 \sin(q_2+q_3)),
\end{aligned}
$$

$$
\Pi = g[m_2 l_2^* \sin q_2 + m_3(l_2 \sin q_2 + l_3^* \sin(q_2+q_3)) + m_{г}(l_2 \sin q_2 + l_3 \sin(q_2+q_3))],
$$

где g – ускорение свободного падения; J_{si},J_{ni}- соответственно моменты инерции звеньев манипулятора относительно их продольных осей, а также осей, проходящих через их центры масс и перпендикулярных этим осям.

Учитывая, что

$$
\begin{aligned}
\frac{\delta(T-\Pi)}{\delta \dot q_4} = {} & (m_1 + m_2 + m_3 + m_{г})\dot q_4 - \{\cos q_2 [m_2 l_2^* + m_3 l_2 + m_{г} l_2] + \cos(q_2+q_3)[m_3 l_3^* + m_{г} l_3]\}\dot q_1 \sin q_1 - \\
& - \{\sin q_2 [m_2 l_2^* + m_3 l_2 + m_{г} l_2] + \sin(q_2+q_3)[m_3 l_3^* + m_{г} l_3]\}\dot q_2 \cos q_1 - \{m_3 l_3^* + m_{г} l_3\}\dot q_3 \sin(q_2+q_3)\cos q_1,
\end{aligned}
$$

с использованием уравнения Лагранжа второго рода можно записать

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\delta(T-\Pi)}{\delta\dot{q}_4}\right]-\frac{\delta(T-\Pi)}{\delta q_4}=F_4=H\ddot{q}_4+C,$$

где $H=(m_1+m_2+m_3+m_4)r^2$, $C=-a\ddot{q}_1-d\ddot{q}_2-m\ddot{q}_3-b(\dot{q}_1^2+\dot{q}_2^2)+2f\dot{q}_1\dot{q}_3+2c\dot{q}_1\dot{q}_2-k(2\dot{q}_2\dot{q}_3+\dot{q}_3^2)$,

$a=\sin q_1(A\cos(q_2+q_3)+B\cos q_2)$, $b=\cos q_1(A\cos(q_2+q_3)+B\cos q_2)$, $c=\sin q_1(A\sin(q_2+q_3)+B\sin q_2)$,
$d=\cos q_1(A\sin(q_2+q_3)+B\sin q_2)$, $e=A\sin q_1\cos(q_2+q_3)$, $k=A\cos q_1\cos(q_2+q_3)$, $m=A\cos q_1\sin(q_2+q_3)$,
$f=A\sin q_1\sin(q_2+q_3)$, $A=m_3l_3^*+m_г l_3$, $B=m_2l_2^*+m_3l_2+m_г l_2$.

Аналогичные аналитические выражения могут быть получены и для первых трех переносных степеней подвижности рассматриваемого манипулятора.

Описание динамики нагруженного электропривода. Уравнения электрической и механической цепей каждого электропривода рассматриваемого манипулятора имеют вид:

$$K_yU^*=L\frac{di}{dt}+Ri+K_\omega\dot{\alpha},\quad K_Mi=(J+H/i_p^2)\ddot{\alpha}+K_B\dot{\alpha}+M_T\operatorname{sign}\dot{\alpha}+Cr/i_p=M_{ДВ}, \tag{1}$$

где R, L - активное сопротивление и индуктивность якорной обмотки двигателя; K_B - коэффициент вязкого трения; $K_у$ - коэффициент усиления усилителя мощности; $K_М$, K_ω- коэффициенты крутящего момента и противо ЭДС; $M_Т$=const>0 - величина момента сухого трения при движении электродвигателя; J - момент инерции ротора двигателя и вращающихся частей редуктора (приведены к валу двигателя); $i_р$- передаточное отношение редуктора; $M_{ДВ}$ – момент, развиваемый двигателем; U^*- величина напряжения на якорной обмотке двигателя.

В результате с учетом уравнений (1), а также того, что для четвертой степени подвижности справедливо равенство $M_{ДВ4}$ = Fr, где r – радиус шестерни, установленной на выходном валу редуктора и сцепленной с рейкой основания, по которому движется манипулятор, можно получить дифференциальное уравнение, описывающее динамику рассматриваемого нагруженного электропривода при произвольном движении этого манипулятора:

$$K_MK_yU^*=L(J+H/i_p^2)\ddot{\alpha}_4+(LK_B+R(J+H/i_p^2))\ddot{\alpha}_4+(RK_B+K_MK_\omega)\dot{\alpha}_4+R(M_T\operatorname{sign}\dot{\alpha}_4+Cr/i_p)+LDr/i_p, \tag{2}$$

где
$$D=a(\dot{q}_1^3-\ddot{q}_1+3\dot{q}_2^2\dot{q}_1)-3b(\ddot{q}_1\dot{q}_1+\ddot{q}_2\dot{q}_2)+3c\ddot{q}_1\dot{q}_2+\ddot{q}_2\dot{q}_1)+3f(\ddot{q}_1\dot{q}_3+\ddot{q}_3\dot{q}_1)+d(\dot{q}_2^3-\ddot{q}_2+3\dot{q}_1^2\dot{q}_2)+$$
$$-3k(\ddot{q}_2\dot{q}_3+\ddot{q}_3\dot{q}_2+\ddot{q}_3\dot{q}_3)+m(3\dot{q}_1^2\dot{q}_3+3\dot{q}_2^2\dot{q}_3+3\dot{q}_3^2\dot{q}_2+\dot{q}_3^3-\ddot{q}_3)+3e(\dot{q}_1\dot{q}_3^2+2\dot{q}_1\dot{q}_2\dot{q}_3).$$

Синтез самонастраивающейся коррекции электропривода. При синтезе адаптивной коррекции, стабилизирующей параметры рассматриваемого электропривода манипулятора на номинальном уровне, воспользуемся методом, предложенным в работе [1]. При этом будем полагать, что дифференциальное уравнение, описывающее динамику электропривода с номинальными постоянными параметрами и стабильными динамическими свойствами, имеет вид:

$$K_MK_yU=LJ_H\ddot{\alpha}_4+RJ_H\ddot{\alpha}_4+K_MK_\omega\dot{\alpha}_4, \tag{3}$$

где $J_Н$- номинальное значение приведенного к валу электродвигателя суммарного момента инерции; U – сигнал управления, поступающий на вход адаптивного корректирующего устройства.

Для получения закона управления, преобразующего уравнения (2) в уравнение (3), вначале в уравнении (3) необходимо выразить старшую производную и подставить ее в уравнение (2). Затем несложно получить окончательное выражение для закона формирования адаптивной коррекции (адаптивного управляющего сигнала), которая полностью стабилизирует параметры рассматриваемого привода на номинальном уровне:

$$U^*=\frac{H/i_p^2+J}{J_н}\left(U-\frac{K_\omega}{K_y}\dot{\alpha}_4\right)+\frac{R}{K_мK_y}M_т\operatorname{sign}\dot{\alpha}_4+\left(\frac{K_\omega}{K_y}+\frac{K_BR}{K_мK_y}\right)\dot{\alpha}_4+\frac{rR}{K_мK_yi_p}C+\frac{L}{K_мK_y}(K_B\ddot{\alpha}_4+Dr/i_p). \tag{4}$$

Аналогично можно получить законы формирования адаптивных корректирующих устройств и для остальных электроприводов рассматриваемого многостепенного манипулятора. Сигналы управления вида (4) легко могут быть реализованы на типовых контроллерах.

Результаты моделирования. После синтеза адаптивных регуляторов вида (4) для всех приводов манипулятора (рис.1) было проведено исследование его работы в различных типовых режимах. Было показано, что при одновременном использовании для каждого привода адаптивных коррекций вида (4) и стационарных коррекций, синтезированных по квадратичному критерию качества, динамическая ошибка движения схвата по сложным траекториям со скоростями до 2 м/с не превышала 0.5 мм.

Выводы. Результаты исследований подтвердили необходимость и целесообразность использования адаптивных регуляторов, которые точно стабилизируют динамические свойства и показатели качества работы электроприводов многостепенных манипуляторов на номинальном уровне. Использование этих регуляторов значительно увеличивает динамическую точность перемещения схвата по пространственным траекториям при повышенных скоростях движения.

Литература.

1. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. - Владивосток: ДВГТУ, 2000. -304с.