

УДК 621

## **ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИВодОВ РОБОТА НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

**И.В. Таржанов, к.т.н.**

*Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия*

*@Автор для переписки, e-mail: tarzhanoviv@yandex.ru*

В статье рассматриваются возможные способы проектирования с уменьшением энергозатрат роботов путем выбора расписания включения приводов степеней подвижности, а также уменьшением работ сил трения при торможении степеней подвижности вблизи оси позиционирования.

**Ключевые слова:** манипулятор, приводы роботов, проектирование приводов, расписание включения.

## **THE POSSIBILITIES OF REDUCING ENERGY CONSUMPTION OF THE ROBOT DRIVES IN THE DESIGN PHASE**

**I.V. Tarzhanov**

*Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia*

*@Corresponding author e-mail: tarzhanoviv@yandex.ru*

The article discusses possible ways of designing with reduction of the energy consumption of robots by choice of schedules, the inclusion of actuators degrees of freedom, and reduction of work forces of friction when braking degree of freedom near the axis positioning.

**Keywords:** manipulator, robot drives, drive engineering, power schedule.

При решении задачи проектирования с уменьшением энергозатрат в приводах робота, затрачиваемых на перемещение звеньев манипулятора, прежде всего, нужно учитывать последовательность включения приводов робота и способы управления ими.

Расписание включения приводов каждого сочленения определяет последовательность их включения для обеспечения заданного перемещения выходного звена.

Для примера рассмотрим кинематическую схему манипулятора робота, приведенную на рис. 1. При работе манипулятор может одновременно совершать три движения: вращение системы ABCD вокруг вертикальной оси (обобщенная координата  $q_1$ ); вращение кинематической цепи BCD вокруг оси B ( $q_2$ ) и вращение звена CD вокруг оси C ( $q_3$ ).

Можно последовательно включать приводы, например, сначала поворот в сочленении А, потом поворот в сочленении В, потом поворот в сочленении С. Рассмотрев последовательность включений приводов, получим семь возможных последовательных режимов включения приводов. Траектория движения точки D выходного звена при этом будет различной.

Возможная последовательность включения приводов (расписание их включения) в сочленениях А, В и С приведена в таблице.

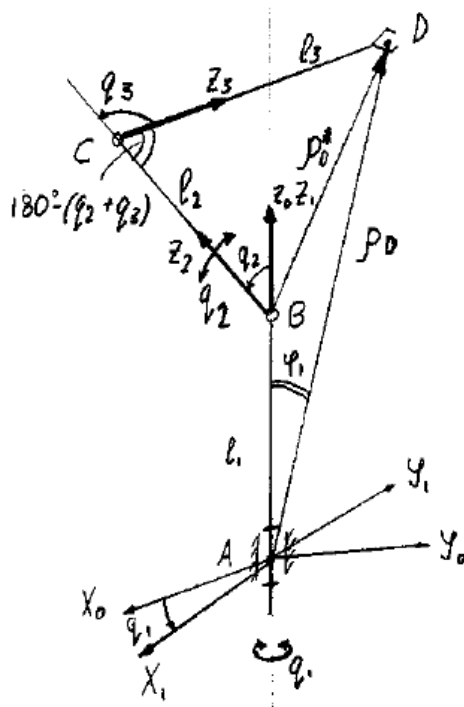


Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора.

Расписание включения приводов в сочленениях А, В и С манипулятора

Сочленения	Возможная последовательность включения приводов*						
А	Q <sub>1</sub>	q <sub>1</sub> НН	q <sub>1</sub> Н	q <sub>1</sub> Н	ННq <sub>1</sub>	Нq <sub>1</sub>	Нq <sub>1</sub> НН
В	Q <sub>2</sub>	Нq <sub>2</sub> Н	q <sub>2</sub> Н	Нq <sub>2</sub>	Нq <sub>2</sub> Н	q <sub>2</sub> Н	q <sub>2</sub> НН
С	Q <sub>3</sub>	ННq <sub>3</sub>	Нq <sub>3</sub>	q <sub>3</sub> Н	q <sub>3</sub> НН	q <sub>3</sub> Н	ННq <sub>3</sub>

\*q – привод включен; Н – привод не включен.

Таким образом, определяя последовательность включения приводов, можно получить такую траекторию движения точки D выходного звена, которая обеспечит наименьший объем движения во всех кинематических парах механизма манипулятора, что существенно позволяет снизить энергозатраты приводов робота, так как

$$|W|_{\min} = \sum_1^n \Theta_i,$$

где  $|W|_{\min}$  – объем движения во всех кинематических парах;  
 $\Theta_i$  – перемещение в  $i$ -ом сочленении.

Кроме того, экономичность движения зависит от длины траектории, по которой движется выходное звено. Поэтому, подбирая последовательность включения привода соответствующим образом, можно получить нужную траекторию движения, т.е. решить задачу о положении путем расписания включения приводов.

С целью более точного решения задачи о положении с получением одновременно минимизации энергозатрат, необходимо при использовании метода конечного поворота

твердого тела учитывать расписание включения приводов, а именно порядок выполнения поворота отдельных звеньев.

При повороте звеньев 2 и 3 (рис. 1) положение точки D выходного звена определяется размером:

$$\rho_D^* = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_3 \cos[180^\circ - (q_3 + q_2)]} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_3 \cos(q_3 + q_2)}.$$

При повороте только 1-ого звена положение точки D определяется постоянным радиусом  $\rho_D$ , а точка D имеет своей траекторией окружность, расположенную в плоскости, перпендикулярной оси АВ:

$$\rho_D = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos q_2 + l_3 \cos(90^\circ - q_3) = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos q_2 + l_3 \sin q_3,$$

причем надо помнить, что  $\varphi_1 = \varphi_1(q_2, q_3)$ , следовательно, в уравнение для определения размера  $\rho_D$  необходимо вводить последовательность поворота отдельных звеньев.

Если же траектория точки D выходного звена задана, то при рассмотрении системы управления необходимо так распределять последовательность включения приводов, чтобы обеспечить заданную траекторию при соблюдении условия получения минимального объема движения во всех кинематических парах. В этом случае решается обратная задача позиционирования – по заданным положениям выходного звена необходимо определить обобщенные координаты  $q_1, q_2, q_3$  и последовательность их включения, чтобы обеспечить движение выходного звена по заданной траектории.

Таким образом, при решении задачи об уменьшении энергозатрат привода робота первый вопрос, который должен быть рассмотрен, это связь прямой и обратной задачи позиционирования с расписанием включения приводов. Необходимо получить зависимость

$$\rho_D = \rho(q_1 \cdot q_2 \cdot q_3) \Rightarrow q_1 = q(q_2 \cdot q_3); q_2 = q(q_1 \cdot q_3); q_3 = q(q_1 \cdot q_2), \text{ а } q = q(t),$$

где  $t$  – время включения.

Временной интервал движения выходного звена, в основном, складывается из разгона и торможения (режим установившегося движения соответствует минимальному интервалу движения).

Мощность, затрачиваемая на разгон и торможение, в общем случае равна:

$$N_B = \left( \frac{\omega}{\eta} \right) (M_H + M_U),$$

где  $\eta$  – к.п.д. передач, связывающих двигатель с исполнительным звеном;

$M_H$  – момент неуравновешенности, возникающий от неуравновешенных масс, [Н·м];

$M_U$  – динамический (инерционный) момент, возникающий в периоды разгона и торможения, [Н·м];

$$M_U = -J_M \varepsilon,$$

где  $J_m$  – момент инерции вращающихся масс манипулятора, [кг·м<sup>2</sup>];

$\varepsilon$  – угловое ускорение, [1/с<sup>2</sup>].

Если же движение осуществляется с помощью двигателя с поступательно движущимся двигателем, то мощность привода равна:

$$N_B = \left( \frac{v}{\eta} \right) (P_H + P_U),$$

где  $P_H$  – силы, действующие на привод от неуравновешенных масс, [Н];

$P_U$  – инерционные силы, действующие на привод в периоды разгона и торможения, [Н].

$$\overline{P_U} = -\overline{ma},$$

где  $m$  – масса поступательного движущихся звеньев, [кг];

$a$  – ускорение этих звеньев, [м/с<sup>2</sup>].

Из вышесказанного очевидно, что мощность двигателя зависит от перемещаемых масс и от их ускорений. Наибольших значений ускорения достигают в режимах разгона и торможения. Таким образом, режимы включения приводов надо назначить так, чтобы силы инерции, возникающие при движении одного звена, гасили бы силы инерции, возникающие при движении другого звена.

Кроме того, очень важно, чтобы в момент включения или отключения того или иного двигателя на выходном звене не наблюдались бы скачки ускорений, а, следовательно, скачки сил инерции, то есть удары.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что при решении задачи об уменьшении энергозатрат приводов второй вопрос, который должен быть рассмотрен, это связь структуры робота (массовые характеристики), ускорения звеньев с расписанием включения приводов.

Если теперь рассматривать режим торможения, то мощность, затрачиваемая на торможение равна

$$N = \frac{A_{bc}}{t},$$

где  $t$  – время торможения, [с];

$A_{bc}$  – работа сил, затрачиваемая на торможения, [Н·м].

Из формулы видно, что чем медленнее происходит торможение, тем меньше мощность. Увеличение времени торможения, с одной стороны, позволяет гарантированно получить затухание вынужденных колебаний выходного звена вблизи точки позиционирования, увеличивая точность, а, с другой стороны, увеличивает время работы робота, что приводит к уменьшению производительности.

Следовательно, третьим вопросом, который надо рассмотреть при решении задачи об уменьшении энергозатрат при работе робота, это связь между временем торможения, позволяющим получить большую точность позиционирования, производительностью робота и энергозатратами, а также с расписанием включения и отключения приводов.

Кроме поставленных трех вопросов, необходимо еще рассмотреть вопрос о соотношении скоростей всех звеньев манипулятора, так как иначе при различных расписаниях

включения приводов траектории движения будут различны, а, значит, и зоны обслуживания робота будут меняться. Поэтому расписание движения звеньев нужно согласовывать со скоростями звеньев.

Чтобы показать, как порядок включения приводов влияет на форму и величину траектории движения выходного звена, рассмотрим двухзвенный плоский манипулятор с 2-мя вращательными парами V класса (рис. 2).

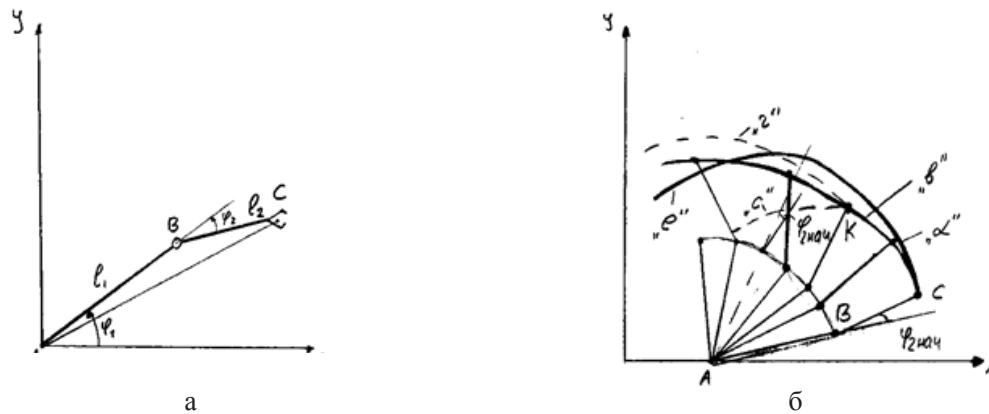


Рис. 2. Схема манипулятора с возможными траекториями точки С:

При одновременном движении звеньев 1 и 2 (оба двигателя включаются одновременно) (рис. 2а) и при условии, что углы  $\varphi_1 = \varphi_2$ , траектория движения точки С представляет собой кривую с увеличивающимся радиусом кривизны по мере возрастания угла  $\varphi_1$  (ветвь «в», рис.2б), равном:

$$r = l_{AC} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos[180^\circ - \varphi_2]} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \varphi_2}$$

Если  $\varphi_1 > \varphi_2$ , то при одновременном движении звеньев 1 и 2 при повороте звена 1 на угол  $\varphi_1 = \varphi_2$  траектория движения точки С на этом угле поворота будет соответствовать ветви «в» до точки К, а при дальнейшем вращении звена 1 траектория точки С будет представлять собой окружность с радиусом

$$r_1 = l_{AC} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \varphi_{2\max}} \quad (\text{ветвь «г», рис.2б}).$$

Если  $\varphi_1 < \varphi_2$ , то при одновременном движении звеньев 1 и 2 при повороте звена на угол  $\varphi_1$  траектория движения точки С будет соответствовать ветви «в» до точки К, далее звено 1 неподвижно, а звено 2 будет продолжать вращение вокруг оси В на угол  $\varphi_2 - \varphi_1$ , траектория движения точки С будет представлять собой окружность радиуса  $r_2 = l_{BC}$  (ветвь «с», рис. 2б).

Если сначала включается привод в сочленении А (вращение звена 1 на угол  $\varphi_1$ ), то траектория точки С будет представлять собой окружность радиуса

$$r_3 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \varphi_{2\text{нач}}} \quad (\text{ветвь «д», рис. 2б}),$$

далее звено 1 неподвижно, а звено 2 вращается вокруг оси В на угол  $\varphi_2$ , траектория движения точки С – окружность радиуса  $r_4 = l_{BC}$  (ветвь «е», рис. 2б).

Как видно из приведенного примера, при незаданной траектории движения, расписание включения приводов при одной и той же структуре манипулятора может быть различным.

Итак, при решении задачи о положениях выходного звена должно быть либо задано расписание включения приводов – тогда траектория движения выходного звена будет определяться структурой манипулятора, углами поворота звеньев и расписанием включения приводов, либо расписание включения приводов должно определяться из условия получения заданной траектории движения выходного звена.

При составлении программы автоматического проектирования роботов необходимо учитывать все вышеперечисленные факторы.

#### Литература:

1. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Проектирование промышленных роботов. М.: Высшая школа, 1996.
2. Механика промышленных роботов / Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. М.: Высшая школа, 1988.