

УДК 621

ДИНАМИЧЕСКАЯ РАЗВЯЗКА ДВИЖЕНИЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТАХ С РЕКУПЕРАТОРАМИ ЭНЕРГИИ

© Леонид Иосифович Тывес

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

l-tyves@hovrino.net

Аннотация. Рассматривается голономная консервативная модель механической руки и решается задача динамической развязки движений по степеням подвижности механической руки, направленной на максимально возможное уменьшение эффектов динамических взаимовлияний, достигаемое средствами механики. Существо и методы динамической развязки сводятся к следующему [1].

Условию отсутствия динамических взаимовлияний приводов соответствует система дифференциальных уравнений механической руки в координатах выходных валов двигателей, каждое из которых содержит только одну координату и только ее производные. Это условие можно реализовать путем выбора структуры руки, геометрии масс звеньев механической руки, структуры передач привода и введением уравновешивающих механизмов. При этом необязательно одновременное осуществление всех перечисленных мероприятий.

Достаточность принимаемых мер, что важно, можно оценить по выражению функции Лагранжа $L = W - U$. Предполагается, что при необходимости всегда можно уравновесить силы тяжести звеньев и обеспечить $U = \text{const}$. В классической механике координаты, не входящие в функцию Лагранжа в явном виде, называют циклическими. Уравнения динамики механической руки существенно упрощаются в случае, когда все обобщенные координаты – циклические. Они превращаются в линейные с постоянными коэффициентами, причем второй член уравнения Лагранжа (производная функции Лагранжа по обобщенной координате) равен нулю.

Рассмотрим условия цикличности и ортогональности всех обобщенных координат в структуре механической руки с n вращательными кинематическими парами. Модель (рис.1) представляет собой плоскую n -звенную разомкнутую кинематическую цепь с вращательными парами пятого класса. m_i, I_{0i} – масса и центральный момент инерции i -го звена соответственно, ρ_i – расстояние

от i -го шарнира до центра масс i -го звена.

Для этой модели кинетическая энергия представляется в виде двух слагаемых. Первое слагаемое –

$$W_1 = 0,5 \sum_{i=1}^n m_i V_{0i}^2 \quad - \quad \text{сумма}$$

кинетической энергии центров масс, а

$$\text{второе} - W_2 = 0,5 \sum_{i=1}^n I_{0i} \left(\sum_{j=1}^i \dot{q}_j \right)^2 \quad - \quad \text{сумма}$$

кинетических энергий, обусловленных

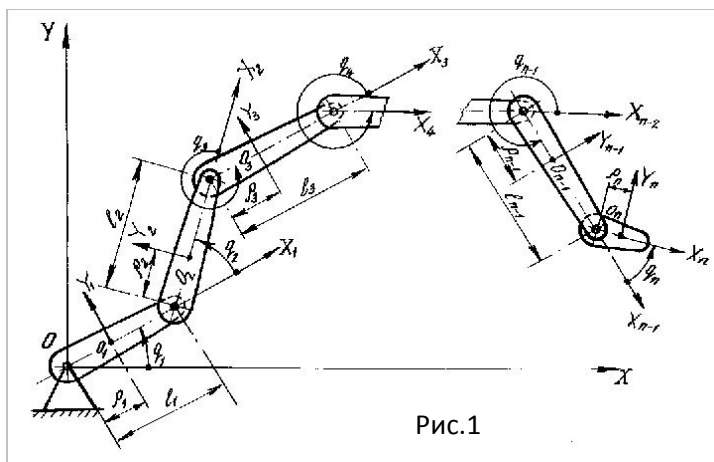


Рис.1

вращением звеньев вокруг центров масс. Второе слагаемое не зависит от обобщенных координат, а развернутое выражение составляющей W_1 кинетической энергии имеет вид

$$W_1 = 0,5 \sum_{i=1}^n m_i \left[\rho_i^2 \left(\sum_{j=1}^i \dot{q}_j \right)^2 + \sum_{j=1}^{i-1} l_j^2 \left(\sum_{k=1}^j \dot{q}_k \right)^2 \right] + \sum_{i=1}^n \left(m_i \rho_i + l_i \sum_{j=i+1}^n m_j \right) \left(\sum_{k=1}^i \dot{q}_k \right) \left[V_{iy} \cos \left(\sum_{k=1}^i q_k \right) - V_{ix} \sin \left(\sum_{k=1}^i q_k \right) \right].$$

Условия цикличности i -ой обобщенной координаты ($2 \leq i \leq n-1$) рассматриваемой модели получим, приравняв нулю коэффициенты при функциях обобщенных координат:

$$\rho_i = -l_i \sum_{j=i+1}^n m_j / m_i$$

Координата q_1 – циклическая при любых соотношениях параметров модели, а условие цикличности координаты $q_n : \rho_n = 0$. При выполнении последнего условия и $(n-2)$ предыдущих условий все координаты модели циклические. Найденные условия – это условия статического равновесия i -го звена относительно i -го шарнира с присоединенными к нему в $(i+1)$ -м шарнире последующих масс звеньев. Если уравнивать все звенья руки, начиная с последнего, массы звеньев будут нарастать. Однако во многих случаях требуется обеспечить динамическую развязку движений лишь первых от основания звеньев руки. Заметим также, что выполнение полученных условий автоматически ведет к равенству нулю гравитационной составляющей потенциальной энергии при любом расположении плоскости

рассматриваемого механизма. Далее, координаты $\psi_i = \sum_{j=1}^i q_j$, в которых выражение

кинетической энергии модели – это сумма квадратов обобщенных скоростей, умноженных на постоянные коэффициенты, являются не только циклическими, но и ортогональными. Технически они легко реализуются построением кинематических передач привода звеньев от двигателей, установленных на основании.

Потребность реализации быстрых движений при небольшом числе позиций привела к созданию роботов с цикловой системой управления и рекуператорами механической энергии [2,3]. Действительно, характерной особенностью движения цикловых промышленных роботов является малая доля движений с постоянной скоростью в общем цикле движений. Преобладающими являются режимы интенсивного разгона и торможения. Поэтому целесообразно на этапе торможения аккумулировать механическую энергию в специальных устройствах – рекуператорах, а на этапе разгона «выдавать» ее в систему, оставляя за двигателями лишь функции подкачки энергии для компенсации потерь на трение и совершение полезной работы.

Наиболее простые технические решения в реализации высказанной идеи связаны с использованием свойств колебательных систем. Для перевода робототехнических систем в класс колебательных конструкция робота должна обладать минимальными демпфирующими свойствами, и в нее должны быть введены

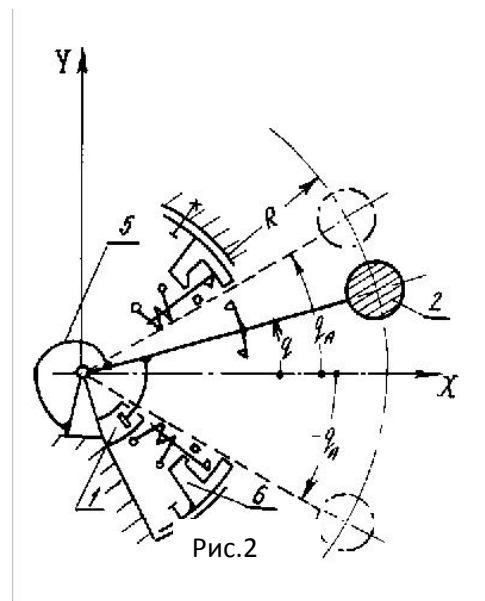


Рис.2

упругие элементы. В связи с тем, что цикловой робот является машиной дискретного действия, а не непрерывного, конструкция должна быть оснащена управляемыми фиксаторами. Модель привода с рекуперацией механической энергии представлена на рис.2. Здесь: 1 – двигатель, 2 – поворотное звено механизма робота, моделируемое массой m на радиусе R , 5 – упругий элемент жесткостью c , 6 – управляемый упор-фиксатор. При таком приводе быстродействие системы не зависит от мощности двигателя 1, а полностью определяется собственными динамическими свойствами механического колебательного контура. При известной инерционности системы mR^2 можно подобрать жесткость c пружины рекуператора так, чтобы обеспечить требуемое быстродействие.

В роботах – системах с несколькими степенями подвижности, – при одновременном движении нескольких звеньев динамическое взаимовлияние по степеням подвижности приводит к обмену энергиями между парциальными системами. Это нарушает нормальную работу механизма. Следовательно, одновременная работа рекуператоров энергии в системах с несколькими степенями подвижности возможна только в динамически развязанных структурах.

В системах с рекуперацией энергии двигатель работает в специфическом режиме: он выполняет функции «ведомого» элемента, компенсируя только диссипативные потери в системе и мало влияя на закон движения, определяемый механическим колебательным контуром. Поэтому в практике чрезвычайно важно согласовать характеристики

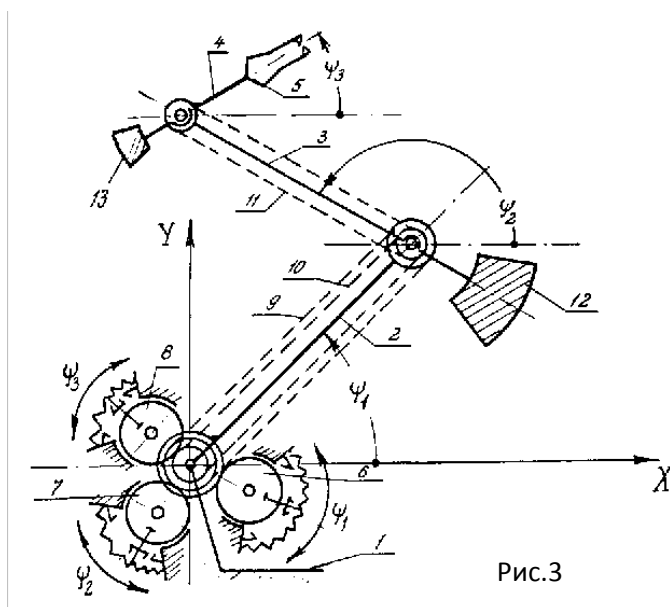


Рис.3

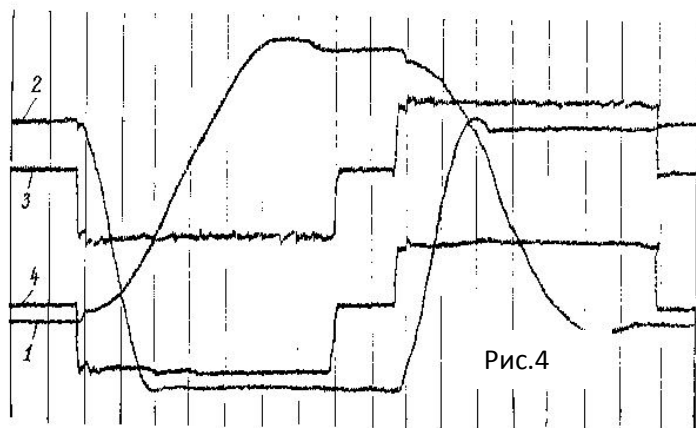
механической колебательной системы со свойствами привода – параметрами двигателя и передаточным отношением редуктора [4]. Для проверки основных положений разработанных инженерных методик синтеза и расчета привода с рекуператорами энергии в цикловых роботах был построен экспериментальный образец, кинематическая схема которого представлена на рис.3. Механизм с тремя степенями подвижности обеспечивает позиционирование захвата в $2^3 = 8$ точках рабочей плоскости. Это частный случай схемы рис.1 при $n = 3$ с выполненными условиями цикличности и ортогональности обобщенных координат Ψ .

Механическая рука установлена на основании и содержит последовательно шарнирно-соединенные звенья 2,3,4 руки и хват 5, укрепленный на звене 4. Звено 2 с помощью вращательной пары связано с основанием 1. Зубчатые колеса 6,7,8 на выходных валах приводов звеньев 2,3,4 руки соответственно являются входными элементами соответствующих приводных кинематических цепей. При этом колесо 6 связано зубчатой передачей со звеном 2, колесо 7 связано зубчатой передачей и тросовой передачей 9 со звеном 3, а колесо 8 связано зубчатой передачей и двумя тросовыми передачами 10 и 11 со звеном 4. На звене 3 установлена уравновешивающая масса 12, а на звене 4 – уравновешивающая масса 13. На основании 1 смонтированы регулируемые фиксаторы, ограничивающие движения колёс 6, 7 и 8.

Рекуператоры показаны на рис.2 и рис.3 лишь схематично. В экспериментальном образце в каждом рекуператоре имеются две пружины, установленные с предварительным натягом, а зоны работы каждой из них разделены упором. Тем самым синтезирована упругая характеристика рекуператора, практически обеспечивающая максимальное быстродействие

при ограничении динамических нагрузок. В данном случае она максимально приближена к кусочно-постоянной. Это приводит к более форсированному режиму движения: ускорение и замедление держатся постоянными и максимально допустимыми на соответствующих интервалах движения. Кроме того, управление фиксаторами и подкачка энергии в систему осуществляется от одного двигателя.

Экспериментально получены законы движения звеньев. Записаны: законы изменений динамически независимых координат $\psi_1(t)$ и $\psi_2(t)$, то есть выходов рекуператоров первого и



второго звеньев руки – кривые 1 и 2 соответственно, а также токи в обмотках двигателей (кривые 3 и 4) звеньев.

Одновременное движение по двум степеням подвижности иллюстрирует осциллограмма на рис.4. Её сравнение с осциллограммами движений только по одной степени подвижности показывает, что характер движений по каждой степени подвижности не изменился.

Экспериментальные исследования образца подтвердили преимущества системы с рекуператорами перед системами, построенными по традиционной схеме, как по критерию быстродействия, так и по потребляемой мощности. При одинаковых характеристиках рекуператоров и мощности двигателей 6 Вт на руке общей массой 2,5 кг получены средние скорости: по первой степени подвижности 6 рад/сек, по второй – 11 рад/сек, по третьей – 20 рад/сек. Эти значения не являются предельными. Таким образом, по сравнению с традиционными конструкциями цикловых роботов рассмотренные технические решения позволяют ориентировочно повысить быстродействие в 3-4 раза при одновременном уменьшении мощности установленных приводов на 1 порядок.

Литература

1. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники. М.: Наука, Кн.1, 2006. 383с.
2. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники. М.: Наука, Кн.2, 2006. 376с.
3. Акинфиев Т.С., Бабицкий В.И., Крупенин В.Л. Манипуляционные системы резонансного типа // Машиноведение, 1982, №1, с.3-8.
4. Акинфиев Т.С. Резонансные манипуляционные системы с электроприводом // Машиноведение, 1983, №6, с.18-23.

Поступила: 12.07.12.