

В результате монополизации конкуренция рано или поздно приведет к обновлению оборудования, снижению средних издержек и цен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казакевич Г. О приватизации естественной монополии // Экономика и мат. методы. — 1998. — Т. 34. — Вып. 2. — С. 74—88.
2. В а с о н R. Lessons from Power Sector Reform in England and Wales // Private Sector, The World Bank Group. — September, 1995.
3. Б а р и н о в В. А. Структуры управления и рыночные отношения в электроэнергетике // Электричество. — 2000. — № 1. — С. 4—19.
4. С е м е н о в В. А. Рынок электроэнергии в Калифорнии, США // Энергетик. — 2000. — № 1. — С. 19—20.
5. П о д к о в а л ь н и к о в С. В. Развитие рыночной электроэнергетики: Обзор зарубежных подходов // Изв. РАН. Энергетика. — 2000. — № 1. — С. 84—91.
6. Б е л я е в Л. С., М а р ч е н к о О. В., Ф и л и п п о в С. П. Энергетика и переход к устойчивому развитию // Изв. РАН. Энергетика. — 1999. — № 5. — С. 43—53.
7. Б ы к Ф. Л., К и т у ш и н В. Г., П а д е р и н А. А. Рыночные структуры организации электроэнергетики // Изв. РАН. Энергетика. — 2000. — № 2. — С. 52—58.
8. В о л к о в Э. П., Б а р и н о в В. А., М а н е в и ч А. С. Основные направления развития электроэнергетики России с учетом долгосрочной перспективы и совершенствования рыночных отношений // Изв. РАН. Энергетика. — 2000. — № 5. — С. 3—44.
9. С е м е н о в В. А. О конкуренции на рынке электроэнергии в Великобритании // Энергетик. — 1998. — № 7. — С. 20—21.
10. П е т р и к о в а Т. Формирование новой системы организации торговли электрической энергией // Промышленная энергетика. — 1998. — № 4. — С. 5—7.

Представлена кафедрой
прикладной информатики

Поступила 6.12.2000

УДК 621.791

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРАМИ С КОНТУРОМ УПРАВЛЕНИЯ ПО СИЛЕ

Ассист. ЩЕРБАК И. Н.

Белорусский государственный университет

В процессе развития науки и техники все большее распространение получают манипуляторы. Практически нет раздела техники, где не использовались бы манипуляторы и системы управления ими. Наиболее часто роботы применяются в таких наукоемких областях, как космонавтика, океанотехника, микроэлектроника, а также в промышленности.

Манипуляторы, используемые в настоящее время, чаще всего имеют только контур управления по позиции. Для повышения точности его движения вдоль заданной траектории, помимо контура управления по позиции, можно построить контур управления по силе, при помощи которого можно компенсировать ошибки, связанные с большими ускорениями, с силами, возникающими при наличии трения, при контакте манипулятора с объектами окружающего пространства. Кроме этого, контур управления

по силе позволяет манипулятору развивать заданную силу в нужном направлении. Это необходимо в таких задачах, как сборка изделий, сварка, раскрой материала, шлифовка или полировка деталей. Для осуществления управления манипулятором с помощью дополнительного контура по силе необходимо использовать силомоментный датчик. Он может встраиваться в губки схвата или непосредственно в схват манипулятора, ими могут оборудоваться одно или несколько звеньев манипулятора, его основание. Иногда данные устройства устанавливаются не на манипуляторе, а на объектах окружающего пространства. Существует большое количество различных силомоментных датчиков, которые способны измерять от одной до шести компонент сил и их моментов. Наиболее широко они представлены в [1, 2].

В некоторых технологических процессах, таких как сборка, транспортировка, сварка, обработка деталей и других требуется использовать два или более манипуляторов, которые должны выполнять совместную работу. Очевидно, что эти манипуляторы объединены общей нагрузкой или объектом и их управление должно осуществляться одной общей системой. Необходимо создать многосвязную систему управления манипуляторами с дополнительным контуром управления по силе. В последние годы разработкой решений задач такого типа занимаются в различных отечественных и зарубежных исследовательских центрах. Предложены различные виды систем управлений с силомоментным очувствлением. В [3] рассмотрена рука с четырьмя пальцами, которая базируется на платформе, способной перемещаться в трех направлениях. Каждый из пальцев состоит из трех звеньев и снабжен силомоментным датчиком, который находится на его конце. Но в системе управления этим манипулятором отсутствует контур управления по силе. Информация силомоментных датчиков используется для определения момента контакта манипулятора с внешней средой, сил, действующих на манипулятор, и измерения веса переносимого объекта. В [4, 5] рассмотрена совместная работа двух и трех манипуляторов. Они имеют контур управления по силе и объединены общей системой управления. Управление ими осуществляется по принципу: один манипулятор – ведущий, а остальные – ведомые. Иными словами, ведущий манипулятор осуществляет запланированное перемещение, а ведомые работают в режиме «податливого» перемещения, т. е. перемещаются в направлении сил, действующих на манипулятор.

Как показали исследования, использование указанных выше способов управления дает недостаточно хорошие результаты. Была предложена новая нелинейная система управления несколькими манипуляторами с дополнительным контуром управления по силе. Данная система осуществляет управление двумя или более манипуляторами, представляя их как единый объект управления, т. е. отсутствуют понятия ведомый и ведущий манипулятор, так как они являются равнозначными и представлены как один общий объект управления. Также используется информация от силомоментных датчиков в контурах управления по силе для уменьшения ошибок перемещения манипуляторов. Схема данной системы управления представлена на рис. 1.

Передаточная матричная функция манипулятора, например шестизвенового, может быть представлена как

$$W_M(S) = \text{diag} \left[\frac{1}{T_{m1}S + 1}, \frac{1}{T_{m2}S + 1}, \dots, \frac{1}{T_{m6}S + 1} \right], \quad (1)$$

где T_{mi} , $i = 1, 2, \dots, 6$ – постоянная времени манипулятора.

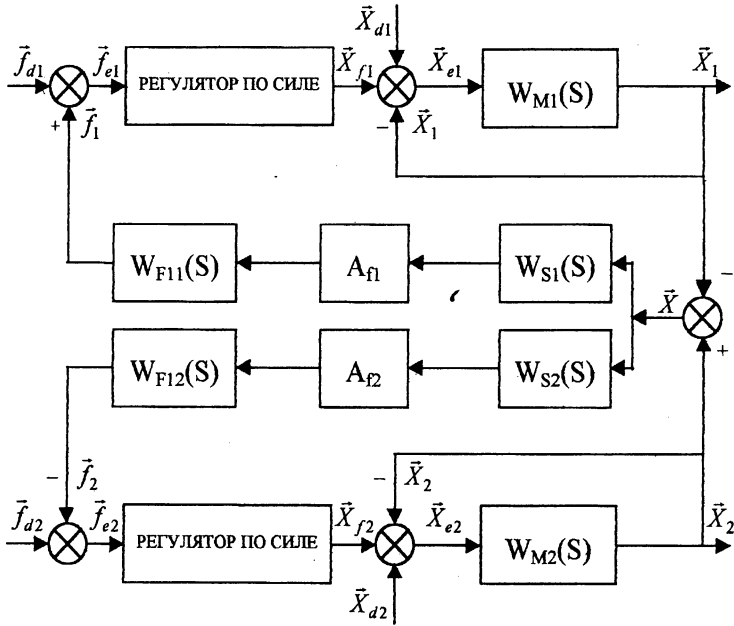


Рис. 1. Структурная схема системы управления двумя манипуляторами с контуром управления по силе

Для построения системы управления манипулятором с внешним контуром по силе, помимо его модели, требуется модель датчика сил и моментов, встроенного в схват. Передаточная матричная функция датчика сил и моментов может быть представлена в виде

$$W_S(S) = \text{diag}[B_1S + k_1, B_2S + k_2, \dots, B_6S + k_6], \quad (2)$$

где B_i и k_i , $i = 1, 2, \dots, 6$ – коэффициенты вязкости и упругости соответственно.

Для преобразования ряда измерений, полученных в вольтах на выходе датчика, в величины, пропорциональные силам и моментам, используется матрица разделения сил и моментов $A[a_{ij}]$, $i = 1, 2, \dots, 6$, $j = 1, 2, \dots, 6$. Сигнал датчика сил и моментов, кроме полезной составляющей, содержит шум, для исключения которого необходимо использовать фильтры с передаточными функциями:

$$W_{F_1}(S) = \text{diag} \left[\frac{1}{T_{F_{11}}S + 1}, \frac{1}{T_{F_{12}}S + 1}, \dots, \frac{1}{T_{F_{16}}S + 1} \right]; \quad (3)$$

$$W_{F_2}(S) = \text{diag} \left[\frac{1}{T_{F_{21}}S + 1}, \frac{1}{T_{F_{22}}S + 1}, \dots, \frac{1}{T_{F_{26}}S + 1} \right], \quad (4)$$

где $T_{F_{1i}}, T_{F_{2i}}, i = 1, 2, \dots, 6$ – постоянные времени первого и второго фильтров соответственно.

На выходе фильтра получаем вектор сил и моментов сил

$$\vec{f} = [f_x, f_y, f_z, M_x, M_y, M_z]^T. \quad (5)$$

Нелинейный регулятор по силе (на рис. 2) содержит два нелинейных звена:

$$F_1(\vec{f}_{ej}) = \text{diag}(|f_{ej1}|, |f_{ej2}|, \dots, |f_{ej6}|); \quad (6)$$

$$F_2(\vec{\eta}_j) = \text{diag}(\text{sign}(\eta_{j1}), \text{sign}(\eta_{j2}), \dots, \text{sign}(\eta_{j6})), \quad (7)$$

где $\vec{\eta}_j = (\eta_{j1}, \eta_{j2}, \dots, \eta_{j6})$, $j = 1, 2$, а также интегратор с передаточной функцией

$$W_I(S) = \text{diag} \left[\frac{K_{I1}}{S}, \frac{K_{I2}}{S}, \dots, \frac{K_{I6}}{S} \right], \quad (8)$$

который необходим, так как регулятор по силе в установившемся режиме должен иметь ошибку \vec{f}_e , равную нулю.

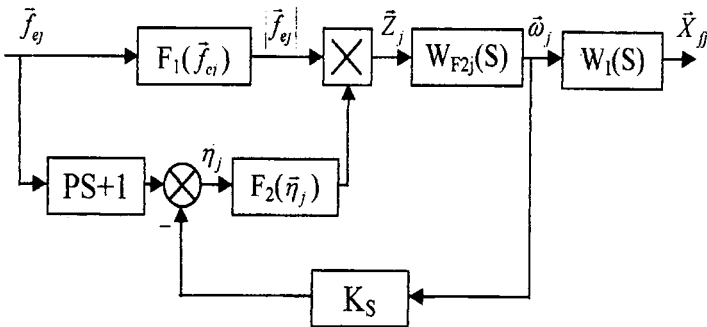


Рис. 2. Структурная схема нелинейного регулятора по силе

Было проведено математическое моделирование переходных процессов, протекающих в системе управления (рис. 1), с нелинейным регулятором по силе (рис. 2), где $j = 1, 2$ – номер манипулятора. Моделирование проводилось для различных перемещений и заданий по силе и показало, что переходные процессы, протекающие в системе управления, монотонны, а система управления устойчива.

Далее внесем в систему управления манипуляторами некоторые изменения: заменим фильтры $W_{F1}(S)$, матрицы разделения сил и моментов $A[a_{ij}]$ и силомоментные датчики $W_S(S)$ обоих манипуляторов наблюдателем силы.

Наблюдатель силы описывается уравнением

$$\vec{f} = \vec{P}(\vec{X}) = \vec{P}(\vec{X}_2 - \vec{X}_1), \quad (9)$$

где $\vec{X}_1 = (x_1, y_1, z_1, n_{x1}, n_{y1}, n_{z1})^T$, $\vec{X}_2 = (x_2, y_2, z_2, n_{x2}, n_{y2}, n_{z2})^T$ – векторы положения первого и второго манипуляторов;

$x_1, y_1, z_1, n_{x1}, n_{y1}, n_{z1}$; $x_2, y_2, z_2, n_{x2}, n_{y2}, n_{z2}$ – компоненты векторов положения первого и второго манипуляторов, причем первые три компоненты описывают положения центров схватов манипуляторов, а последние три – ориентацию схватов манипуляторов.

Наблюдатель силы рассчитывает значения сил и их моментов, действующих на манипуляторы, в зависимости от положений последних, не используя информацию, поступающую с силомоментных датчиков. Он может применяться в системе управления манипуляторами как вместо силомоментных датчиков, так и совместно с ними. Следует отметить, что наблюдатель силы не может заменить силомоментные датчики во всех случаях. Так, например, использовать наблюдатель силы без силомоментных датчиков можно при переносе манипуляторами какого-либо объекта. Но при столкновении манипулятора или манипуляторов с препятствием, местоположение которого точно неизвестно, лишь наблюдателя силы недостаточно. В этом случае необходимы силомоментные датчики для фиксации момента столкновения и местоположения препятствия. Также возможно применение наблюдателя силы и силомоментных датчиков как дублирующих друг друга систем для уменьшения ошибок по силе и увеличения точности обработки заданных сил и их моментов.

Рассчитаем первую и вторую производные силы:

$$\dot{\vec{f}} = R(\vec{X})\dot{\vec{X}}; \quad (10)$$

$$\ddot{\vec{f}} = R(\vec{X})\ddot{\vec{X}} + \dot{R}(\vec{X})\dot{\vec{X}}. \quad (11)$$

Опишем все составляющие вектора \vec{f} (будем считать, что взаимовлияний измерений нет):

$$f_x = k_{fx}(x_1 - x_2 - l_x); \quad (12)$$

$$f_y = k_{f_y}(y_1 - y_2 - l_y); \quad (13)$$

$$f_z = k_{f_z}(z_1 - z_2 - l_z); \quad (14)$$

$$M_x = n_{y1}k_{M_z}(n_{z1} - n_{z2} - n_{z0}) - n_{z1}k_{M_y}(n_{y1} - n_{y2} - n_{y0}); \quad (15)$$

$$M_y = n_{z1}k_{M_x}(n_{x1} - n_{x2} - n_{x0}) - n_{x1}k_{M_z}(n_{z1} - n_{z2} - n_{z0}); \quad (16)$$

$$M_z = n_{x1}k_{M_y}(n_{y1} - n_{y2} - n_{y0}) - n_{y1}k_{M_x}(n_{x1} - n_{x2} - n_{x0}), \quad (17)$$

где $l_x, l_y, l_z, n_{x0}, n_{y0}, n_{z0}$ – компоненты вектора \vec{L} , который равен разнице векторов \vec{X}_1 и \vec{X}_2 в момент начала манипуляций;

$k_{f_x}, k_{f_y}, k_{f_z}, k_{M_x}, k_{M_y}, k_{M_z}$ – коэффициенты пропорциональности для компонент сил и моментов сил соответственно, которые находятся экспериментальным образом.

Как видно из (12)–(17), силы, действующие на манипулятор, определяются изменением координат манипуляторов, а моменты сил, действующие на манипуляторы, – изменением ориентации схватов манипуляторов.

Рассмотрим систему управления манипуляторами с наблюдателем силы в контуре управления по силе, структурная схема которой представлена на рис. 3. Из нее видно, что

$$T_{M1}\ddot{\vec{X}}_1 + \dot{\vec{X}}_1 = \vec{X}_{d1} + \vec{X}_{f1} - \vec{X}_1; \quad (18)$$

$$T_{M2}\ddot{\vec{X}}_2 + \dot{\vec{X}}_2 = \vec{X}_{d2} + \vec{X}_{f2} - \vec{X}_2. \quad (19)$$

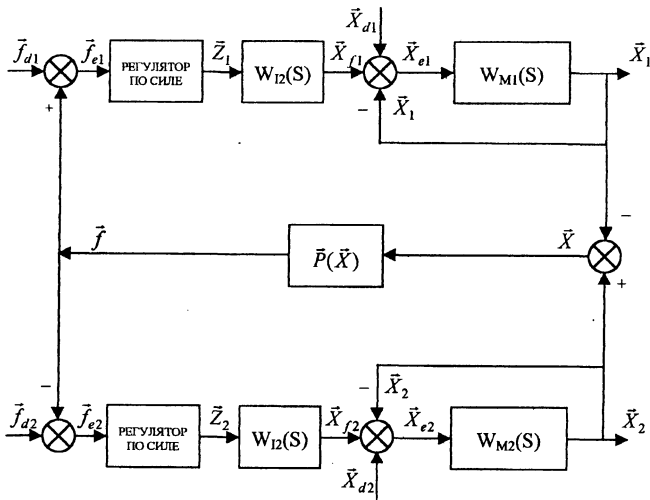


Рис. 3. Структурная схема системы управления двумя манипуляторами с наблюдателем силы в контуре управления по силе

Будем считать, что параметры манипуляторов идентичны. В этом случае можно записать $T_{M1} = T_{M2} = T_M = \text{diag}[T_{m1}, T_{m2}, \dots, T_{m6}]$. Кроме этого, принимаем, что скорость перемещения манипуляторов невелика, т. е. $\dot{X}_{d1} \approx 0$; $\dot{X}_{d2} \approx 0$. Используя разность уравнений (18) и (19) и продифференцировав ее, получим уравнение вида

$$T_M \ddot{X} + 2\dot{X} = \dot{X}_f, \quad (20)$$

где

$$\dot{X}_f = \dot{X}_{f2} - \dot{X}_{f1}.$$

Из структурной схемы при условии, что $W_{I1}(S) = W_{I2}(S) = W_I(S)$, следует

$$\dot{X}_f = K_I \bar{Z}, \quad (21)$$

где

$$K_I = \text{diag}[k_{I1}, k_{I2}, \dots, k_{I6}].$$

Кроме этого, из структурной схемы можно видеть, что

$$\bar{f}_e = \bar{f}_{e2} - \bar{f}_{e1} = (\bar{f}_{d2} - \bar{f}) - (\bar{f}_{d1} + \bar{f}). \quad (22)$$

При условии, что $\bar{f}_{d2} = \bar{f}_{d1} = 0$, уравнение (22) можно переписать в виде

$$\bar{f}_e = -2\bar{f}. \quad (23)$$

В качестве регуляторов по силе будем использовать схемы, дающие на выходе сигнал [6]

$$\bar{Z} = H\bar{f}_e + D\dot{\bar{f}}_e. \quad (24)$$

С учетом (21), (23) и (24) выразим из (20) значение \ddot{X}

$$\ddot{X} = -2T^{-1}K_I(H\bar{f} + D\dot{\bar{f}}) - 2T^{-1}\dot{X}. \quad (25)$$

Перепишем (11) с учетом (25), предварительно выразив значение \dot{X} из (10). В результате получим

$$\ddot{f} + 2T^{-1}\dot{f} + 2T^{-1}K_I R(\bar{X})D\dot{f} - \dot{R}(\bar{X})R^{-1}(\bar{X})\dot{f} + 2T^{-1}K_I R(\bar{X})H\bar{f} = 0. \quad (26)$$

Выберем параметры матриц H и D следующим образом:

$$H = R^{-1}(\bar{X}); \quad (27)$$

$$D = 0,5R^{-1}TK_I^{-1}\dot{R}(\bar{X})R^{-1}(\bar{X}). \quad (28)$$

При выборе матриц H и D в соответствии с (27) и (28) уравнение (26) будет иметь вид

$$T\ddot{f} + 2\dot{f} + 2K_I \bar{f} = 0. \quad (29)$$

Из (29) можно определить элементы матрицы K_I , которые обеспечили бы в системе управления манипуляторами монотонные переходные процессы, что возможно при $k_{ji} < 0,5T_{mi}^{-1}$, где $i = 1, 2, \dots, 6$. Далее для улучшения качества переходных процессов воспользуемся идеями теории с переменной структурой (СПС). Видоизменим регулятор по силе, введя в него нелинейные звенья, передаточные характеристики которых описываются (6) и (7). В результате получим нелинейный регулятор по силе (рис. 4). Из рис. 4 видно, что

$$\bar{z}_j = H\bar{U}_j + D\dot{f}_{ej}; \quad (30)$$

$$\bar{U}_j = [|f_{j1}| \text{sign}(\eta_{j1}), |f_{j2}| \text{sign}(\eta_{j2}), \dots, |f_{j6}| \text{sign}(\eta_{j6})]^T; \quad (31)$$

$$\bar{\eta}_j = P\dot{f}_{ej} + \bar{f}_{ej}, \quad (32)$$

где $P = \text{diag}[P_1, P_2, \dots, P_6]$, $j = 1, 2$ – номер манипулятора.

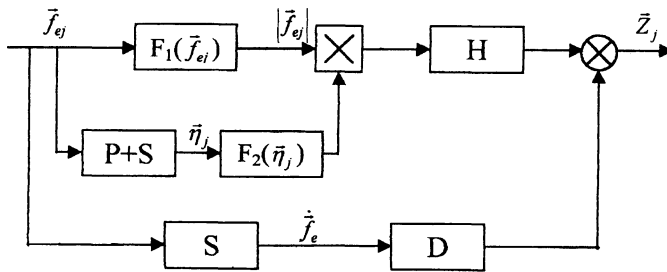


Рис. 4. Структурная схема нелинейного регулятора по силе

Перепишем уравнение (29) для нелинейного регулятора по силе

$$T\ddot{f} + 2\dot{f} + 2K_I \bar{U} = 0, \quad (33)$$

где

$$\bar{U} = [|f_1| \text{sign}(\eta_1), |f_2| \text{sign}(\eta_2), \dots, |f_6| \text{sign}(\eta_6)]^T. \quad (34)$$

ВЫВОД

Проведенное математическое моделирование показало, что предложенная система управления манипуляторами с наблюдателем силы и нелинейным регулятором по силе устойчива, а переходные процессы, протекающие в ней, монотонны. Кроме этого следует отметить, что в системе управления с нелинейным регулятором по силе ошибки по перемещению и по силе, а также время переходных процессов меньше, чем в такой же системе управления, но с линейным регулятором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Системы осязания и адаптивные промышленные роботы / Под ред. Е. П. Попова, В. В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1985. – 255 с.
2. Produkteigenschaften und Anwendungen auf 300 Seiten // Ind.-Anz. – 1998. – Sonderausg.: Produktreport. – № 2. – P. 186.
3. Fischer Th., Rahela D., Woern H. Sensor-Based Controlling of the Objects' Pose for Multifinger Grippers // IEEE International Symposium of Intelligent Control, 1999.
4. Шнейдер А. Ю. Использование информации об усилиях в управлении манипуляционными и шагающими роботами: Дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01. – М., 1989. – 383 с.
5. Path planning and control of a cooperative three-robot system manipulating large objects / Tzafectas Costas S., Prokopiov Platon A., Tzafestas Spyros G // J. Intell. And Rob. Syst. – 1998. – 22, № 2. – P. 99–116.
6. Маркина Л. И., Щербак И. Н. Система управления для двух манипуляторов с силомоментным осязанием // Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр. – Мн.: Белгосуниверситет, 1996. – Вып. II. – С. 185–189.

Представлена кафедрой
кибернетики

Поступила 1.02.2001