

УДК 62-50

А.А. Шаповалов, А.Д. Курмашев

## Контурная система согласованного управления промышленным роботом

Представлен пример реализации контурной системы согласованного управления промышленным роботом. Рассмотрены основные структуры контурных систем управления. Предложены способы стабилизации программного движения электроприводов роботов. Предложено наблюдающее устройство, решающее задачу позиционирования в контурной системе согласованного управления.

**Ключевые слова:** контурное управление, промышленный робот, манипулятор.

### Задача оптимизации управления электроприводами промышленного робота

Многие современные технологии обработки изделий, такие как шовная электродуговая и лазерная сварка, микроплазменная и гидроструйная резка, сборка и абразивная обработка пространственно-сложных изделий, требуют движения инструмента по траекториям сложной формы с высокой точностью и с заданной скоростью. Для выполнения таких операций сегодня применяются технологические промышленные роботы (ПР). Развитие технологий обработки ведет к необходимости увеличения скорости и точности перемещения исполнительного органа ПР по заданной траектории, что предъявляет новые требования к качеству движения ПР и реализации контурных систем управления.

Управление ПР имеет ряд отличий от управления другими промышленными объектами. ПР представляет собой пространственную мехатронную нелинейную систему с перекрестными связями, что делает его сложным техническим объектом управления. Нелинейность кинематической схемы, свойственная большинству роботов, и значительный рост динамических ошибок электроприводов координат при повышении скорости движения, накладывают существенные ограничения на величину скоростей и ускорений в разных точках рабочего пространства. Поэтому актуальной является задача оптимизации управления электроприводами ПР с целью минимизации ошибок воспроизведения в условиях повышения контурных скоростей и ограничений на энергетические, информационные и вычислительные ресурсы.

### Экспериментальная установка

В статье рассматривается задача оптимизации управления на примере экспериментального образца ПР, построенного на базе отечественного манипулятора ТУР-10К. Структурная схема экспериментального образца представлена на рис. 1, где БУЭП – блок управления электроприводами, КП1-КП5 – координатные приводы, ТГ1-ТГ5 – тахогенераторы, ДП1-ДП5 – датчики положения. ПР состоит из манипулятора и специально разработанной системы числового программного управления (СЧПУ). Механизм манипулятора состоит из пяти вращательных кинематических пар и имеет вертикально-ангулярную кинематическую схему. Такие манипуляторы способны выполнять сложные пространственные движения, но вместе с тем исключительно сложны в управлении. Кроме того, звенья механизма статически нагружены, что сказывается на точности движений. СЧПУ представляет собой трехуровневую систему управления, в состав которой входят:

1) Управляющий ПК (верхний уровень) – персональный компьютер общего назначения с операционной системой Microsoft Windows и специально разработанным программным обеспечением (ПО). ПО предназначено для выполнения функций человеко-машинного интерфейса: а) ввод конфигурации системы управления; б) ввод программы траектории; в) ввод параметров воспроизведения траектории; г) подготовка параметров системы управления и программы траектории для контроллера ЧПУ; д) управление воспроизведением траектории; е) регистрация действительной траектории.

2) Контроллер ЧПУ (средний уровень) – микропроцессорный контроллер, в состав которого входят: а) 16-разрядный микроконтроллер Infineon (Siemens) C167; б) 32-разрядный математический сопроцессор с плавающей точкой; в) интерфейс CAN; г) 27 дискретных каналов ввода-вывода; д) последовательный интерфейс RS-232. Контроллер ЧПУ обеспечивает выполнение следующих

функций: а) обмен данными с управляющим ПК по интерфейсу RS-232; б) решение траекторной задачи; в) реализация алгоритмов управления; г) передача управляющих воздействий в КП по шине CAN; д) опрос датчиков положения и концевых выключателей.

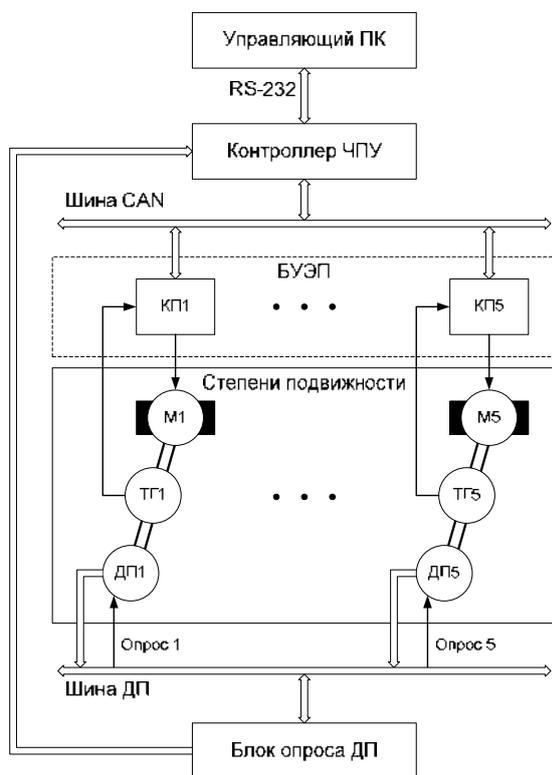


Рис. 1. Структурная схема экспериментального образца ПР

управляющей программе, с учетом уставки по контурной скорости;

2) разложение программного движения на координатные составляющие (задающие воздействия каналов управления);

3) отслеживание составляющих движения координатными электроприводами;

4) сложение движений электроприводов механизмами робота.

Графическая интерпретация этого метода представлена на рис. 2, где  $L^*$  – программная траектория движения;  $V_k^*$  – заданная контурная скорость;  $\bar{r}^*$  – вектор программных декартовых координат;  $T^{-1}(\bar{r}^*)$  – обратная задача кинематики для координат;  $\bar{q}^*, \bar{q}$  – векторы программных и действительных обобщенных координат;  $\bar{e}$  – вектор ошибок электроприводов;  $\bar{U}$  – вектор управления.

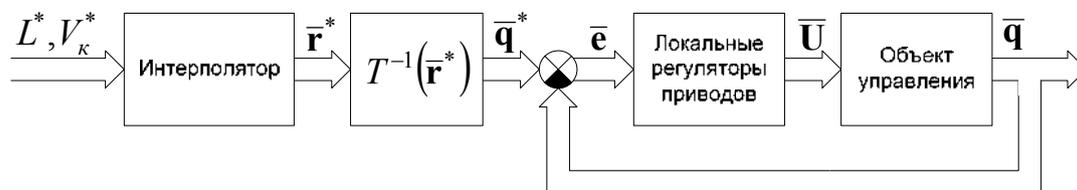


Рис. 2. Структурная схема традиционных систем ЧПУ

При этом СЧПУ реализует два первых этапа независимо от того, как реализуется выполнение двух последних этапов. Это делает структуру таких систем в целом разомкнутой со всеми присутствующими недостатками [2, 3]. Отсутствие контроля контурной ошибки ограничивает функциональные возможности системы и показатели качества воспроизведения программной траектории. Накапливающиеся погрешности, возникающие при интерполяции, не устраняются. Нелинейность и неиден-

точность приводов являются практически некомпенсируемыми возмущениями. Существенна связь между точностью воспроизведения траектории и контурной скоростью.

Указанные недостатки предлагается устранить в рассматриваемой в данной статье контурной системе согласованного управления (КССУ). В системе используется активный принцип согласования каналов управления [4], который заключается в использовании информации об ошибке воспроизведения траектории  $\bar{\epsilon}$  в многосвязном общесистемном регуляторе и предусматривает согласование управляющих воздействий. Благодаря этому в системе присутствует внешний контур, который делает ее структуру замкнутой в целом. Для СЧПУ станков и ПР такой подход осуществляется использованием действительных координат при решении интерполяционной задачи. Обобщенная структура системы согласованного управления представлена на рис. 3.

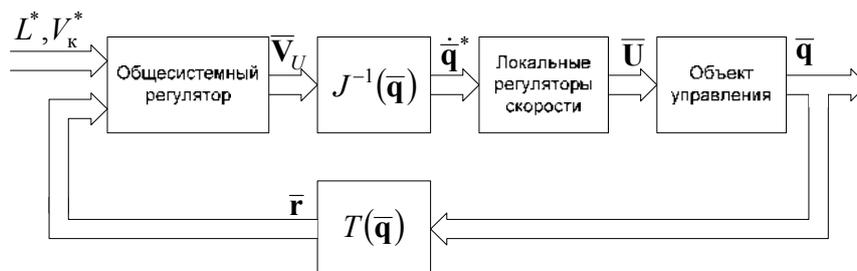


Рис. 3. Структурная схема системы согласованного управления:  $\bar{V}_U$  – вектор управления движением по траектории в декартовом пространстве

В основу структурно-алгоритмической организации КССУ положена неявная форма задания траектории [3]:

$$L^* = \left\{ \bar{r} \in R^3 \right\} : \begin{cases} \varphi_1(\bar{r}) = 0, \\ \varphi_2(\bar{r}) = 0, \\ V_k^* = V_k^*(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{r} = (x, y, z)^T$  – вектор декартовых координат;  $\varphi_1, \varphi_2$  – уравнения задающих поверхностей. Положение исполнительного органа определяется пересечением задающих поверхностей с требуемой точностью  $\epsilon_k^*$  в окрестности программной траектории (рис. 4, а).

В КССУ используется следующая декомпозиция цели на частные функции:

- 1) генерация контурного (продольного) движения по траектории  $\bar{V}_T(t)$ ;
- 2) генерация стабилизирующего (поперечного) движения  $\bar{V}_N(t)$ , обеспечивающего минимизацию контурной ошибки  $\epsilon_k \rightarrow 0$ ;
- 3) разложение вектора управления  $\bar{V}_U = \bar{V}_T + \bar{V}_N$  на координатные составляющие;
- 4) сложение координатных движений электроприводов механизмами ПР.

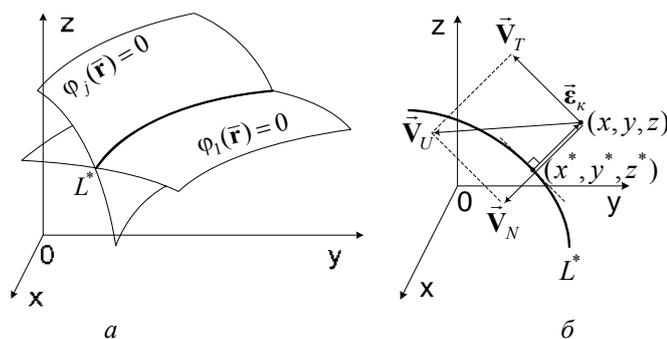


Рис. 4. Геометрическая интерпретация метода управления

Геометрическая интерпретация этого метода представлена на рис. 4, б.

При таком подходе имеется возможность независимого регулирования самого движения по траектории и точности этого движения. Вектор  $\bar{V}_T$ , обеспечивающий продольное движение вдоль заданного контура, является касательным к траектории и определяется из уравнений задающих поверхностей:

$$\bar{V}_T = \frac{\nabla\varphi_1 \times \nabla\varphi_2}{|\nabla\varphi_1 \times \nabla\varphi_2|} V_k, \quad \nabla\varphi_1 = \left( \frac{\partial\varphi_1}{\partial x} \quad \frac{\partial\varphi_1}{\partial y} \quad \frac{\partial\varphi_1}{\partial z} \right)^T, \quad \nabla\varphi_2 = \left( \frac{\partial\varphi_2}{\partial x} \quad \frac{\partial\varphi_2}{\partial y} \quad \frac{\partial\varphi_2}{\partial z} \right)^T. \quad (2)$$

Стабилизирующая составляющая  $\bar{V}_N$ , обеспечивающая минимизацию отклонения, является ортогональной к траектории и может быть сформирована различными путями исходя из требований к динамике контурной ошибки [2, 3, 5].

Недостатком структуры КССУ является отсутствие в ней контуров абсолютного положения, что лишает такую систему свойства позиционирования. Для решения этой проблемы в рассматриваемой СЧПУ разработано наблюдающее устройство абсолютного положения.

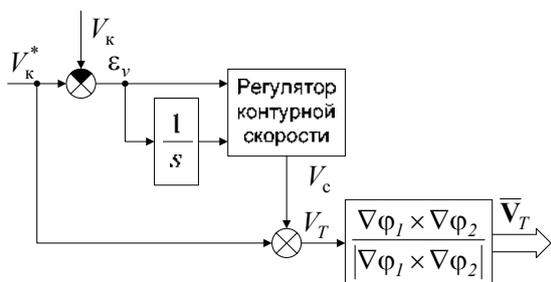


Рис. 5. Регулятор контурного движения

Регулятор контурного движения формирует вектор управления  $\bar{V}_T$ , который обеспечивает движение исполнительного органа ПР по заданной программной траектории, и выполняет стабилизацию контурной скорости  $V_k$ . Структурная схема регулятора представлена на рис. 5, где:  $\epsilon_v$  – расхождение по контурной скорости;  $V_c$  – стабилизирующая составляющая контурной скорости. В рассматриваемой СЧПУ в качестве регулятора контурной скорости применен ПИ-регулятор.

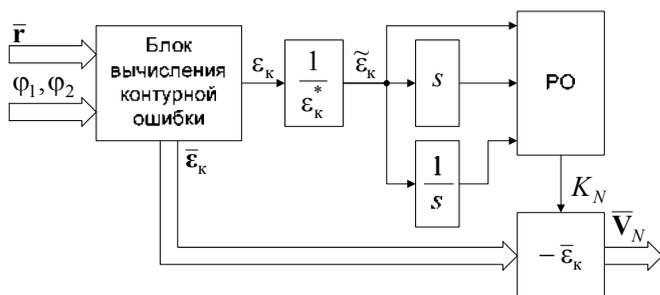


Рис. 6. Регулятор траектории

траектории:

$$\bar{\epsilon}_k = \bar{\epsilon}_k(L^*, \bar{r}), \quad \bar{V}_N = \bar{V}_N(\bar{\epsilon}_k) \tag{3}$$

Структурная схема регулятора траектории представлена на рис. 6, где:  $\tilde{\epsilon}_k$  – нормированная контурная ошибка; РО – регулятор отклонения;  $K_N$  – коэффициент усиления. Методом имитационного моделирования [6] исследована возможность использования в качестве РО классического ПИД-регулятора и нечеткого регулятора (НР). Использование интегральной составляющей не представляется возможным, так как из определения контурной ошибки следует, что  $\epsilon_k \geq 0$ . Дифференциальная составляющая не вносит ощутимого вклада в увеличение точности движения, а лишь повышает колебательность. По результатам исследований для реализации в рассматриваемой СЧПУ были выбраны П-регулятор и ПД-подобный НР.

Траектория движения исполнительного органа ПР, как правило, состоит из отдельных типовых элементов. Завершив воспроизведение одного элемента, СЧПУ должна начать воспроизведение следующего. Отсутствие контуров абсолютного положения в КССУ не позволяет ей определять конечную точку элемента траектории. Для выполнения этой функции разработано наблюдающее устройство за абсолютным положением. Заданными значениями для наблюдающего устройства служат: программная траектория движения  $L^*$ , допустимое отклонение от программной траектории  $\epsilon_{max}^*$ . Входными измеренными значениями являются: действительное положение характеристической точки ПР  $\bar{r}$ , величина контурной ошибки  $\epsilon_k$ . Выходами являются логические значения:  $f$  – достиг-

нута конечная точка траектории,  $s$  – останов движения. Задачей наблюдающего устройства является расчет логических значений  $f$  и  $s$  по выражениям (4)–(6).

$$r_{\text{КТ}} = |\bar{\mathbf{r}}_{\text{КТ}} - \bar{\mathbf{r}}|, \quad \varepsilon_{\text{КТ}} = \Phi_{\text{КТ}}(\bar{\mathbf{r}}), \quad (4)$$

$$\text{ЕСЛИ } \varepsilon_{\text{КТ}} > \varepsilon_{\text{МАХ}}^*, \text{ ТО } s=1, \quad (5)$$

$$\text{ЕСЛИ } r_{\text{КТ}} \leq \varepsilon_{\text{МАХ}}^* \text{ И } \varepsilon_{\text{КТ}} \leq 0, \text{ ТО } f=1, \quad (6)$$

где  $r_{\text{КТ}}$  – расстояние между действительным положением характеристической точки ПР и конечной точкой траектории;  $\Phi_{\text{КТ}}$  – плоскость, ортогональная программной траектории в ее конечной точке;  $\varepsilon_{\text{КТ}}$  – отклонение от плоскости  $\Phi_{\text{КТ}}$ .

#### Экспериментальная часть

На рис. 7 показаны графики изменения координат  $X$ ,  $Y$  и контурной ошибки  $\varepsilon_{\text{К}}$  при движении исполнительного органа ПР по линейной траектории с использованием П-регулятора и НР качества РО.

#### Заключение

Результатом работы является экспериментальная модель контурной системы согласованного управления электроприводами ПР, разработанная на базе современных аппаратных средств. Представленная система является подтверждением возможности практической реализации алгоритмов согласованного управления, рассматриваемых в [2–4, 6]. Модульный принцип построения программных средств, применение языка программирования высокого уровня обеспечивает переносимость и адаптацию управляющих алгоритмов для их использования в конкретной задаче без значительных изменений в структуре программ. Используемые в работе алгоритмы согласованного управления и регулирования движения могут быть положены в основу разработки СЧПУ ПР, соответствующей требованиям, предъявляемым современной промышленностью.

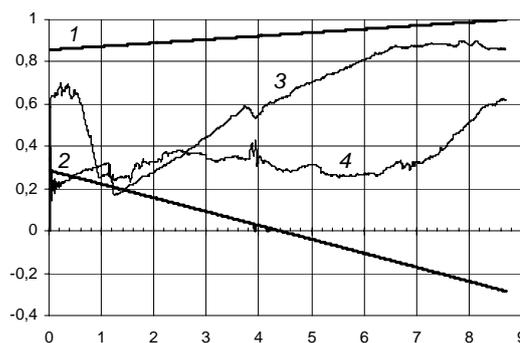


Рис. 7. Движение по линейной траектории: 1 –  $X$ , мм×700; 2 –  $Y$ , мм×700; 3 –  $\varepsilon_{\text{К}}$ , мм, для П-регулятора; 4 –  $\varepsilon_{\text{К}}$ , мм, для НР

#### Литература

1. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. – М.: Питер, 2006. – 271 с.
2. Беляев А.Н. Замкнутые системы ЧПУ роботами / А.Н. Беляев, А.Д. Курмашев, О.А. Соколов // Системы управления и электроприводы роботов: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: Воронеж. политехн. ин-т., 1989. – С. 66–73.
3. Соколов О.А. Оптимизация микропроцессорного управления программным движением многокоординатных технологических объектов: тр. 33-й Междунар. науч. коллоквиума. – Ильменау, 1988. – С. 285–288.
4. Шаповалов А.А. Согласованное управление электроприводами промышленного робота / А.А. Шаповалов, А.Д. Курмашев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – № 3 (59). – С. 257–264.
5. Hasegawa K. On the path control with autonomous trajectory generation / K. Hasegawa, T. Mizutani // Keisoku Jido-seigyō Gakkai Ronbunshu. – 1982. – Vol. 18, №4. – С. 425–432.
6. Шаповалов А.А. Компьютерное моделирование контурных систем управления электроприводами промышленных роботов / А.А. Шаповалов, А.Д. Курмашев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 6.1 (138). К 35-летию образования факультета технической кибернетики. – С. 84–92.

#### Шаповалов Андрей Анатольевич

Ассистент каф. систем автоматического управления СПбГПУ, г. Санкт-Петербург

Тел.: 8 (812) 297-59-60

Эл. почта: aa\_shapovalov@mail.ru

**Курмашев Арон Даутханович**

Канд. техн. наук, доцент каф. систем автоматического управления СПбГПУ

Тел.: 8 (812) 297-59-60

Эл. почта: kurmashev@saugtu.nord.nw.ru

Shapovalov A.A., Kurmashev A.D.

**Contouring system of coordinated control of an industrial robot**

In this paper an example implementation of contouring system of coordinated control of an industrial robot is presented. Basic structures of contouring control systems are considered. Approaches of stabilization of programmatic motion of electric drives of a robot are proposed. Observing device, solving the problem of positioning in contouring system of coordinated control, is proposed.

**Keywords:** contouring control, industrial robot, manipulator.

---