

# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩИМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Н.В. Гусев

Томский политехнический университет

[Gusev@tpu.ru](mailto:Gusev@tpu.ru)

Научный руководитель: В.Г. Букреев, д.т.н., профессор

Разработчики современных систем числового программного управления (ЧПУ) выделяют 5 основных архитектурных вариантов, которые существуют на рынке [1]. Первый вариант – это классические системы CNC (Computer Numerical Control). Такие системы выпускаются фирмами с богатой традицией производства высококачественной собственной микроэлектронной аппаратуры. Однако эти фирмы под влиянием пользователей технологического оборудования, желающих иметь гибкий интерфейс оператора, предлагают модификацию PCNC-1 (Personal Computer Numerical Control) с персональным компьютером в качестве терминала (второй вариант). Следующим шагом в развитии систем с ЧПУ стала реализация двухкомпьютерного варианта PCNC-2 (третий вариант). Несколько позднее появились системы PCNC-3, ядро которых реализовано на отдельной плате, устанавливаемой в корпусе промышленного персонального компьютера (четвертый вариант). С бурным развитием микропроцессорной техники и повышением производительности микропроцессоров все большее распространение получает однокompьютерный (пятый) вариант системы PCNC-4. Особенность однокompьютерного варианта заключается в том, что все задачи управления (геометрическая, логическая, терминальная) решаются программным путем без какой-либо дополнительной аппаратной поддержки.

Сравнительная оценка отечественных разработок систем класса PCNC показала, что подавляющее большинство применяемых сервоконтроллеров обычно выполняется из зарубежных модулей, где законы управления движением прошиты и недоступны пользователю для их модификации. Отечественные же разработки ограничены лишь двумя видами интерполяции – линейная и круговая, а также ставшими уже классическими прямоугольным и трапециидальным законами разгона торможения. В ряде случаев классические законы управления следящими электроприводами, как например, в установках лазерного раскроя листовых материалов или гравировки не позволяют достичь требуемых динамических характеристик электромеханических систем – минимальной ошибки отработки заданной траектории движения при максимальном быстродействии и ограничениях скорости и ускорения. Так, например, ошибки поддержания заданной контурной скорости при раскрое материалов могут проявиться в виде значительно большего оплавления кромки траектории движения лазерного луча либо в виде отсутствия заданной глубины резки.

В отличие от линейной или круговой интерполяции применение кубической сплайн интерполяции для описания заданной траектории движения и формирования гладкого закона разгона или торможения позволяет достичь максимального быстродействия и плавности движения, а также учесть ограничение рывка (величины удара) на требуемом уровне.

Для минимизации динамической ошибки следящей системы и повышения точности отработки траектории движения целесообразно использовать теорию комбинированных автоматических систем управления. Данная теория показывает, что введение в систему сигналов, пропорционального первой, второй, третьей и т.д. производным управляющего воздействия, позволяет значительно снизить динамическую ошибку системы.

В соответствии с вышесказанным, задачей настоящего проекта является разработка: алгоритма расчета кубического сплайна, алгоритма формирования гладкого закона разгона/торможения для достижения наилучшего соотношения – максимального быстродействия и плавности движения привода, синтез алгоритма сигнальной адаптации представляющего собой цифровое корректирующее устройство (ЦКУ) для минимизации динамической ошибки следящей системы, а также разработка опытных образцов сервоконтроллеров.

В общем виде кубическим сплайном, интерполирующем на отрезке  $[a, b]$  данную функцию  $f(x)$  называется функция вида:

$$g(x) = \left\{ g_k(x) = a_k + b_k(x - x_k) + c_k(x - x_k)^2 + d_k(x - x_k)^3 \text{ при } x \in [x_{k-1}, x_k] \right\}_{k=1}^n, \quad (1)$$
 удовлетворяющая совокупности условий: а) равенство  $g(x_k) = f_k$  (условие интерполяции в узлах сплайна); б)  $g(x) \in C^2[a, b]$  (двойная непрерывная дифференцируемость); в) равенство  $g''(a) = g''(b) = 0$  (краевые условия).

Расчет коэффициентов  $a_k, b_k, c_k, d_k$  сплайна может быть произведен с помощью различных методик, например методом прогонки [2]. Существенным недостатком этого метода являются значительное время расчета вследствие наличия двух циклов прогонки – прямого и обратного, повышение требований к микропроцессорам, громоздкость вычислительного алгоритма. С целью снижения требований к вычислительным устройствам в статье предлагается алгоритм расчета коэффициентов, который не требует наличия двух циклов прогонки. Особенностью предлагаемого алгоритма является разбиение исходной последовательности точек  $x_n$  на интервалы по 4 точки, нахождение коэффициентов и построение сплайн-функции для каждого из этих интервалов. Коэффициенты  $a_k, b_k, c_k, d_k$  определяются по следующим выражениям:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= \frac{f_0 - a_1}{L_1} + 2d_1L_1^2, \\ d_1 &= \frac{f_2 - a_2 - \frac{(f_0 - a_1)L_3}{L_1} - \left[ \frac{f_1 - a_2}{L_2^3} - \frac{f_0 - a_1}{L_2^2L_1} \right] L_2L_3(3L_2 + 2L_3)}{2L_1^2L_3 + L_1L_3(6L_2 + 2L_3) - \left[ \frac{3L_1}{L_2} + \frac{2L_1^2}{L_2^2} \right] L_2L_3(3L_2 + 2L_3)}, \\ d_2 &= \frac{f_1 - a_2}{L_2^3} - \frac{b_1}{L_2^3} - \frac{3d_1L_1}{L_2}, \\ b_2 &= b_1 + 6d_1L_1L_2 + 3d_2L_2^2, \\ d_3 &= \frac{-d_1L_1 - d_2L_2}{L_3}, \\ c_2 &= 3d_3L_3, c_1 = -3d_1L_1, c_3 = 0, \\ b_3 &= b_1 - 2c_2L_2 - 3d_2L_2^2 - 3d_3L_3^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $L_i$  – длины отрезков между соседними точками 4-х точечного интервала,  $f_i$  – значение функции в узловых точках. Сравнительный анализ быстродействия алгоритма прогонки и рассмотренного выше алгоритма показал увеличение быстродействия предложенного алгоритма в среднем на 76%.

Для повышения плавности движения исполнительного механизма в динамических режимах обусловленных участками разгона или торможения предложена программа управления скоростью движения. С целью достижения наилучшего соотношения – максимального быстродействия и плавности движения привода при разгоне или торможении предлагается сформировать кривую изменения ускорения  $a(t)$  с учетом задания по скорости и ограничений на ускорение, как показано на рисунке 1.

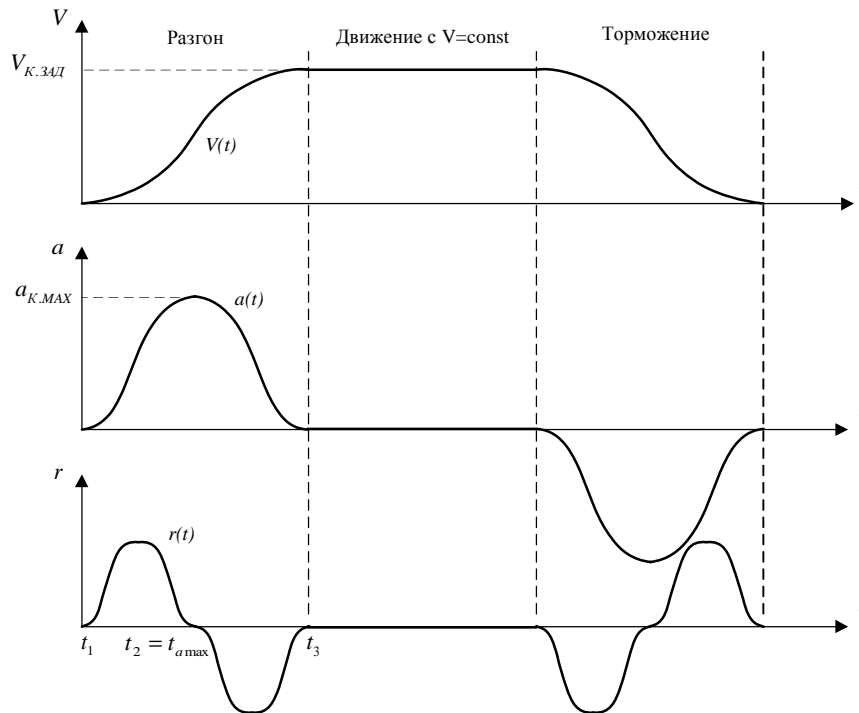


Рис. 1. Кривые изменения контурной скорости ( $V$ ), ускорения ( $a$ ) и рывка ( $r$ ) во времени при разгоне, движении с постоянной скоростью и торможении

Особенностью алгоритма управления скоростью является определение закона изменения ускорения при разгоне или торможении в виде функции

$$a(t) = A \cdot t^2 + B \cdot t + C, \quad (3)$$

где  $A, B, C$  – коэффициенты функции описывающей закон изменения ускорения во времени. Расчет функции (3) выполняется на основе заданных ограничений по скорости, ускорению, а также данных траектории движения, представленной сплайном. В виду того, что изменение скорости и ускорения в процессе разгона или торможения является нелинейной функцией и однозначно определить время выхода в заданную точку невозможно, то коэффициенты функции (3) определяются предварительно на этапе планирования движения на текущем участке траектории. Таким образом, исходными данными алгоритма формирующего задание по положению являются группа коэффициентов описывающих сплайн-функцию вида (1) и коэффициенты функции (3).

Программно-реализованный алгоритм сигнальной адаптации представляет собой цифровое корректирующее устройство задающих сигналов для следящего электропривода. Упрощенная структурная схема следящего электропривода с ЦКУ показана на рис. 2. Введение ЦКУ позволяет обеспечить сигнальную адаптацию с вычислением первой, второй и третьей производных задающего воздействия. Такой электропривод является комбинированной следящей системой, обеспечивающей инвариантность относительно задающего воздействия четвертого порядка. Передаточная функция ЦКУ имеет вид

$$D(z) = a_1 \cdot (1 - z^{-1}) + a_2 \cdot (1 - z^{-1})^2 + a_3 \cdot (1 - z^{-1})^3, \quad (4)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты ЦКУ определяются по выражениям (6) из условия абсолютной инвариантности следящего электропривода относительно управляющего воздействия

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = 0, \quad (5)$$

где  $C_0, C_1, C_2, C_3$  – коэффициенты установившейся ошибки по положению, скорости, ускорению и рывку в дискретные моменты времени.

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{K_H \cdot T}; \\ a_2 = \frac{1 - A \cdot a_1}{K_H \cdot T}; \\ a_3 = \frac{1 - A \cdot [a_1 + a_2]}{B \cdot T} - \frac{2K_H \cdot (8a \cdot b^2 + M1) \cdot a_1}{2B \cdot T \cdot N1 \cdot T_0^2 \cdot (1 - 2e^{-aT} \cdot \cos(B \cdot T) + e^{-2aT})}. \end{cases} \quad (6)$$

где  $T$  – период дискретизации по времени в цифровом контуре положения;  $K_H = K_M / K_C$  – коэффициент передачи непрерывной части системы;  $K_M$  – коэффициент передачи механизма;  $K_C$  – коэффициент обратной связи по скорости;  $T_0 = \sqrt{T_{PC} \cdot T_1}$ ;  $T_{PC}$  – постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора скорости;  $T_1$  – постоянная времени входного фильтра контура скорости, оптимизирующего реакцию системы на входное воздействие;  $p_{1,2} = -a \pm jb$  – комплексно-сопряженные корни характеристического уравнения;  $A, B$  – полиномы, полученные при преобразовании передаточной функции системы по ошибке.

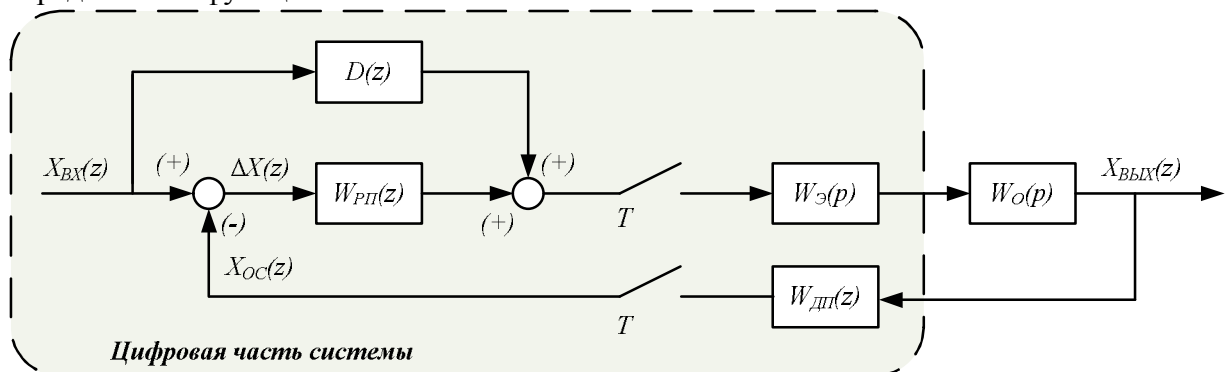


Рис. 2. Структурная схема следящего электропривода с комбинированным управлением:  $W_{ДП}(z)$  – единичная передаточная функция датчика положения

Из выражений (4-6) видно, что коэффициенты ЦКУ зависят от частоты квантования в контуре положения, коэффициента регулятора положения и параметров регулируемого электропривода, но в тоже время они не зависят от типа интерполятора.

Результаты моделирования показывают, что введение закона управления скоростью описываемого выражением (3) позволяет значительно снизить скачки скорости на участках разгона/торможения. Незначительный скачок скорости при разгоне обусловлен наличием зазоров в кинематической цепи механизма. Введение ЦКУ третьего порядка в систему управления позволило свести к минимуму ошибку при движении следящего электропривода с постоянной скоростью. На участках разгона/торможения ошибка снижается в 10 раз и достигает 1 мкм, в то время как в

системе управления без ЦКУ максимальная ошибка достигает 15мкм. Установлено, что на этапе торможения ошибка меняет свой знак, что обусловлено влиянием сигналов от разностей 1, 2, 3-го порядков.

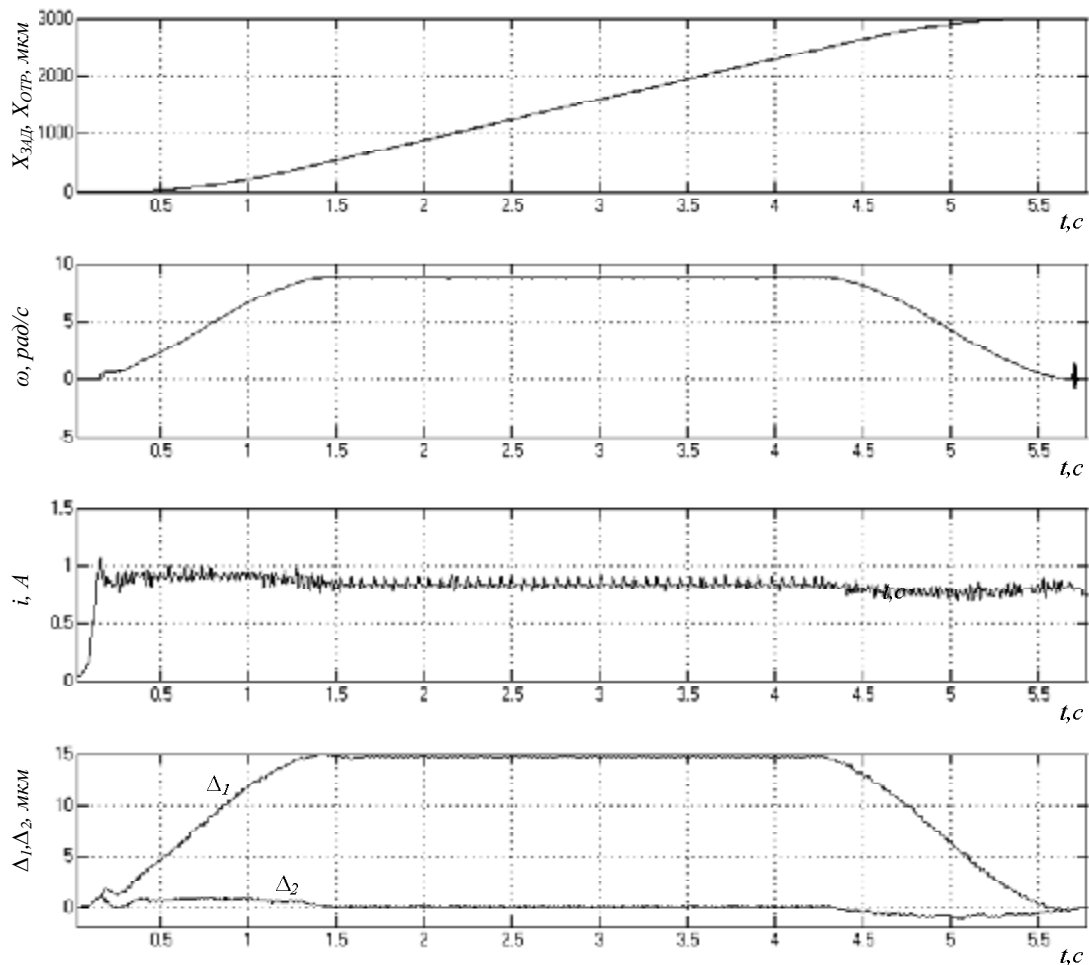


Рис. 3. Обработка траектории заданной сплайном:  $\Delta_1$  – ошибка при отсутствии корректирующего устройства,  $\Delta_2$  – ошибка при наличии корректирующего устройства

С целью практических исследований полученных алгоритмов разработан исследовательский комплекс, имеющий двухуровневую структуру (рис. 4). Верхний уровень реализован на базе персонального компьютера и модулей ввода-вывода дискретной UNIO96-5 и аналоговой информации AI16-5A-1 фирмы Fastwel. Нижний уровень содержит дискретные датчики положения ЛИР128А (г. Санкт-Петербург) с разрешающей способностью 2500 импульсов на оборот, исполнительный механизм и регулируемые электроприводы электроприводы «КЕМЕК».

Выбор элементной базы верхнего уровня обусловлен в первую очередь наличием двух аналоговых электроприводов, для управления которыми используются два канала ЦАП модуля AI16-5A-1, а также возможностью цифрового преобразования аналоговых сигналов регулируемого электропривода. Выбор программируемого модуля UNIO96-5 был определен необходимостью обработки дискретных сигналов от концевых выключателей и двух датчиков положения. Кроме этого применение этого модуля для обработки датчиков положения позволяет снизить нагрузку на центральный процессор персонального компьютера, так как благодаря технологии перепрограммируемых матриц (FPGA) отсутствует необходимость постоянно подсчитывать импульсы, поступающие в систему и определять направление вращения

вала двигателя. Эту задачу выполняет стандартная прошивка «Х32» представляющая собой два 32-разрядных счетчика импульсов энкодера. Аналогичным образом обработка дискретных сигналов осуществляется с помощью стандартной прошивки «N04» представляющей собой формирователь прерываний по событиям с программируемым антидребезгом по 24 каналам.

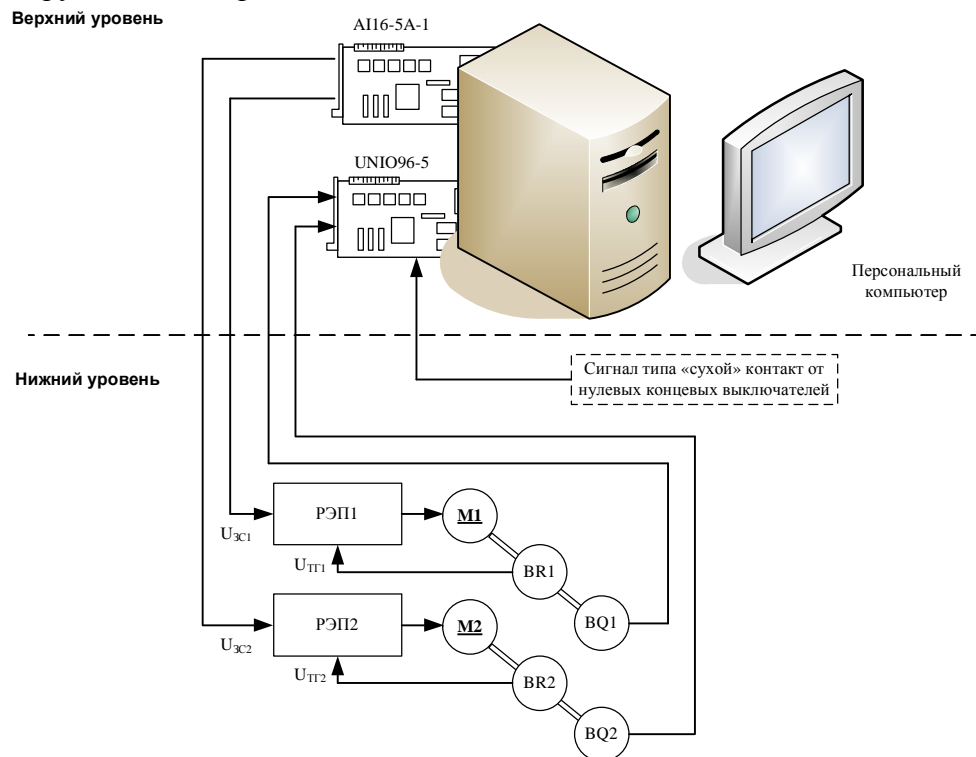


Рис. 4. Функциональная схема системы управления: РЭП1, РЭП2 – регулируемые электроприводы; M1, M2 – электродвигатели; BR1, BR2 – тахогенераторы; BQ1, BQ2 – датчики положения;  $U_{3C1}$ ,  $U_{3C2}$  – управляющие сигналы на РЭП;  $U_{ТГ1}$ ,  $U_{ТГ2}$  – сигналы обратной связи с тахогенераторов

По результатам исследований в области разработки программно-алгоритмического обеспечения цифровых систем управления следящими электроприводами автором статьи опубликовано 24 работы. Среди которых имеется 1 патент на изобретение, 2 авторских свидетельства на программное обеспечение, 1 патент на полезную модель, 4 публикации в центральной печати, а также 1 статья в журнале «Современные технологии автоматизации».

Использование результатов научных исследований подтверждено тремя актами внедрения.

На финансирование данной работы в 2006 году был получен индивидуальный грант Томского политехнического университета молодым ученым для проведения научных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Концепция числового программного управления мехатронными системами: анализ современного мирового уровня архитектурных решений в области ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2002. №7. – С. 11-17.
2. Букреев В.Г., Гусев Н.В. Обзор методов интерполяции дискретных траекторий движения электромеханических систем // Деп. в ВИНТИ 28.01.03, №166-В2003. – 2003. – С. 1-31.