

УДК 681.5.11

ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

С.Ю. Ловлин, М.Х. Цветкова, И.Н. Жданов

Рассматривается методика построения траектории движения следящего электропривода с ограничением скорости и ускорения. Особенность поставленной задачи – заранее неизвестна траектория задания, формирователь траектории (ФТ) реализуется в цифровом виде.

Ключевые слова: траектория движения, формирователь траектории, задатчик интенсивности, ограничение скорости, ограничение ускорения.

Введение

В системах регулирования положения важную роль играют законы управления движением, обеспечивающие оптимальное протекание процесса позиционирования. 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, минимальном перерегулировании и ограничениях скорости и ускорения [1].

Данная проблема может быть решена посредством введения задатчика интенсивности (ЗИ) или ФТ на выходе канала задания. В общем случае задача формирования траектории решается при условии, что задание описывается кусочно-постоянной функцией и время между двумя скачкообразными изменениями задающего сигнала больше времени переходного процесса ФТ [2] (или ЗИ [1]). Другими словами, заранее рассчитывается траектория перехода из точки А в точку В, причем за все время переходного процесса точка В не меняется.

Такие ФТ удовлетворяют широкому кругу задач, но не могут быть использованы, например, в задачах слежения телескопов за небесными объектами. За время перехода телескопа от одного спутника к другому последний успевает изменить свое положение, причем его траектория заранее неизвестна. Отсюда возникает необходимость планирования траектории в реальном времени.

Постановка задачи

Задача состоит в разработке ФТ, обладающего следующими качествами: минимальное время переходного процесса, простота реализации, адаптация под изменяющиеся условия задания. Под простотой реализации понимается использование только таких функций, как сложение, умножение, деление. Это

необходимо для высокого быстродействия алгоритма ФТ. Также немаловажным является и цифровое исполнение ФТ.

В качестве входных данных ФТ использует:

z_n, z_{n-1}, z_{n-2} – текущее и два предыдущих значения задания;

$a_{n-1}, a_{n-2}, a_{n-3}$ – три предыдущих значения ФТ;

w_{\max} – максимальный прирост угла (произведение максимальной скорости на период дискретизации);

e_{\max} – максимальное дискретное ускорение (произведение максимального ускорения на период дискретизации в квадрате).

В расчетах, приведенных ниже, потребуются также следующие значения:

$\varepsilon = z_n - a_{n-1}$ – разница между заданием и предыдущим значением ЗТ;

$w_a = a_{n-1} - a_{n-2}$ – прирост выходного сигнала ЗТ;

$w_z = z_n - z_{n-1}$ – прирост сигнала задания;

$e_a = a_{n-1} - 2 \cdot a_{n-2} + a_{n-3}$ – дискретное ускорение выходного сигнала ЗТ;

$e_z = z_n - 2 \cdot z_{n-1} + z_{n-2}$ – дискретное ускорение сигнала задания;

$\Delta w = w_z - w_a$ – относительный прирост;

$\Delta e = e_z - e_a$ – относительное ускорение.

Все вышеприведенные величины измеряются в радианах (это не является обязательным, но необходимо для облегчения понимания нижеприведенных графиков).

Ограничение скорости и ускорения при скачке задания

Данная задача является упрощенной, так как задающий сигнал считается постоянным.

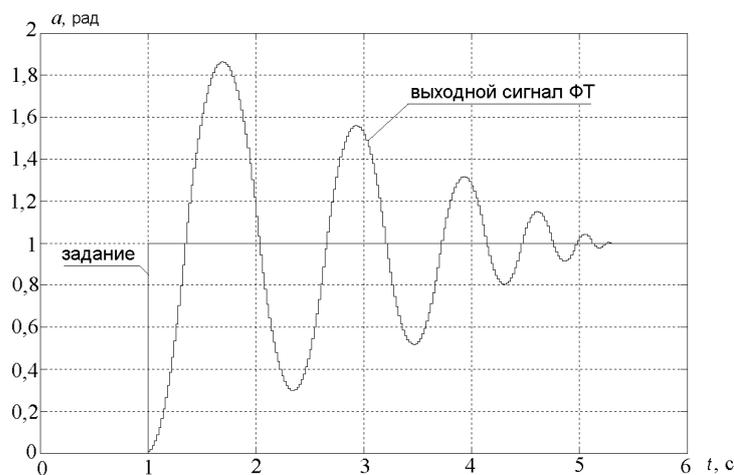
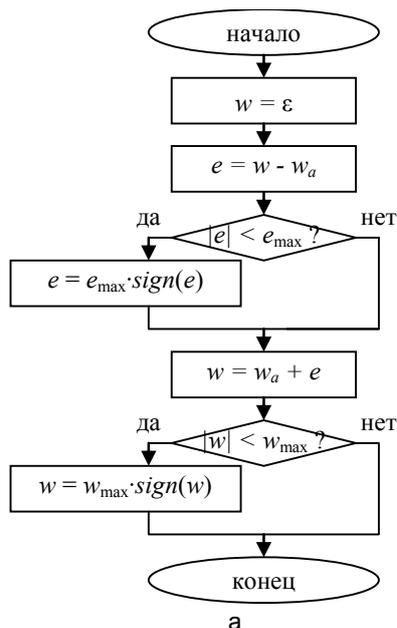


Рис. 1. Алгоритм ограничения скорости и ускорения (а) и результат его применения (б)

На рис. 1 изображен результат решения путем обычного ограничения скорости и ускорения. Анализируя этот график, видим, что переходный процесс носит колебательный характер, а это недопустимо. Причина такой реакции на скачок – ненулевое значение скорости сигнала ФТ при пересечении траектории задания.

Таким образом, необходимо добавить функцию торможения в ФТ, т.е. переходный процесс надо разделить на три этапа – разгон, движение с максимальной скоростью и торможение. Сложность заключается в поиске точки, в которой необходимо начать торможение. Сначала определим текущие значения угла и скорости через предыдущие:

$$w_n = w_{n-1} + e, \tag{1}$$

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} + w_n. \tag{2}$$

Проанализировав (1) и (2), получим расчеты для вычисления скорости и угла в любой момент времени через начальные значения:

$$w_n = w_0 + n \cdot e; \quad (3)$$

$$\alpha_n = \alpha_0 + n \cdot w_0 + \frac{1}{2}n(n+1) \cdot e. \quad (4)$$

В конце торможения скорость изменения сигнала ФТ $w_n = 0$, а само значение ФТ α_n должно быть равно значению задания. Отсюда и вытекает условие начала торможения:

$$n = -\frac{w_0}{e}; \quad (5)$$

$$\alpha_0 = \alpha_n + \frac{1}{2} \left(\frac{w_0^2}{e} + w_0 \right),$$

где w_0 – скорость в данный момент времени; α_0 – предыдущее значение ЗТ; α_n – значение задания; e – тормозное ускорение; n – количество тактов вычислений, через которое скорость станет равной нулю.

Результат моделирования данного алгоритма ФТ изображен на рис. 2 (задание и выходной сигнал ФТ на участке от 0 до 2 с). Форма траектории напоминает латинскую букву *s*, откуда и название – S-образный ФТ.

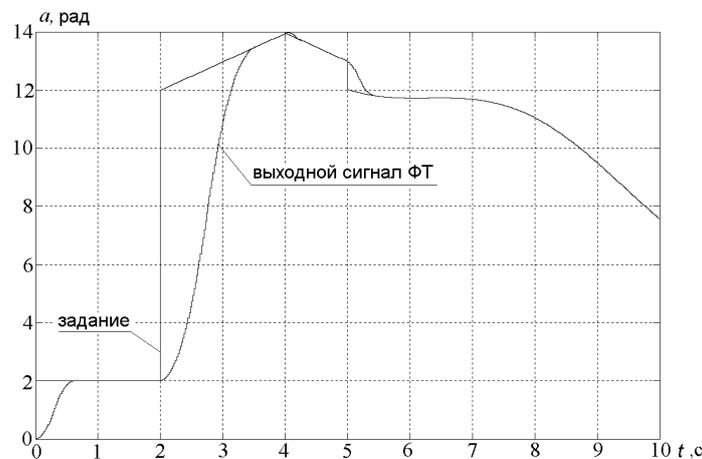


Рис. 2. Результат работы ФТ

Ограничение скорости и ускорения при любом виде задания

Выберем систему отсчета, в которой будет проводиться решение поставленной задачи. Совместим начало координат с текущим значением задания. Скорость и ускорение выбранной системы отсчета в абсолютной системе координат соответственно равны текущим скорости и ускорению задания. Таким образом, траектория задания преобразуется в ось абсцисс относительной системы координат. Нетрудно заметить, что решение такой задачи аналогично предыдущему, т.е. необходимо привести выходной сигнал ФТ из любой точки относительной системы отсчета в начало координат.

Проведем следующие замены:

$$\alpha_0 - \alpha_n = \varepsilon; \quad (6)$$

$$w_0 = \Delta w;$$

$$e = \Delta e.$$

Подставим (6) в (5):

$$n = -\frac{\Delta w}{\Delta e}; \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta w^2}{\Delta e} + \Delta w \right).$$

Выражение (7) дает нам полное решение поставленной задачи о поиске точки начала торможения. Алгоритм цифрового ФТ приведен на рис. 3. Особенность цифрового исполнения ФТ заключается в том, что вычисления производятся в дискретные моменты времени. Таким образом, маловероятно, что тормозное ускорение будет приложено в точке начала торможения. Поэтому система прогнозирует ситуацию на следующем периоде дискретизации (переменные $\Delta w1$, $\Delta e1_{\max}$, $n1$), и если выполняется условие начала торможения, то ФТ формирует тормозное ускорение уже на текущем такте.

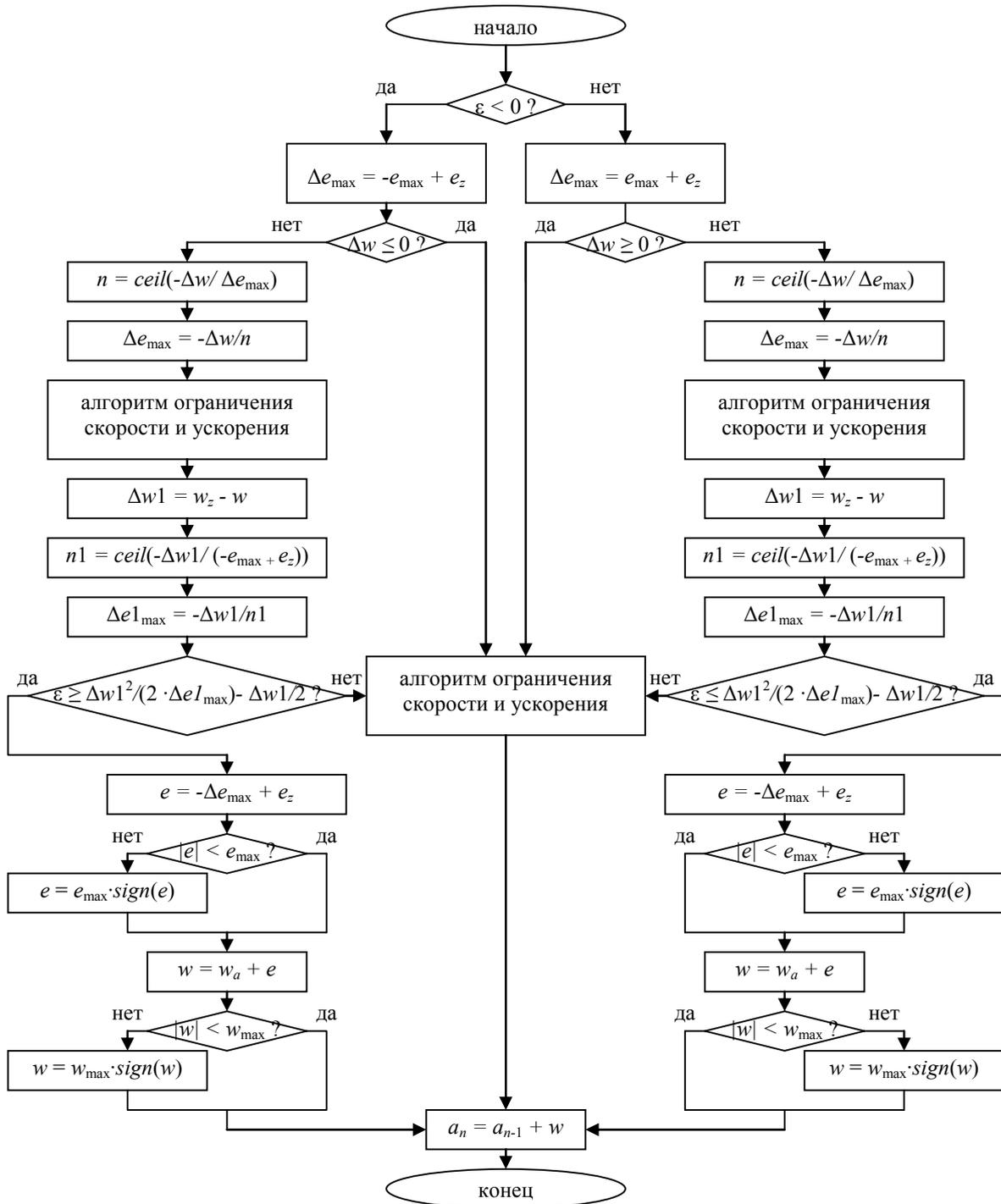


Рис. 3. Алгоритм формирователя траектории

В алгоритме используются следующие функции: $sign()$ – вычисление знака аргумента; $ceil()$ – округление аргумента вверх.

Выход на заданную траекторию должен быть выполнен за целое число тактов. Используя функцию округления $ceil()$, система ФТ вычисляет, с каким ускорением (близким к максимальному) необходимо проводить торможение.

В результате формирования траектории сложного задания (рис. 3) были получены скорости и ускорения, лежащие в пределах ограничения (рис. 4).

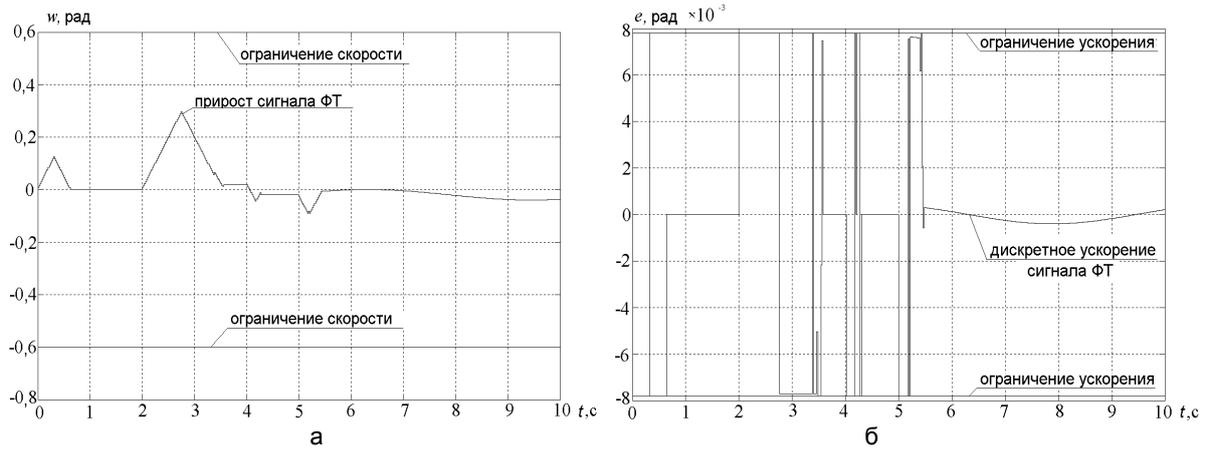


Рис. 4. Скорость (а) и ускорение (б) ФТ

Заключение

Разработанный алгоритм цифрового ФТ позволяет решать задачу ограничения скорости и ускорения в реальном времени при изменяющихся условиях задания с максимальными быстродействием и эффективностью. Данное решение, к примеру, подходит для следящих систем телескопов траекторных измерений. Но есть и один недостаток этого алгоритма – в некоторые моменты времени происходит скачкообразное изменение ускорения. Это требует скачкообразного изменения момента двигателя и приводит к перегрузке механической трансмиссии. При этом в нагрузке с упругой связью неизбежно будут возникать колебания. В некоторых случаях это недопустимо, и появляется необходимость повышения порядка гладкости траектории. В ближайшем будущем планируется решение данной проблемы.

Литература

1. Оптимальное управление движением при позиционировании и его моделирование в среде Matlab/Simulink / А.Г. Ильина, Д.В. Лукичев, А.А. Усольцев // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 63–67.
2. Использование параметрической аппроксимации при планировании траекторий движения аппаратов / Г.М. Довгоброд, Л.М. Клячко, А.В. Рогожников // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 9. – С. 11–17.

Ловлин Сергей Юрьевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, sergi-l@yandex.ru

Цветкова Мадина Хасановна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, madina1986@bk.ru

Жданов Иван Николаевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, zhdanov@ets.ifmo.ru