

УДК 531.36; 62-50

П.Г. Яковенко

УПРАВЛЕНИЕ СЛЕДЯЩИМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Методика последовательного многошагового синтеза оптимальных по быстродействию управлений позволяет формировать с высокой частотой законы управления следящими электроприводами во время переходного процесса из оптимальных управлений для малых шагов. Для малых рассогласований возможно формирование оптимальных по быстродействию законов управлений электроприводом без вступления в действие ограничений на рывок, ускорение и скорость.

Методика; синтез; управления; системы; ограничения координат.

P.G. Yakovenko

MANAGEMENT OF WATCHING ELECTRIC DRIVES

Multistep synthesis methodology consistent optimal control allows you to generate high-frequency control law servo systems during the transition from optimal controls for small steps. For small mismatches, formation optimum on speed of laws of managements of the electric drive without the introduction into action of restrictions on jerk, acceleration and speed is possible.

Method; synthesis; control; systems; limited coordinates.

Введение. Важной задачей при проектировании следящих систем с микропроцессорным управлением является разработка простых алгоритмов для синтеза в реальном масштабе времени, с высокой частотой оптимальных по быстродействию законов с учетом дискретного изменения заданий по скорости. В системах с одновременным управлением несколькими электроприводами, когда задания по скоростям изменяются ступенчато, необходимо устранять возникающие ошибки по положению за минимальное время. При супервизорном управлении для обеспечения высокого качества воспроизведения заданных траекторий движения и выполнения ограничений на рывок, ускорение и скорость следует формировать соответствующие входные воздействия на электроприводы с учетом предельных динамических возможностей, определяемых на предварительном этапе методом имитационного моделирования или экспериментально на реальных установках. При составлении алгоритмов следует учитывать иерархическую систему противоречий и применять новые, нестандартные подходы, в которых требуется не столько искусство математика, сколько хорошее знание технической задачи и понимание, какими факторами можно пренебречь.

Синтез оптимальных по быстродействию управлений следящими электроприводами с ограничением координат традиционными методами не всегда эффективен. Новые методики [1] синтеза оптимальных управлений на основе методов динамического программирования [2] и имитационного моделирования, принципов «перемены цели» и «ведущего слабого звена» [3] позволяют решить задачу. На адекватных моделях возможен поиск оптимальных по быстродействию управлений путем анализа переходных процессов при пробных воздействиях. Методика последовательного многошагового синтеза предполагает действия над разностными уравнениями, которыми описывается поведение системы. В общем случае методика позволяет составлять программы численного решения задач и открывает широкие перспективы по разработке алгоритмов синтеза в реальном масштабе времени микропроцессорными средствами оптимальных управлений электроприводами.

Ограничения координат при микропроцессорном управлении комплектными электроприводами. Составление алгоритмов синтеза в реальном масштабе времени оптимальных по быстродействию управлений комплектными электроприводами значительно упрощается, если представить координаты системы скоростью (ω), ускорение и рывок в единицах одной размерности. При синтезе управлений численным методом с постоянным шагом интегрирования Δt о координатах системы и ограничениях можно судить по перемещениям за шаг интегрирования:

$$L_{\omega} = \omega \cdot \Delta t, \quad (1)$$

$$\Delta L_{\omega} = \Delta \omega \cdot \Delta t, \quad (2)$$

$$\Delta(\Delta L)_{\omega} = \Delta(\Delta \omega) \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где $\Delta \omega$ – приращение скорости за шаг интегрирования, соответствующее ускорению; $\Delta(\Delta \omega)$ – приращение к приращению скорости за шаг интегрирования, соответствующее рывку.

Ограничения на скорость, ускорение и рывок можно определить через максимальные значения перемещений за шаг интегрирования:

$$L_{\omega_m} = \omega_m \cdot \Delta t, \quad (4)$$

$$\Delta L_{\omega_m} = \Delta \omega_m \cdot \Delta t, \quad (5)$$

$$\Delta L_{\omega_m} = \Delta(\Delta \omega)_m \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где ω_m – максимальная скорость;

$\Delta \omega_m$ – максимальное приращение скорости за шаг интегрирования, соответствующее максимальному ускорению;

$\Delta(\Delta \omega)_m$ – максимальное приращение к приращению скорости за шаг интегрирования, соответствующее максимальному рывку.

Для i -го шага интегрирования легко определить перемещения, которые характеризуют ускорение и скорость электропривода при рывке $\Delta(\Delta L)_{\omega(i)}$:

$$\Delta L_{\omega(i)} = \Delta L_{\omega(i-1)} + \Delta(\Delta L)_{\omega(i)}, \quad (7)$$

$$L_{\omega(i)} = L_{\omega(i-1)} + \Delta L_{\omega(i)}, \quad (8)$$

где $\Delta L_{\omega(i-1)}, L_{\omega(i-1)}$ – перемещения, соответствующие значениям ускорения и скорости электропривода на предыдущем шаге.

Разгон электропривода до заданной скорости при наличии ограничений на рывок и ускорение в общем случае состоит из участка нарастания ускорения, участка движения с предельным ускорением и участка уменьшения ускорения. Участок движения с предельным ускорением может отсутствовать, если необходимо начинать уменьшение ускорения раньше, чем система достигнет предельного темпа разгона. Значение скорости, до которой следует разгонять электропривод в системе позиционирования, определяется величиной заданного перемещения, шагом интегрирования и ограничениями на рывок и ускорение [4].

Законы управления позиционным электроприводом, кроме принятых ограничений, должны учитывать возможные отклонения электропривода от оптимальных траекторий движения. Путь разгона при выходе электропривода на установившуюся скорость не должен превышать половины заданного перемещения. Выбор максимальной скорости движения позиционного электропривода следует осуществлять в функции заданного перемещения L_s , таким образом, чтобы с учетом дискретности управления путь торможения был не менее пути разгона.

Алгоритм управления позиционным электроприводом. На основе методики последовательного многошагового синтеза разработан алгоритм определения закона управления на участке разгона позиционного электропривода с учетом принятых ограничений. Он предусматривает расчет пробных шагов с последующим переводом системы в установившиеся состояния. Анализ координат системы позволяет выбрать управление комплектным электроприводом для очередного шага. Начальные значения скорости ($L_{\omega(i-1)}$), ускорения $\Delta(L_{\omega(i-1)})$, пути разгона ($L_{p(i-1)}$) и торможения ($L_{T(i-1)}$), прогнозируемого установившегося значения скорости ($L'_{\omega(i-1)}$) и отработанного электроприводом перемещения $L_{n(i-1)}$ принимаются равными нулю. Вычисляется величина $\Delta L_{\omega T}$, соответствующая требуемому приращению скорости на очередном шаге для достижения электроприводом максимальной скорости за один шаг, и сравнивается со значением $\Delta L_{\text{дон}}$. В алгоритме предусмотрена потенциальная возможность разгона позиционного электропривода до скорости $L_{\omega m}$, так как заданные перемещения могут быть значительными. Ускорение на предыдущем такте управления принимается равным $\Delta L_{\omega(i-1)}$, если $\Delta L_{\omega T}$ больше предельного значения рывка. В противном случае это ускорение принимается равно $\Delta L_{\omega T}$. Затем анализируется необходимость выполнения очередного шага с предельными динамическими возможностями электропривода. Для этого оценивается целесообразность выполнения очередного шага с прежним ускорением $\Delta L_{\omega(i-1)}$. Если оно равно нулю, то выполнять пробный шаг с таким ускорением нет смысла. Следует сразу проводить расчеты для пробного шага с ускорением ($\Delta L_{\omega k}$), которое больше значения ускорения с предыдущего шага на величину допустимого рывка $\Delta L_{\text{дон}}$. В противном случае оно принимается равным ускорению электропривода на предыдущем шаге. Рассчитываются прогнозируемая установившаяся скорость электропривода L'_{ω} после выполнения пробного шага с выбранным ускорением и путь разгона L_p до нее

$$L'_{\omega} = L'_{\omega(i-1)} + \Delta L_{\omega k}, \quad (9)$$

$$L_p = L_{p(i-1)} + 2L'_{\omega} - L_{\omega(i-1)} \quad (10)$$

Отсутствие нарушений ограничений позволяет выполнить шаг, аналогичный пробному шагу, поэтому прогнозируемая установившаяся скорость электропривода, путь разгона до нее и путь торможения $L_{T(i)}$ принимают новые значения:

$$L'_{\omega(i)} = L'_{\omega}, \quad (11)$$

$$L_{p(i)} = L_p, \quad (12)$$

$$L_{T(i)} = L_{p(i)} + L'_{\omega(i)}. \quad (13)$$

Нарушение ограничений запрещает выполнение шага, аналогичного пробному шагу, реально с принятым ускорением $\Delta L_{\omega k}$, поэтому $L'_{\omega(i)}$, $L_{p(i)}$ и $L_{T(i)}$

остаются без изменений. Ускорение $\Delta L_{\omega(i)}$ и скорость $L_{\omega(i)}$ электропривода на очередном шаге, а также суммарный пройденный путь $L_{n(i)}$ вычисляются по выражениям:

$$\Delta L_{\omega(i)} = \Delta L_{\omega k} - \Delta L_{\partial o n}, \quad (14)$$

$$L_{\omega(i)} = L_{\omega(i-1)} + \Delta L_{\omega(i)}, \quad (15)$$

$$L_{n(i)} = L_{n(i-1)} + \Delta L_{\omega(i)}. \quad (16)$$

В случае возможности выполнения электроприводом рассчитанного пробного шага с ускорением $\Delta L_{\omega k}$ оценивается необходимость расчета с большим ускорением еще одного пробного шага. Такой шаг рассчитывается, если значение $\Delta L_{\omega k}$ отличается от значения $\Delta L_{\omega m}$ и равно ускорению $\Delta L_{\omega(i-1)}$. Новое ускорение на втором пробном шаге

$$\Delta L_{\omega k} = \Delta L_{\omega(i-1)} + \Delta L_{\partial o n}. \quad (17)$$

Новый пробный шаг не рассчитывается в случае отличия ускорения на предыдущем пробном шаге от ускорения электропривода или равенства его допустимому значению $\Delta L_{\omega m}$. Ускорение электропривода $\Delta L_{\omega(i)}$ на очередном шаге принимается равным $\Delta L_{\omega k}$. Таким образом, в приведенном алгоритме возможен расчет не более двух пробных шагов. Учитываются ограничения на рывок, ускорение и скорость, осуществляется поиск оптимального управления и разгон электропривода до установившегося значения скорости в функции заданного перемещения. Напряжение управления $U_{y(i)}$ комплектным электроприводом с коэффициентом передачи $K_{\text{эн}}$ формируется с учетом принятого шага интегрирования

$$U_{y(i)} = L_{\omega(i)} / \Delta t / K_{\text{эн}}. \quad (18)$$

Алгоритм обеспечивает выбор оптимального значения максимальной скорости движения позиционного электропривода и разгон до нее без перерегулирования с прохождением не более половины заданного перемещения при релейном изменении значения рывка на участках увеличения и уменьшения ускорения. Движение электропривода с предельным ускорением меньше максимального значения возможно на нескольких тактах управления, что устраняет длительный режим дотягивания при выходе на заданную скорость, значение которой может быть равно $L_{\omega m}$ или любому другому значению, кратному величине максимального рывка.

Стремление обеспечить минимум времени обработки задания позиционным электроприводом предполагает максимально возможное время движения на максимальной скорости. При дискретном управлении, когда информация с датчика обратной связи поступает в регулятор положения с запаздыванием на один такт, путь торможения $L_{T(i)}$ не может быть меньше пути разгона $L_{p(i)}$. Движение на установившейся скорости осуществляется до тех пор, пока остаток $\Delta L_{o c m}$ перемещения $(L_3 - L_{n(i)})$ не станет меньше пути торможения $L_{T(i)}$.

На заключительном участке необходимо изменять темп торможения в функции ошибки позиционирования ΔL_{ocm} и текущего значения скорости L_{ω} электропривода по нелинейной зависимости таким образом, чтобы обеспечить выход в заданную позицию с малым ускорением на малой скорости. При этом на каждом шаге расчет ускорения торможения ведется в предположении равнозамедленного движения с текущего значения скорости до останова, принимая остаток перемещения меньше истинного значения на величину $K2 \cdot L_{\omega}$, пропорциональную постоянному коэффициенту $K2$. Задается убывающий запас в пути торможения. Ускорение торможения при этом изменяется по нелинейной зависимости и определяется выражением

$$\Delta L = \frac{L_{\omega}^2}{2(\Delta L_{ocm} - K2 \cdot L_{\omega})}. \quad (19)$$

С уменьшением скорости электропривода составляющая запаса $K2 \cdot L_{\omega}$ в пути торможения (19) убывает, поэтому снижается и ускорение электропривода при подходе к заданной позиции и гарантируется останов без перерегулирования по положению.

При дискретном управлении, когда $\Delta L_{ocm} < K2 \cdot L_{\omega}$ темп торможения следует определять без учета запаса в пути торможения, принимая $K2 = 0$. Заканчивать торможение следует на скорости дотягивания, которая определяется исходя из требуемой точности позиционирования.

Такой подход позволяет формировать близкие к оптимальным законы управления позиционным электроприводом по простому алгоритму. Для поиска оптимального управления на очередном шаге достаточно выполнять в зависимости от значений координат системы и принятых ограничений не более 32 логических и арифметических действий. Изменение в широких пределах ограничений и заданий не нарушают работоспособности алгоритма. Предложенный принцип формирования управлений для позиционных систем может быть использован и в следящих системах с одной обратной связью по положению.

Микропроцессорное управление следящим электроприводом. При синтезе управлений следящей системой численным методом закон формируется во время переходного процесса и составляется из оптимальных управлений для малых шагов. В алгоритме на начальном этапе вычисляется модуль (L_{ω_3}) разности новой ($L_{\omega_{32}}$) и прежней ($L_{\omega_{31}}$) скорости задания на следящий электропривод. Если $L_{\omega_{32}} > L_{\omega_{31}}$, то максимальное значение скорости отработки рассогласования по положению L_{ω_m} вычисляется как разность между максимальной положительной скоростью электропривода $L_{\omega_{mn}}$ и скоростью $L_{\omega_{32}}$. Если $L_{\omega_{32}} < L_{\omega_{31}}$, то значение скорости L_{ω_m} вычисляется как сумма максимальной отрицательной скорости электропривода $L_{\omega_{mo}}$ и скорости $L_{\omega_{32}}$.

По выражениям (1–18) для очередного шага управления вычисляется скорость $L_{\omega(i+1)}$ отработки рассогласования $\Delta L_{ocm(i+1)}$ между траекториями движения электропривода реальной и эталонной. Полученное значение скорости исполь-

зуется для определения нового задания $L_{\omega(i+1)c}$ на реальный электропривод. При этом по выражениям (1–18) для очередного шага управления формируется новая заданная скорость отработки рассогласования, равная алгебраической сумме скоростей $L_{\omega3}$, $L'_{\omega(i)}$ и $L_{\omega(i)c}$. Если начальное рассогласование между траекториями движения электропривода реальной и эталонной окажется меньше пути торможения $L_{T(i)}$, то $L_{\omega(i+1)c}$ рассчитывается с использованием выражения (19). Задание по скорости на электропривод на участке торможения определяется суммой двух составляющих от эталонной траектории движения и от алгоритма изменения скорости отработки рассогласования в функции уменьшающейся ошибки по положению.

Затем определяется реально пройденный электроприводом $L_{n(i+1)}$ путь $L_{n(i+1)} = L_{n(i)} + L_{\omega(i+1)c}$ и путь $L_{\omega(i+1)}$ движения электропривода по эталонной траектории $L_{\omega(i+1)} = L_{\omega(i)} + L_{\omega3}$. Если $L_{\omega2} > L_{\omega1}$, то задание по скорости на реальный электропривод определяется суммой $L_{\omega p} = L_{\omega(i+1)c} + L_{\omega1}$. Если $L_{\omega2} < L_{\omega1}$, то задание по скорости на реальный электропривод определяется разностью $L_{\omega p} = L_{\omega1} - L_{\omega(i+1)c}$.

Вычисляется для очередного шага путь $L_{\omega p}$ движения электропривода по эталонной траектории $L_{\omega p} = L_{\omega(i)} + L_{\omega2}$ и реально пройденный электроприводом L_{np} путь $L_{np} = L_{np} + L_{\omega p}$. Определяются новые рассогласования по положению между траекториями движения электропривода $L_{ост.p} = L_{\omega p} - L_{np}$ и $\Delta L_{ост(i+1)} = L_{\omega(i+1)} - L_{n(i+1)}$. Для следующих шагов синтез управления следящим электроприводом выполняется по аналогичной методике (1–19).

Разработанный алгоритм показал высокую эффективность при изменениях в широком диапазоне ограничений на рывок, ускорение и скорость, начальном отставании реального электропривода от эталонной траектории движения в момент поступления нового задания, одинаковых и разных знаках начальной и новой скоростей движения электропривода. Во всех случаях отработка рассогласования выполняется с предельным быстродействием и заданной точностью с учетом принятых ограничений на рывок, ускорение и скорость без перерегулирования по положению.

На рис. 1,а,б приведены графики изменения скорости электропривода и рассогласования между эталонной и реальной траекториями движения при ступенчатом изменении задания для случая, когда при формировании закона управления вступают в действие ограничения на рывок и ускорение. Электропривод не разгоняется до предельной скорости при отработке рассогласования.

На рис. 2,а,б приведены графики изменения скорости электропривода и рассогласования между эталонной и реальной траекториями движения при ступенчатом изменении задания для случая, когда вступают в действие ограничения на рывок, ускорение и скорость. Электропривод разгоняется до предельной скорости ($\omega_m = 100 \text{ рад/с.}$) при отработке рассогласования.

Испытания предложенного алгоритма при незначительных ступенчатых изменениях заданий показали, что формирование законов управления электроприводом может осуществляться без вступления в действие ограничений.

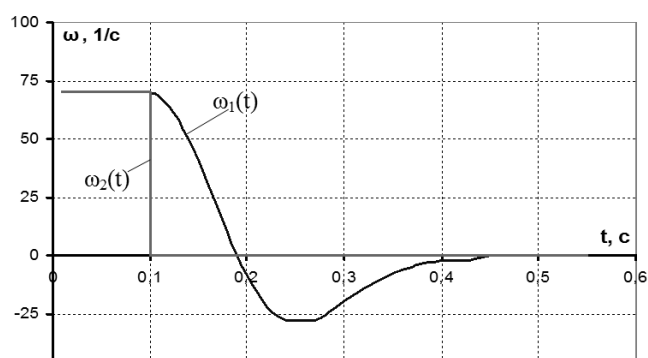


Рис. 1,а. График изменения скорости электропривода при изменении задания с $\omega_2 = 70 \text{ рад/с}$ до $\omega_2 = 0 \text{ рад/с}$

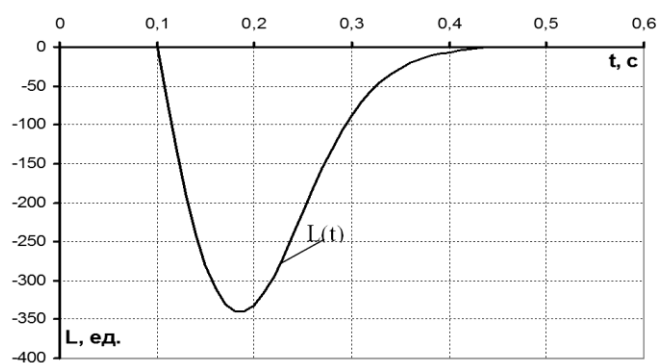


Рис. 1,б. График изменения рассогласования между эталонной и реальной траекториями движения электропривода при изменении задания с $\omega_2 = 70 \text{ рад/с}$ до $\omega_2 = 0 \text{ рад/с}$

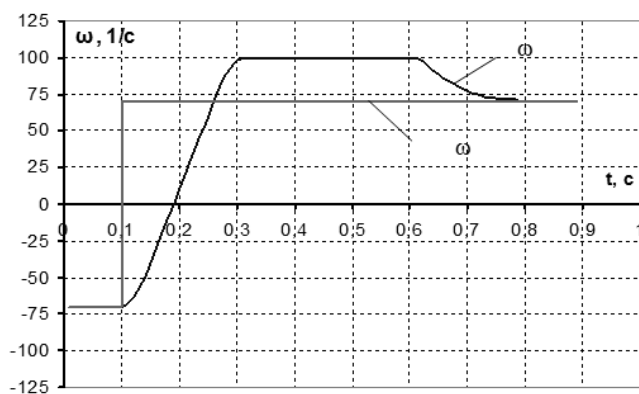


Рис. 2,а. График изменения скорости электропривода при изменении задания с $\omega_2 = -70 \text{ рад/с}$ до $\omega_2 = 70 \text{ рад/с}$

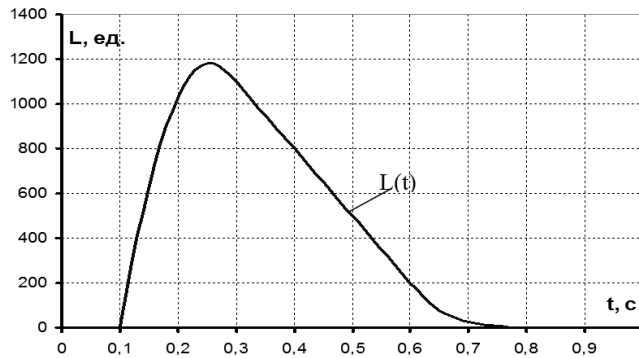


Рис. 2,б. График изменения рассогласования между эталонной и реальной траекториями движения электропривода при изменении задания с $\omega_2 = -70 \text{ рад/с}$ до $\omega_2 = 70 \text{ рад/с}$

Заключение. Методика последовательного многошагового синтеза оптимальных управлений позволяет разрабатывать простые алгоритмы для синтеза в реальном масштабе времени микропроцессорными средствами законов управления позиционными и следящими электроприводами. Отработка рассогласований выполняется с требуемой точностью и предельным быстродействием при строгом выполнении ограничений на рывок, ускорение и скорость. Изменение ограничений, которые могут изменяться в широком диапазоне с учетом предельных динамических возможностей электроприводов, не нарушает работоспособности предложенных алгоритмов. На подобных принципах могут быть созданы алгоритмы управления следящими электроприводами и при непрерывном изменении по нелинейным законам заданий скорости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яковенко П.Г. Методика последовательного многошагового синтеза оптимальных управлений // Известия Томского политехнического ун-та. – 2003. – Т. 306, № 2. – С. 95-98.
2. Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Изд-во иностран. Лит-ра, 1960. – 400 с.
3. Мясников В.А., Игнатъев М.Б., Покровский А.М. Программное управление оборудованием. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1974. – 243 с.
4. Яковенко П.Г. Оптимизация законов управления позиционными электроприводами при управлении от ЭВМ // Системы электропривода и промышленной автоматики с управлением от микропроцессоров и ЭВМ. – Л.: ЛДНТП, Ленингр. отд-ние, 1983. – С. 32-35.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Кориков.

Яковенко Павел Георгиевич

Томский политехнический университет.

E-mail: pgj75@yandex.ru.

634034, г. Томск, ул. Студенческая, д. 15/1, кв. 27.

Тел.: 83822562172; 83822563386.

Кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов; д.т.н.; профессор.

Yakovenko Pavel Georgievich

Tomsk polytechnic university.

E-mail: pgj75@yandex.ru.

15/1, Student's Street, sq. 27, Tomsk, 634034, Russia.

Phone: +73822562172; +73822563386.

Department of Automation of Heat Power Processes; Dr. of Eng. Sc.; Professor.