

З. М. Хасанов, Р. М. Гузаиров

### К ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Рассмотрены принципы организации оптимального по быстродействию управления позиционными электроприводами (ЭП). Получены выражения для расчета траектории движения механизмов ЭП с учетом ограничений и специфики работы электропривода. *Математическая модель; программное движение; адаптивный наблюдатель*

Высокие требования, предъявляемые современным технологическим оборудованием электродугового плазменного нанесения покрытий к характеристикам электроприводов (ЭП), приводят во многих случаях к необходимости учета динамики исполнительного механизма ЭП при управлении его движением. Это нужно, например, для быстрого выполнения приводом операций, требующих обеспечить точное отслеживание траектории, обследование детали по контуру, нанесение покрытий и т. д. Учет динамики исполнительного механизма требуется также при построении систем автоматического управления, в том числе полуавтоматических. Ниже рассматривается задача построения и исследования системы управления ЭП, позволяющей в значительной мере компенсировать динамические эффекты со стороны исполнительного механизма (ИМ), возникающие при движении многозвенного электропривода. Система перспективна для применения благодаря своей простоте и эффективности [1].

В практике синтеза систем ЭП широкое применение находит представление механической передачи двумя сосредоточенными массами (массой электродвигателя и массой редуктора), разделенными упругой связью. Математическая модель двухмассовой системы ЭП с активными и реактивными моментами статического сопротивления как при движении, так и при покое описывается следующими уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_{эд}}{d\tau} &= \frac{\mu_{эд} - \mu_y / i_p}{J_{эд}}, \\ \frac{d\omega_p}{d\tau} &= \frac{\mu_p - \mu_{стр}}{J_p}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{\omega_{эд}}{i_p} - \omega_p,$$

где  $\mu_p = \mu_y - \mu_b - k_{вт}\omega_n$  и  $\mu_{стр} = f(\omega_p)$ . В уравнениях приняты следующие обозначения:  $\omega_{эд}$ ,  $\omega_p$  – скорости движения соответственно вала электродвигателя (ЭД) и вала редуктора;  $\mu_{эд}$ ,  $\mu_p$  – движущие моменты соответственно на валу ЭД и на валу редуктора;  $J_{эд}$ ,  $J_p$  – моменты инерции соответственно ЭД и редуктора;  $i_p$  – передаточное число редуктора;  $\delta$ ,  $d\delta/d\tau$  – величина упругой деформации и скорость ее изменения в механической передаче без учета люфта;  $\mu_y$  – упругий момент;  $\mu_b$  – возмущающий момент;  $\mu_{стр}$  – момент сухого трения на валу редуктора и  $k_{вт}$  – коэффициент вязкого трения.

Если величина люфта  $\Delta$  задана, то формулы для оценки упругой деформации  $\delta_d$  и скорость ее изменения  $d\delta_d/d\tau$  в механической передаче с учетом люфта принимают вид

$$\begin{aligned} \delta_y &= 0, \text{ при } |\delta| < \Delta \text{ и } \delta_y = \delta - \Delta \text{sign}(\delta) \text{ при } |\delta| \geq 0, \\ \frac{d\delta_y}{d\tau} &= 0 \text{ при } |\delta| < \Delta \text{ и } \frac{d\delta_y}{d\tau} = \frac{d\delta}{d\tau} \text{ при } |\delta| \geq 0. \end{aligned}$$

При этом для вычисления упругого момента можно получить следующее соотношение

$$\mu_y = C_{ж} \delta_y + C_{д} \frac{d\delta_y}{d\tau}, \quad (2)$$

где  $C_{ж}$  – коэффициент жесткости механической передачи;  $C_{д}$  – коэффициент демпфирования в механической передаче, пропорциональный диссипативным потерям в редукторе.

Момент сухого трения в нагрузке является нелинейной функцией скорости вращения вала редуктора и может быть представлен в виде [2]:

$$\begin{aligned} \mu_{стр} &= \mu_b \text{sign}(\omega_p) \text{ при } \omega_p \neq 0 \\ \text{и } -\mu_b &\leq \mu_{стр} \leq +\mu_b \text{ при } \omega_p = 0. \end{aligned}$$

В отличие от релейных характеристик сухое трение имеет ту особенность, что переключение величины  $\mu_{стр}$  при  $\omega_p$  происходит не всегда мгновенно.

При  $\omega_p = 0$  и  $|\mu_{эд}| \geq \mu_v$  скорость  $\omega_p$  пройдет через нулевое значение, и движение рабочего органа привода будет продолжаться в соответствии с уравнением (1), причем при синтезе алгоритма управления для определенности знака скорости можно записать, что в этот момент, то есть при  $\omega_p = 0$

$$\mu_{стр} = \mu_v \text{sign}(\mu_{эд}). \quad (3)$$

Если  $\omega_p = 0$  и  $|\mu_{эд}| \leq \mu_v$ , то в движении рабочего органа произойдет остановка, в течение которой будет иметь место не переключение, а медленное изменение величины  $\mu_{стр}$  в интервале  $-\mu_v \leq \mu_{стр} \leq +\mu_v$ , причем  $\mu_{стр}$  будет принимать все время определенные значения  $\mu_{стр} = \mu_{эд}$ . Движение исполнительного механизма ЭП возобновится для всех  $|\mu_{эд}| \leq \mu_v$ .

При работе на малых скоростях абсолютное значение момента  $\mu_{эд}$  сопоставимо с величиной  $\mu_v$ . При смене знака скорости  $\omega_p$  также наблюдаются в движении рабочего органа остановки, точность и плавность движения ухудшаются, поэтому в этом случае при синтезе системы управления приводом необходим учет указанных особенностей сухого трения.

То есть для определения режимов и параметров оптимального торможения или набора скорости, а также для выбора соответствующей фазовой траектории ИМ требуется не только текущее значение момента, но и его аналитическое описание на данном участке движения.

Пусть нагрузка на валу исполнительного механизма задается с помощью двухмассового редуктора с заданными параметрами, тогда движение ИМ может быть описано уравнением [3]

$$\mu_p = A \cdot (\omega_{эд})^2 + B \cdot \omega_{эд} \cdot \omega_p + C \cdot (\omega_p)^2, \quad (4)$$

где  $A, B, C$  – коэффициенты, значения которых меняются скачком при изменении знака  $\omega_{эд} / \omega_p$ .

Если информация о скорости вала редуктора отсутствует, то величина момента может быть оценена выражением

$$\hat{\mu}_p = A \cdot (\omega_{эд})^2 + B \cdot \omega_{эд} \cdot \hat{\omega}_p + C \cdot (\hat{\omega}_p)^2, \quad (5)$$

где  $\hat{\omega}_p$  – оценка скорости вала редуктора, получаемая с помощью электронной схемы идентификации.

Модуль реактивной компоненты момента на валу редуктора при движении механизма описывается уравнением

$$\mu_p = \mu_0 + \mu_1 \cdot \omega_{эд} \cdot |\omega_p|. \quad (6)$$

Определим в уравнении (6) неизвестные компоненты момента редуктора  $\mu_0$  и  $\mu_1$ .

На практике точные значения параметров  $\mu_0$  и  $\mu_1$  и тем более характер их изменения неизвестны. В этих условиях неопределенности требуется построить алгоритмы управления электроприводом технологического оборудования, обеспечивающие достижение заданной цели.

Цель алгоритма управления ЭП заключается в осуществлении некоторого программного движения ИМ технологического оборудования, являющегося частным решением уравнения (4) при допустимом управлении ЭД и удовлетворяющего уравнению

$$\hat{\mu}_p = \hat{\mu}_0 + \hat{\mu}_1 \cdot \omega_{эд} \cdot |\omega_p|, \quad (7)$$

где  $\hat{\mu}_0, \hat{\mu}_1$  – оценки соответствующих параметров выражения (6), вырабатываемых схемой контроля и идентификации углового положения вала электродвигателя привода.

Следовательно, существует управление, переводящее исполнительный механизм из любого начального состояния  $\omega_b(\tau_0)$  в любое желаемое  $\omega_b(\tau_i)$  за конечное время. Это управление порождает некоторое движение, удовлетворяющее заданным граничным условиям.

При построении алгоритма управления рассмотрим временной отрезок, на котором задана последовательность  $\tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_n < \dots < \tau_n$ , где  $n \in N$  и последовательность значений идентифицируемой функции в узлах:

$$\begin{aligned} \omega_b(\tau_0) &= \omega_b(0), \quad \omega_b(\tau_1) = \omega_b(1), \\ \omega_b(\tau_1) &= \omega_b(1), \dots, \omega_b(\tau_{n-1}) = \omega_b(n-1), \\ \omega_b(\tau_n) &= \omega_b(n). \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда для дискретного момента времени  $\tau_n = \tau_0 + n \cdot \Delta\tau$ , обозначив  $k_{я} = R_{я} / (1 - R_{я})$ , динамику изменения скорости  $\omega_b$  запишем

$$\begin{aligned} \omega_b(1) &= \omega_b(0) + \Delta\tau \cdot (\mu - \mu_c), \\ \omega_b(2) &= \omega_b(1) + \Delta\tau \cdot k_{я} \cdot (\mu - \mu_c), \\ &\vdots \\ \omega_b(n) &= \omega_b(n-1) + \Delta\tau \cdot k_{я} \cdot (\mu - \mu_c). \end{aligned} \quad (9)$$

Введя в рассмотрение

$$\begin{aligned}\Delta\omega_b(1) &= \omega_b(1) - \omega_b(0), \\ \Delta\omega_b(2) &= \omega_b(2) - \omega_b(1), \\ &\vdots \\ \Delta\omega_b(n) &= \omega_b(n) - \omega_b(n-1),\end{aligned}$$

из уравнений (6) и (9) получим

$$\Delta\omega_b(m+1) = \Delta\omega_b(m) + \Delta\tau \cdot k_{\text{я}} \cdot \{\Delta\mu(m) - \mu_1(m+1) \cdot \Delta\omega_b(m) \cdot |\Delta\omega_p(m)|\}, \quad (10)$$

здесь

$$\begin{aligned}\Delta\mu(m+1) &= \mu(m) - \mu(m-1), \\ \Delta\omega_p(m+1) &= \omega_p(m) - \omega_p(m-1).\end{aligned}$$

Для оценивания неизвестного параметра  $\mu_1$  воспользуемся идентификатором, представленным адаптивным наблюдателем модели (10),

$$\begin{aligned}\Delta\hat{\omega}_b(m+1) &= \Delta\hat{\omega}_b(m) + \Delta\tau \cdot k_{\text{я}} \cdot [\Delta\mu(m) - \\ &- \hat{\mu}_1(m+1) \cdot \Delta\omega_b(m) \cdot \Delta\omega_p(m)] - k_0 \cdot \xi(m+1),\end{aligned} \quad (11)$$

где  $\Delta\hat{\omega}_b(m+1)$  – оценка переменной  $\Delta\omega_b(m+1)$ ,  $\xi(m+1) = \Delta\omega_b(m+1) - \Delta\hat{\omega}_b(m+1)$  – ошибка оценивания. Из уравнений (9) и (10) получим разностное уравнение ошибки:

$$\begin{aligned}\xi(m+1) &= (1 + k_0) \cdot \xi(m) - \Delta\tau \cdot k_{\text{я}} \cdot [\mu_1(m+1) - \\ &- \hat{\mu}_1(m+1)] \cdot \Delta\omega_b(m) \cdot |\Delta\omega_p(m)|.\end{aligned}$$

Параметр  $k_0$  выбирается из условия устойчивости решения уравнения (9). Настройка параметра  $\hat{\mu}_1(n-1)$  в контуре управления электродвигателем осуществляется как изменением скорости вращения якоря, так и изменением скорости торможения. Ведущими координатами для обоих случаев является дискретное время и координаты ошибки позиционирования.

Исходя из особенностей работы ЭП технологического оборудования, предлагается следующий алгоритм:

$$\left\{ \begin{aligned}\hat{\mu}_1^n(m+1) &= \hat{\mu}_1^n(m) - \frac{1}{\Delta\tau \cdot k_{\text{я}}} \cdot k_1 \cdot \text{sign} \Delta\omega_b(m) \times \\ &\quad \times |\Delta\omega_p(m)| \cdot \xi(m+1), \\ \hat{\mu}_1^i(m+1) &= \hat{\mu}_1^i(m+1) - \hat{\mu}_1^i(m+1), \\ \hat{\mu}_1^n(m+1) &= \hat{\mu}_1^n(m) - \frac{1}{\Delta\tau \cdot k_{\text{я}}} \cdot k_2 \cdot \text{sign} \Delta\omega_b(m) \times \\ &\quad \times |\Delta\omega_p(m)| \cdot \xi(m+1),\end{aligned} \right.$$

где  $\hat{\mu}_1^n(m+1)$ ,  $\hat{\mu}_1^i(m+1)$  – соответственно интегральные и пропорциональные составляющие алгоритма;  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты алгоритма адаптации, определяемые из условия  $k_1/2 + k_2 > 0$ .

Предложенный алгоритм обеспечивает асимптотическую устойчивость нулевого решения уравнения (11), т. е.  $\xi(m+1) \rightarrow 0$ . Следовательно, для любых  $\Delta\omega_p$  и  $\Delta\omega_b$  выполняется условие  $\mu_1(m+1) - \hat{\mu}_1(m+1) \rightarrow 0$ , которое определяет абсолютную точность оценки параметра  $\mu_1(m+1)$ .

Основная сложность реализации этого алгоритма заключается в необходимости использования в моменты перехода от времени  $\tau_m$  к  $\tau_{m+1}$  апостериорной ошибки  $\xi(m+1)$ , получение которой возможно лишь после очередного цикла настройки параметра  $\hat{\mu}_1(m+1)$ .

Эту сложность удается обойти путем использования априорной (измерительной) ошибки

$$\xi_1(m+1) = \Delta\omega_b(m+1) - \Delta\hat{\omega}_b(m+1).$$

Здесь  $\Delta\hat{\omega}_b(m+1)$  – априорная оценка  $\Delta\omega_b \times (m+1)$  и она получена до расчета  $\hat{\mu}_1(m+1)$ :

$$\begin{aligned}\Delta\hat{\omega}_b(m+1) &= \Delta\hat{\omega}_b(m) + \Delta\tau \cdot k_{\text{я}} \cdot [\Delta\mu(m) - \\ &- \hat{\mu}_1^a(m+1) \cdot \Delta\omega_b(m) \cdot \Delta\omega_p(m)] - K \cdot \xi(m+1),\end{aligned}$$

Связь ошибок  $\xi_1(m+1)$  и  $\xi(m+1)$  устанавливается выражением:

$$\xi(m+1) = Q(m+1) \cdot \xi_1(m+1),$$

где  $Q(m+1) = (1 + |\omega_b(m+1) \cdot \omega_p(m+1)| \cdot k_1 \cdot k_2)^{-1}$ .

На каждом такте управления программная скорость скачком приобретает новое значение. После этого в системе возникает переходной процесс длительностью заданного порядка.

Конкретные способы выбора алгоритмов управления и идентификации функций в классе полиномов, кубических сплайнов, конечных элементов и т. п. рассмотрены в [4].

Управляющая программа, реализующая алгоритм управления, была разработана на ассемблере в целочисленной арифметике, что позволило обеспечить малый шаг дискретизации (длительность такта управления 0,2 мс соответствует безразмерной длительности  $\tau = 0,002$ ).

При моделировании рассчитывалась величина дополнительных потерь мощности в системах ЭП

$$P = \frac{1}{2 \cdot T_{\text{ц}}} \int_0^{T_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n \mu_i^2(\tau) d\tau,$$

где  $\mu_i$  – моменты в механизмах ЭП,  $T_{\text{ц}}$  – время движения по траектории.

Для исследования возможностей предложенного алгоритма проводились исследования по оценке быстродействия систем электропри-

вода на ЭВМ и на экспериментальной установке. При моделировании рассчитывались время движения  $T_{ц}$  по траектории и постоянная времени  $T_{нк}$ , ограничивающая полосу пропускания широтно-импульсного преобразователя ЭП.

Наименьшее значение величины  $T_{нк}$  обусловлено дискретностью преобразователя и определяется как

$$T_{нк(\min)} = \frac{1}{2 \cdot m \cdot f},$$

где  $f$  – частота питающей сети,  $m$  – кратность пульсаций в кривой выходного напряжения ЭП. Для трехфазной мостовой схемы это дает величину  $T_{нк(\min)} = 1,6$  мс.

В экспериментах достигнуто высокое качество переходных процессов при торможении или наборе скорости. Это качество обеспечивается, несмотря на влияние трения в редукторе за счет введения внутреннего контура управления ЭП – «жесткой» следящей системы по скорости.

В других экспериментах при заданных параметрах температуры и вибрации электродвигателя оценивалась величина пульсаций в регуляторе тока электродвигателя. Допустимую величину пульсаций тока в регуляторе определяет выражение

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{T_{нк}}{R_3 \cdot \sqrt{1 + (2T_{нк} \omega_T)^6}} \leq (0,03 \div 0,1) I_{p(n)},$$

где  $R_3$  – эквивалентное сопротивление в цепи регулятора,  $\omega_T$  – частота пульсации в цепи,  $I_{p(n)}$  – номинальный ток.

Результаты моделирования показывают, что предложенный алгоритм управления ЭП позволяет обрабатывать без статической ошибки угловые перемещения исполнительного механизма порядка нескольких угловых минут. При этом соответствующим выбором характеристики широтно-импульсного преобразователя может быть обеспечен необходимый скоростной диапазон вращения вала редуктора с учетом накладываемых ограничений, а параметрическая оптимизация этого электропривода обеспечивает минимальное энергопотребление и удовлетворяет требованиям по качеству переходных процессов.

Таким образом, предлагаемые алгоритмы управления позволяют создать автоматизированный ЭП, включающий в себя, помимо базового двигателя, элементы силовой части и микропроцессорную систему управления. Компонентами силовой части этого привода являются:

управляемый выпрямитель, сглаживающее звено постоянного тока, широтно-импульсный преобразователь, обеспечивающий работу электродвигателя с переменной скоростью.

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показывают, что предложенный алгоритм управления ЭП позволяет в значительной мере компенсировать динамические эффекты со стороны ИМ двухмассового электропривода, такие как переменность моментов скоростных (центробежных и кориолисовых) и гравитационных сил. Алгоритм обеспечивает высокое качество управления ЭП и в то же время является достаточно простой в реализации.

Кроме того, возможно внедрение предложенного алгоритма на различных станочных приводах с широким диапазоном регулирования скорости вращения (1:40000) и полосой пропускания частот не менее 40÷50 Гц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хасанов З. М.** Автоматизированное технологическое оборудование для электродугового плазменного напыления // Сварочное производство. 2006. № 5. С. 44–50.
2. **Афонин В. Л., Крайнов А. Ф.** Обработка оборудования нового поколения: концепция проектирования. М.: Машиностроение. 2004. 256 с.
3. **Хасанов З. М., Хасанов О. З.** Самонастраивающаяся информационно-управляющая система с моделью для динамического управления электроприводами в высокотемпературных технологических процессах // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 12. С. 23–32.
4. **Куприянов М. С., Матюшкин Б. Д.** Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. СПб.: Политехника, 1998. 592 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Хасанов Зимфир Махмутович**, проф. каф. электромеханики. Дипл. инженер по пром. электронике (НЭТИ, 1984). Д-р техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. автоматизации и управления технологическими процессами и производствами.

**Гузаиров Рустем Муратович**, дипл. инженер по вычислительным машинам, комплексам, системам и сетям (УГАТУ, 1997) Иссл. в обл. адаптивного управления сложными техн. системами.