

УДК 621.793; 681.587

**Б. А. Якимович**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**З. М. Хасанов**, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный авиационный технический университет

**Р. М. Гузаиров**, Уфимский государственный авиационный технический университет

## ПОЗИЦИОННО-АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОСВЯЗНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

*Рассмотрены особенности синтеза адаптивных САУ для многосвязных электроприводов. Приводятся результаты экспериментов, свидетельствующих о возможности адаптивных регуляторов с активной идентификацией для управления электроприводами с переменной статикой и динамикой.*

**Ключевые слова:** позиционно-адаптивное управление, многосвязные электроприводы, электродуговое плазменное напыление.

**Р**азработка и создание многосвязных электро-механических систем (ЭМС) многофункционального назначения, позволяющих выполнять разнородные технологические операции электродугового плазменного напыления (ЭПН) при действии на исполнительные органы ЭМС всех голономных и неголономных связей, сил трения, упругих деформаций, многосвязных активных сил, требуют создания быстродействующих цифровых адаптивных систем автоматического управления (САУ) и алгоритмов управления для них.

Стремление увеличить точность и быстродействие многосвязных ЭМС однозначно определяет применение в них малоинерционных бесконтактных машин постоянного тока со встроенным датчиком положения и координатным преобразователем. Актуальность такого применения определяет линейность характеристик, надежность конструкции, а также способность развивать большие моменты в низкоскоростных режимах и открывает широкие возможности для создания быстродействующих безредукторных машин [1].

Адаптивные САУ с эталонной моделью занимают важное место в классе сложных высокоточных систем управления динамическими объектами ЭМС, основная задача которых состоит в обеспечении необходимой динамической точности управления при учете определенных ограничений, накладываемых из условия функционирования объектов. Так, при разработке быстродействующих алгоритмов управления многосвязными ЭМС необходимо учитывать реальные ограничения на управляющие силы и энергетические ресурсы. К несомненным достоинствам адаптивных цифровых САУ необходимо отнести простую реализуемость, высокую скорость адаптации к изменению внешних условий, а также малую чувствительность к измерительным шумам [2].

Известные в настоящее время методы синтеза адаптивных цифровых САУ приводами многосвязных ЭМС в зависимости от формы математического описания можно разделить на четыре основные группы: методы на основе аппарата дифференциаль-

ных и разностных уравнений для линейных и нелинейных ЭМС; методы, основанные на аппарате интегральных уравнений, и соответствующие им дискретные аналоги для цифровых САУ; методы на основе интегральных преобразований Лапласа и Фурье; методы, основанные на спектральных формах представления математических моделей.

### К синтезу адаптивных САУ с моделью-эталонном для динамического управления многосвязными ЭМС

Высокие требования, предъявляемые современным производством ЭПН к параметрам многосвязных ЭМС, приводят к необходимости учета динамики исполнительных механизмов (ИМ) многосвязных ЭМС при управлении их движением. Это нужно для быстрого выполнения многосвязными ЭМС операций, требующих обеспечить точное позиционирование, отслеживание траектории, быстрый разгон и торможение. Громоздкость многосвязных ЭМС, их высокая стоимость, сложный характер силового взаимодействия компонентов ЭМС, а также необходимость согласованного управления всеми входящими приводами обуславливает то, что алгоритмы управления при переходе с одной технологической операции на другую чрезвычайно сложны.

Изложенные выше обстоятельства делают весьма актуальной задачу разработки математического описания рассматриваемых систем и методики их исследования. Успешное решение данной задачи позволит существенно сократить сроки проектирования, повысить его качество, а также уменьшить материальные и временные затраты, улучшить гибкость систем управления.

Адаптивная САУ приводами многосвязной ЭМС двухуровневая. Верхний уровень (ВУ) задает общую стратегию поведения системы исходя из условия выполнения заданной технологической операции, т. е. разгон или торможение до заданной скорости и равномерное ее движение. Нижний уровень САУ состоит из пяти сепаратных подсистем, каждая из которых управляет своим приводом в соответствии

с управляющими сигналами, поступающими с верхнего уровня управления, что в итоге должно обеспечить перемещение ИМ на отдельных участках его маршрута по одному из возможных законов управления: с заданной скоростью во время позиционирования и равномерного движения ИМ, с заданным программным ускорением во всех режимах разгона и торможения.

Все четыре реверсивных широкодиапазонных привода по четырем степеням подвижности ИМ имеют три контура управления: контур тока якоря электродвигателя (ЭД), контуры угловой скорости и углового положения.

Рассмотрим описание движения объекта управления многосвязных ЭМС, включающего ИМ и электроприводы (ЭП) четырех степеней подвижности. Движение ИМ описывает уравнение

$$A(q) \frac{d^2 q}{dt^2} + B\left(q, \frac{dq}{dt}\right) + D(q) = M_n, \quad (1)$$

здесь  $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$  – обобщенные координаты движения;  $A(q)$  – матрица инерции объекта управления ЭМС размером  $n \times n$ ;  $B\left(q, \frac{dq}{dt}\right) = \begin{bmatrix} \dot{q}_i^T B_i(q) q_i \\ \dot{q}_n^T B_n(q) q_n \end{bmatrix}$  и  $D(q)$  – столбцы моментов скоростных (центробежных и кориолисовых) и гравитационных сил;

$B_i(q)$  – симметричная матрица  $n \times n$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $M_n$  – суммарный момент нагрузки многосвязных ЭМС со стороны ИМ. В идеале без учета инерционности изменения суммарного момента нагрузки многосвязных ЭМС уравнение управления движением ИМ может быть записано как

$$J \frac{d^2 q}{dt^2} + N \frac{dq}{dt} + M_n = S \cdot U_i(t), \quad (2)$$

где  $J = \text{diag}(J_i)$ ,  $N = \text{diag}(N_i)$  и  $S = \text{diag}(S_i)$  – матрицы  $n \times n$  параметров приводов ( $J_i > 0$ ,  $N_i > 0$ ,  $S_i > 0$ );  $U_i$  – управляющие напряжения на приводы.

На рис. 1 представлена схема построения системы управления одним ЭП многосвязной ЭМС. Внутренний скоростной контур построен как система с сигнальной настройкой по эталонной модели, где  $G = S^{-1} A_0$ ,  $A_0$  – постоянная матрица  $n \times n$ , равная матрице  $A_0(q) = A(q) + J$  в выбранном состоянии нагружения ИМ,  $N_0 = S^{-1} N$ . Внешний контур содержит регулятор положения (РП), выбираемый в соответствии с требованиями конкретных технологических операций. Для реализации алгоритмов управления необходимы обратная связь по координате  $q$  и измерение скорости  $v$  в текущий момент времени.

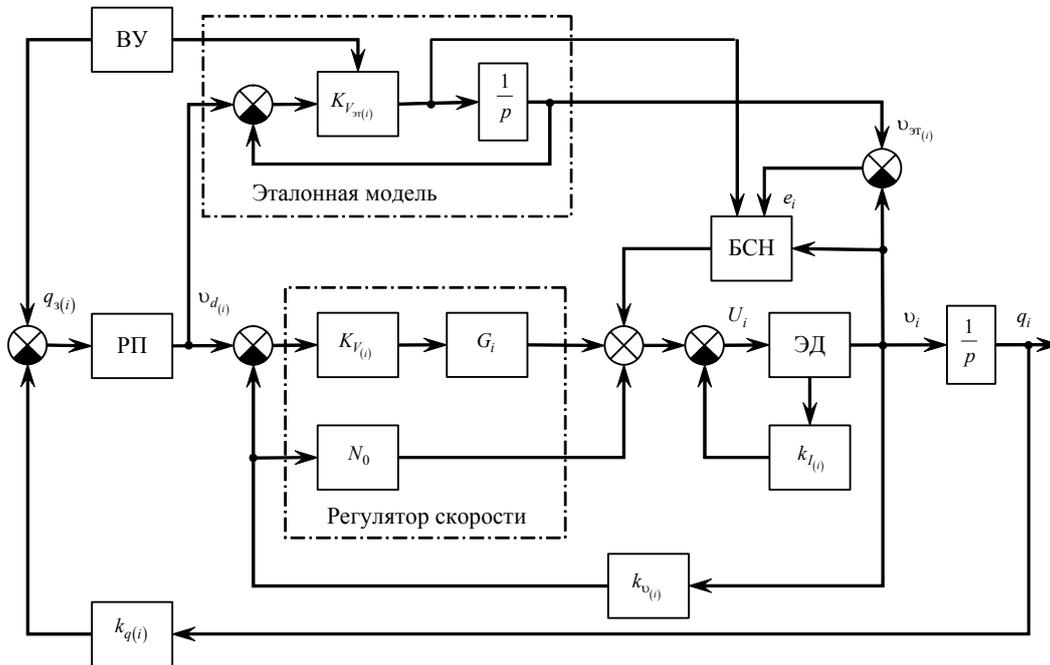


Рис. 1. Структурная схема системы управления одним приводом ЭМС

Выбор управляющего сигнала на электропривод ЭМС определяется из

$$\begin{cases} U_i = G_i K_{V(i)} (v_{d(i)} - v_i) + N_0 v_i, \\ v_i = dq_i / dt, \end{cases} \quad (3)$$

а выбор эталонной модели – из

$$\frac{dv_{эп(i)}}{dt} = K_{V(i)} (v_{d(i)} - v_{эп(i)}), \quad (4)$$

что обеспечивает программное движение ИМ в эталонном режиме  $v_i = v_{эТ(i)}$ .

Блок программной самонастройки (БСН), получив сигнал управления от эталонной модели и ошибки управления  $e_i = v_{эТ(i)} - v_i$  относительно модели, вырабатывает сигнал настройки  $U_{сн(i)}$ . Тогда при  $e_i = 0$  движение ИМ определяет уравнение желаемой модели

$$\frac{d^2 q_i}{dt^2} = K_{V(i)} \left( v_{d(i)}(q_{з(i)}, q_i) - \frac{dq_i}{dt} \right), \quad (5)$$

где  $K_V$  – матрица оптимальных коэффициентов усиления контура управления;  $q_{з(i)}$  – задающее воздействие. Исходя из уравнения (5) определяется регулятор положения, формирующий сигнал  $v_{d(i)}$  и коэффициенты матрицы  $K_{V(i)}$ .

Для формирования сигнала настройки  $U_{сн(i)}$  получим уравнение системы управления относительно ошибки  $e_i$ . Для позиционно-адаптивного алгоритма, учитывая формулы (1)–(4), нетрудно записать

$$U_{сн(i)} S = (A(q_i) - A_0(q_i) + J) a_{эТ(i)} - A_0(q_i) \dot{e}_i - K_{V(i)} A_0(q_i) e_i + B(q_i, \dot{q}_i) + D(q_i), \quad (6)$$

где  $a_{эТ(i)} = \dot{v}_{эТ(i)}$  – ускорение эталонной модели.

**О влиянии активной идентификации на точность адаптивных САУ**

В рассмотренной выше адаптивной системе управления ЭП активная идентификация изменений настроечных параметров привода обеспечивает автоматическую настройку системы, близкую к оптимальной по критерию максимальной степени устойчивости для аperiodических объектов управления с переменной статикой и динамикой. Возможности этой адаптивной САУ ЭП покажем путем сравнения процессов управления при линейном ПИД-управлении и предлагаемом адаптивном ПИД-управлении.

Применяемые в рассматриваемых системах электроприводы постоянного тока имеют контуры тока, скорости и углового положения с соответствующими регуляторами, методика расчета которых хорошо известна [3]. В общем случае поведение этого электропривода описывает дифференциальное уравнение

$$\begin{cases} T(t) \dot{q}_i(t) + q_i(t) = U_i(t), \\ U_i(t) = K_i [t - \tau(t)], \end{cases} \quad (7)$$

где  $T(t)$ ,  $\tau(t)$  и  $K_i(t)$  – ступенчатые функции времени;  $U_i(t)$  – управляющее воздействие;  $q_i(t)$  – выходная координата движения ИМ.

Управляющее воздействие при ПИД-законе управления выражается как

$$U_{л}(t) = k_{лп} \left[ \varepsilon_{л}(t) + k_{лн} \int_0^t \varepsilon_{л}(t_i) dt_i + k_{лд} \frac{d\varepsilon_{л}(t)}{dt} \right], \quad (8)$$

а при адаптивном ПИД-законе управления – соотношением

$$U_{а}(t) = k_{ан}(t) \varepsilon_{а}(t) + \int_0^t k_{ап} k_{ан} \varepsilon_{а}(t) dt + k_{ад} k_{ад} \frac{d\varepsilon_{а}(t)}{dt}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{л}(t)$  и  $\varepsilon_{а}(t)$  – ошибки регулирования, соответственно, для линейного и адаптивного регуляторов;  $k_{лп}$  и  $k_{ап}$  – общий коэффициент усиления линейного и адаптивного регуляторов;  $k_{лн}$  и  $k_{ан}$  – коэффициенты усиления интегральной составляющей линейного и адаптивного регуляторов;  $k_{лд}$  и  $k_{ад}$  – коэффициенты усиления дифференциальной составляющей линейного и адаптивного регуляторов. Тогда для расчета ошибки регулирования решается система уравнений

$$\begin{cases} \varepsilon_{л} = z(t) - q_{л}(t), \\ g(t) = 2\dot{z}(t) + z(t), \end{cases} \quad (10)$$

где  $z(t)$  – линейное преобразование задающего воздействия;  $q_{л}(t)$  – выходная координата;  $g(t)$  – ступенчатая функция на входе системы.

Сравнение проводили для пяти случаев изменения параметров объекта. В каждом из них предполагалось, что в начальный момент времени  $K(0) = 0$  и  $T(0) = \tau(0) = 1$ . Надстроечные параметры ПИД-закон управления  $k_{лп}$ ,  $k_{лн}$  и  $k_{лд}$  выбирали оптимальными по критерию максимальной степени устойчивости для начального момента времени. При этом  $k_{лп} = 1,84$ ,  $k_{лн} = 1$  и  $k_{лд} = 1$ .

Случай 1.  $T(t) = \tau(t) = 1$  при  $t \geq 0$ :

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = 0, \\ 1 & \text{при } 0 < t \leq 80, \\ 2 & \text{при } t > 80; \end{cases} \quad K(t) = \begin{cases} 0,2 & \text{при } 0 \leq t \leq 15, \\ 0,4 & \text{при } 15 < t \leq 35, \\ 1,2 & \text{при } 35 < t \leq 60, \\ 2,4 & \text{при } t > 60. \end{cases}$$

Соответствующие этому случаю процессы регулирования приведены на рис. 2, а и 2, б.

Случай 2.  $T(t) = \tau(t) = 1$  при  $t \geq 0$ :

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = 0, \\ 1 & \text{при } 0 < t \leq 80, \\ 2 & \text{при } t > 80; \end{cases} \quad K(t) = \begin{cases} 0,2 & \text{при } 0 \leq t \leq 20, \\ 0,06 & \text{при } 20 < t \leq 50, \\ 0,02 & \text{при } t > 50. \end{cases}$$

Процессы управления для линейного и адаптивного законов управления приведены на рис. 3, а и 3, б соответственно.

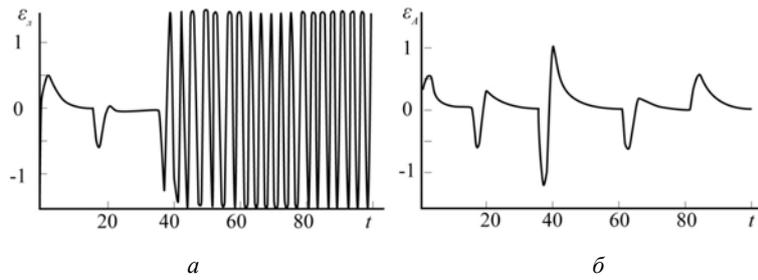


Рис. 2. Процессы регулирования, соответствующие случаю 1

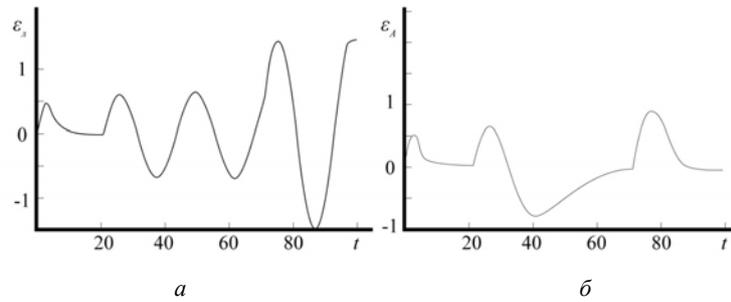


Рис. 3. Процессы управления для линейного (а) и адаптивного (б) законов управления

Случай 3.  $K(t) = 0,2$  при  $t \geq 0$ :

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = 0, \\ 1 & \text{при } 0 < t \leq 20, \\ 1,75 & \text{при } 20 < t \leq 70, \\ 2,75 & \text{при } t > 70; \end{cases}$$

$$T(t) = \tau(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t \leq 20, \\ 4 & \text{при } t > 20. \end{cases}$$

Процессы управления для случая 3 приведены на рис. 4, а и 4, б соответственно.

Случай 4.  $T(t) = \tau(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t \leq 20, \\ 4 & \text{при } t > 20; \end{cases}$

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = 0, \\ 1 & \text{при } 0 < t \leq 20, \\ 1,75 & \text{при } 20 < t \leq 60, \\ 2,75 & \text{при } t > 60; \end{cases}$$

$$K(t) = \begin{cases} 0,2 & \text{при } 0 \leq t \leq 20, \\ 0,6 & \text{при } t > 20. \end{cases}$$

Оценка  $\varepsilon_n(t)$  и  $\varepsilon_a(t)$  для случая 4 приведена на рис. 5, а и 5, б соответственно.

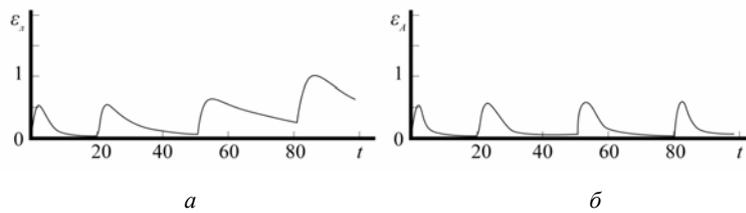


Рис. 4. Процессы управления для случая 3

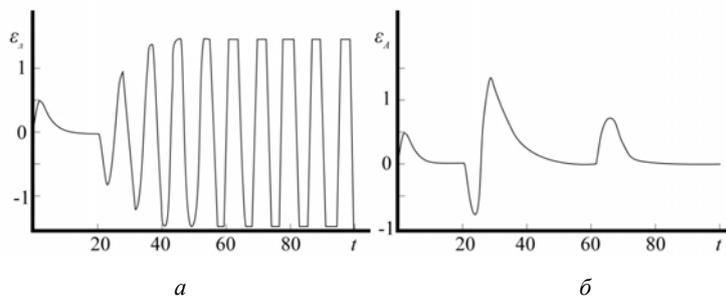


Рис. 5. Оценка  $\varepsilon_n(t)$  и  $\varepsilon_a(t)$  для случая 4

Случай 5.  $T(t) = \tau(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t \leq 10, \\ 0,5 & \text{при } t > 10: \end{cases}$

$$K(t) = \begin{cases} 0,2 & \text{при } 0 \leq t \leq 10, \\ 0,06 & \text{при } t > 10. \end{cases}$$

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = 0, \\ 1 & \text{при } 0 < t \leq 10, \\ 1,75 & \text{при } 10 < t \leq 30, \\ 2,75 & \text{при } t > 30; \end{cases}$$

Соответствующая оценка  $\varepsilon_{\text{д}}(t)$  и  $\varepsilon_{\text{а}}(t)$  приведена на рис. 6, а и б, б соответственно.

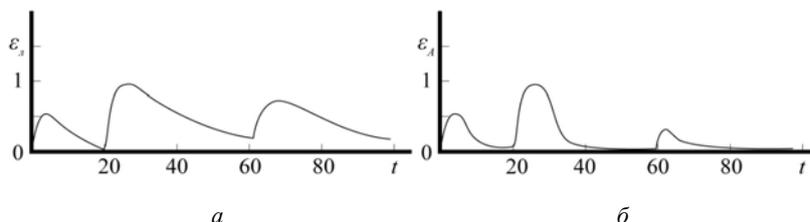


Рис. 6. Соответствующая оценка  $\varepsilon_{\text{д}}(t)$  и  $\varepsilon_{\text{а}}(t)$  для случая 5

В проведенных исследованиях параметры управления изменялись в пределах  $K_{\text{max}}(t)/K_{\text{min}}(t) = 100$  и  $T_{\text{max}}(t)/T_{\text{min}}(t) = \tau_{\text{max}}(t)/\tau_{\text{min}}(t) = 8$ .

Для САУ с линейным ПИД-регулятором изменение параметров в каждом из пяти случаев приводило к потере качества управления и устойчивости. Для адаптивной САУ регулятором после каждого изменения параметров привода осуществляется адаптивная перестройка параметров САУ, что обеспечивает высокое качество регулирования и является достаточно простой в реализации.

Таким образом, многопроцессорная реализация новой адаптивной САУ многосвязными ЭМС позволяет создать более совершенное технологическое оборудование ЭПН, способное не только быстро и программно перестраиваться с одних технологиче-

ских операций ЭПН на другие, но и быть адаптированным к неопределенным и изменяющимся параметрам многосвязных ЭМС.

**Библиографические ссылки**

1. Хасанов З. М., Гузаиров Р. М. К задаче синтеза систем электроприводов технологического оборудования электродугового плазменного напыления // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. – № 1. – С. 146–149.
2. Хасанов З. М., Гузаиров Р. М. Проектирование широкодиапазонного электропривода для технологического оборудования электродугового плазменного напыления // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. – № 1. – С. 128–134.
3. Хасанов З. М., Хасанов О. З. Самонастраивающаяся управляющая система с моделью для динамического управления электроприводами в высокотемпературных технологических процессах // Автоматизация и современные технологии. – 2008. – № 12. – С. 23–32.

*B. A. Yakimovich*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
*Z. M. Khasanov*, DSc in Engineering, Professor, Ufa State Aviation Technical University  
*R. M. Guzairov*, Ufa State Aviation Technical University

**Position-Adaptive Control by Multi-coupling Electric Drives of Process Equipment for Electric Arc Plasma Spraying**

*The paper considers the features of the synthesis of adaptive ACS for multi-coupling electric drives. The results of experiments are given, proving the possibility of adaptive controllers with active identification to control the electric drives with variable statics and dynamics.*

**Keywords:** position adaptive control, multi-coupling electric drive, electric arc plasma spraying.

Получено 15.10.2014