

УДК 681.515: 519.7

И.Г. Гулина, В.И. Корниенко

Национальный горный университет, Днепропетровск

АДАПТИВНАЯ САУ СЛОЖНЫМ МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ УПРАВЛЕНИЯ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ

Исследованы методы создания адаптивных систем автоматического управления с интеллектуальным прогнозированием для сложных многосвязных объектов управления. Разработаны локальные системы автоматического управления с самонастраивающимся и ПИД регуляторами и прогнозирующей моделью. На примере моделирования управления доменным процессом оценена эффективность предложенных локальных систем для нестационарных линейных и нелинейных каналов управления с шумом.

Ключевые слова: адаптивная САУ, многосвязный объект управления, интеллектуальное прогнозирование, самонастраивающийся регулятор, ПИД-регулятор.

Введение

Сложные объекты управления (ОУ) имеют нестационарные параметры, нелинейные зависимости, стохастические переменные, а также высокий уровень помех. К таким сложным ОУ относятся, например, подвижные объекты, телекоммуникационные системы и сети, технологические процессы рудоподготовки, доменное производство и др. При этом технологические процессы, как правило, дополнительно имеют существенные инерционность и время запаздывания, несколько управляющих воздействий и представляют собой многосвязные ОУ.

Постановка задачи. Неопределенность сложных ОУ вызывает необходимость использования в системах автоматического управления (САУ) ними

алгоритмов адаптации моделей и законов управления к реальным условиям функционирования ОУ.

Адаптивные САУ, в которых недостаток априорной информации восполняется за счет обработки текущей информации, позволяют сократить сроки проектирования, наладки и испытаний, а также обеспечить эффективное управление в условиях возмущений и неконтролируемых изменений свойств ОУ [1, 2]. При этом, в безпоисковых адаптивных САУ предварительно проводится идентификация ОУ, а затем, зная параметры ОУ, вычисляются коэффициенты регулятора.

Для идентификации и прогнозирования ОУ с неопределенностью используются адаптивные фильтры-аппроксиматоры (АФА) [3], в которых процесс адаптации включает оценивание искомого

выхода фильтра и корректировку его параметров по значению выходной ошибки. При этом перспективными считаются АФА на основе методов систем искусственного интеллекта, в частности, нейронных сетей и систем с нечеткой логикой (Anfis), поскольку они являются универсальными и эффективными аппроксиматорами [4], легко настраиваются (адаптируются) под изменяющиеся свойства ОУ и, соответственно, являются эффективными средствами моделирования сложных систем.

Таким образом, нерешенной задачей является исследование методов создания адаптивных САУ с интеллектуальными АФА для сложных ОУ и оценка эффективности этих систем.

Цель статьи. Разработка адаптивных САУ с интеллектуальным прогнозированием многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими ОУ с запаздыванием, а также оценка эффективности этих САУ.

Структура САУ многосвязным ОУ

Пусть динамика ОУ описывается нелинейным разностным уравнением:

$$\begin{aligned} \hat{x}[k+n] &= F\{x[k], u[k], w[k], \xi[k], a[k], k\}; \\ k &= \overline{k_j, k_{j+1}-1}, \quad j = 0, 1, 2 \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

где F – обобщенная функция (алгоритм) преобразования; $\hat{x}[k], u[k], w[k], \xi[k], a[k]$ – векторы (матрицы) оценки состояния ОУ, его управления, возмущения, шумов и параметров до текущего времени k ; k_j, k_{j+1} – начальные такты последовательных этапов (циклов) управления; n – требуемая глубина прогноза.

Предлагаемая САУ (рис. 1) состоит из локальных подсистем (контуров 1 и 2).

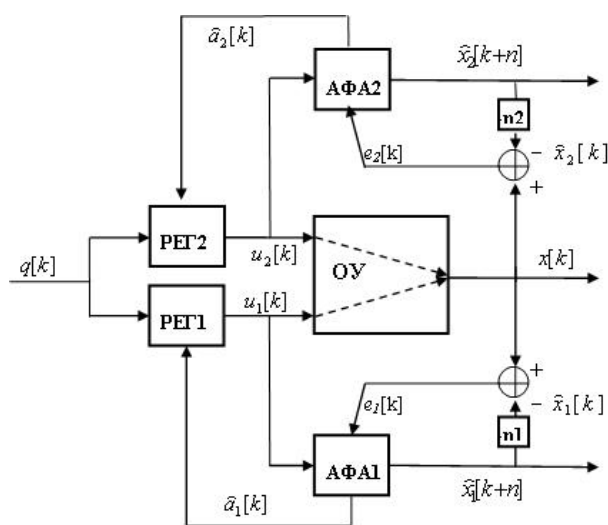


Рис. 1. Структура САУ многосвязным ОУ

В ней по заданному значению $q[k]$ регуляторы РЕГ1 и РЕГ2, параметры которых скорректированы

по результатам идентификации ОУ с помощью адаптации коэффициентов $\hat{a}_1[k], \hat{a}_2[k]$ АФА1 и АФА2, вырабатывают управляющие воздействия $u_1[k]$ и $u_2[k]$, влияющие на состояние ОУ $x[k]$.

Как правило [1], адаптивные САУ должны строиться как оптимальные в смысле качества управления, что, в основном, выражается в точности воспроизведения задающих воздействий q :

$$J = \|q[k] - \hat{x}[k]\| \rightarrow \min . \quad (2)$$

Для идентификации ОУ нашли распространение беспоисковые алгоритмы параметрической идентификации с адаптивной моделью, ориентированные на функционирование в реальном масштабе времени, к которым относятся, например, градиентные алгоритмы [1]. Процесс идентификации при этом заключается в адаптации параметров а по величине функционала ошибки J_e между реальным выходом и откликом модели (градиентом функционала в пространстве параметров):

$$\hat{a}[k] = \hat{a}[k-1] - K_a \cdot \nabla_{\hat{a}} J_e \{x[k], \hat{x}[k], k\}, \quad (3)$$

где $\hat{a}[k]$ – оценка вектора адаптируемых параметров в текущем такте; $\nabla_{\hat{a}} = (\partial / \partial \hat{a})^T$ – символ градиента; K_a – заданная матрица коэффициентов.

Функционал ошибки J_e имеет, обычно, вид:

$$J_e = \frac{1}{2} E\{(e[k])^2\} = \frac{1}{2} E\{(x[k] - \hat{x}[k])^2\}, \quad (4)$$

где E – математическое ожидание, $e[k] = x[k] - \hat{x}[k]$ – ошибка.

АФА (модель ОУ) становится оптимальным при $\hat{a} = a_{opt}$, когда $J_e = 0$, тогда задача адаптации заключается в нахождении оптимальных коэффициентов путем итеративного определения градиента поверхности минимальной среднеквадратической ошибки (4).

Поскольку АФА, реализуемые посредством использования НС и систем с нечеткой логикой, осуществляют векторную обработку данных, то учет возмущений $w[k]$ в выражении (1) не вызывает принципиальных трудностей (их учет увеличивает размерность входных данных АФА, не изменяя алгоритм обработки). В связи с этим, далее при синтезе управления учет возмущений не рассматривается.

При реализации адаптивной САУ могут использоваться регуляторы (РЕГ1 и РЕГ2 на рис. 1) различных типов, как оригинальные (самонастраивающиеся – СНС), так и стандартные (ПИ, ПИД и др.).

Локальная САУ с СНС регулятором и прогнозирующей моделью

Для автоматического управления в условиях ограниченной априорной информации предлагается

самонастраивающаяся система с интеллектуальным прогнозированием выхода ОУ с помощью АФА, структура которой приведена на рис. 2.

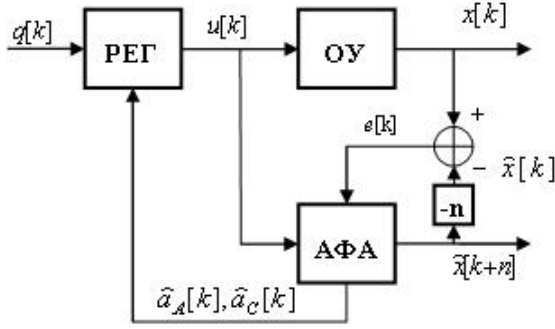


Рис. 2. Структура САУ с СНС регулятором и прогнозирующей моделью

Согласно классификации [1] это адаптивная САУ с идентификацией ОУ путем настройки его модели или, другими словами, безпоисковая адаптивная система непрямого адаптивного управления с эталонной обучаемой моделью.

ОУ и регулятор образуют основной контур системы, а АФА выполняет роль эталонной прогнозирующей модели ОУ, по которой корректируются коэффициенты регулятора (информационный контур). То есть, это САУ с разомкнутым основным и замкнутым информационным контурами.

Синтез адаптивного управления в этой САУ на такте k заключается в:

- адаптации параметров АФА $\hat{a}[k]$ по величине ошибки модели ОУ (1) (например, согласно (3) по градиенту (4)), а затем вычисления по адаптированному АФА прогноза выхода ОУ $\hat{x}[k+n]$;

- вычислении по заданию на следующий такт управления $q[k+1]$ ошибки управления:

$$\varepsilon[k] = q[k+1] - \hat{x}[k+n] \quad (5)$$

и определении по ней значения управления $u[k]$, реализуемого на ОУ.

Рассмотрим детальней процедуру определения управления $u[k]$. Целью управления является обеспечение ошибки $\varepsilon^*[k] = q[k+1] - x[k+n] = 0$, где $x[k+n]$ – соответствующий заданию $q[k+1]$ выход ОУ. При этом, поскольку сигнал $x[k+n]$ в момент времени k не наблюдается, то используется его оценка (прогноз) по АФА $\hat{x}[k+n]$, что согласно (2) соответствует критерию управления для стохастического ОУ:

$$J_\varepsilon = \frac{1}{2} E\{(\varepsilon[k])^2\} = \frac{1}{2} E\{(q[k+1] - \hat{x}[k+n])^2\} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Тогда значение управления $u[k]$ с учетом (1) и (5) определяется из уравнения:

$$E\{(q[k+1] - F\{x[k], u[k], \xi[k], a[k], k\})^2\} = 0, \quad (7)$$

что соответствует минимуму функционала (6) и является задачей минимизации функции одной переменной. При этом решение (7) относительно $u[k]$ в зависимости от вида функции F находится известными аналитическими или численными методами [1, 5].

При линейно входящем управлении в модели (1) определение управления не требует дополнительного привлечения специальных методов. Так, пусть модель ОУ (1) может быть представлена в виде уравнения с линейно входящим управлением:

$$\hat{x}[k+n] = A\{x[k], \hat{a}_A[k]\} + C\{x[k], \hat{a}_C[k]\} \cdot u[k], \quad (8)$$

где A – функция части ОУ, инвариантной к управлению (функция автономного движения ОУ); C – функция чувствительности управления; $\hat{a}_A[k]$, $\hat{a}_C[k]$ – вектора настраиваемых (адаптируемых) параметров функций A и C , соответственно.

Если параметры $\hat{a}_A[k]$, $\hat{a}_C[k]$ известны (адаптированы, например, в соответствии с (3) – (4)), то управляющее воздействие на текущем такте определяется согласно (8) по уравнению регулятора (при $x[k+n] = q[k+1]$ и $\hat{x}[k+n] \approx x[k+n]$), которое имеет вид:

$$u[k] = \frac{q[k+1] - A\{x[k], \hat{a}_A[k]\}}{C\{x[k], \hat{a}_C[k]\}}. \quad (9)$$

ОУ общего вида (1) может быть приведен к форме (8) разными способами [1, 2, 6]. Во-первых, если синтезированные управления имеют малый диапазон изменения Δu вокруг значения u^0 , то путем линеаризации функции F по u выражение (1) можно записать:

$$\begin{aligned} \hat{x}[k+n] &= \\ &= F\{x[k], u^0[k], \xi[k], a[k], k\} + (\partial F / \partial u)_{u=u^0} \cdot \Delta u, \end{aligned} \quad (10)$$

где $A\{x[k], \hat{a}_A[k]\} = F\{x[k], u^0[k], \xi[k], a[k], k\}$ и $C\{x[k], \hat{a}_C[k]\} = (\partial F / \partial u)_{u=u^0}$ в соответствии с (8).

Однако, при таком подходе сужается диапазон управляющих воздействий и, соответственно, снижается эффективность управления.

Более продуктивным является способ, когда управлением является не управляющее воздействие, а его скорость (изменение значения управляющей координаты на текущий такт) [2]:

$$u^*[k] = u[k] - u[k-1]. \quad (11)$$

Тогда модель (1) с учетом (11) приобретает расширенный вид:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}[k+n] \\ u[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ u[k-1] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \cdot u^*[k] \quad (12)$$

или более компактно

$$\hat{x}[k+n] = \bar{A} + \bar{C} \cdot u^*[k], \quad (13)$$

где $\bar{x}[k+n] = \{\bar{x}[k+n], u[k]\}^T$; $\bar{A} = \{F, u[k-1]\}^T$; $\bar{C} = \{0, I\}^T$; $\{\hat{a}_A, \hat{a}_C\} \subset \hat{a}$; $n \geq 1$; I – единичная матрица.

Этот способ приводит к расширению фазового пространства и, в общем случае, требует переформулировки функционала (6), но не снижает эффективности управления.

Окончательно расширенное уравнение регулятора в соответствии с (9) и (13) имеет вид:

$$u^*[k] = (\bar{q}[k+1] - \bar{A}) \cdot \bar{C}^{-1}, \quad (14)$$

где $\bar{q}[k+1] = \{q[k+1], u[k]\}^T$.

Локальная САУ с ПИД-регулятором и прогнозирующей моделью

Пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (ПИД-Р) широко используются в системах управления технологическими процессами, включая, нелинейными ОУ. Их преимуществами является быстрое действие, отклик как на отклонение, так и на скорость изменения управляемой координаты.

Структура адаптивной САУ с ПИД-регулятором и прогнозирующей моделью в виде АФА приведена на рис. 3. Это замкнутая САУ как по основному, так и информационному контурам.

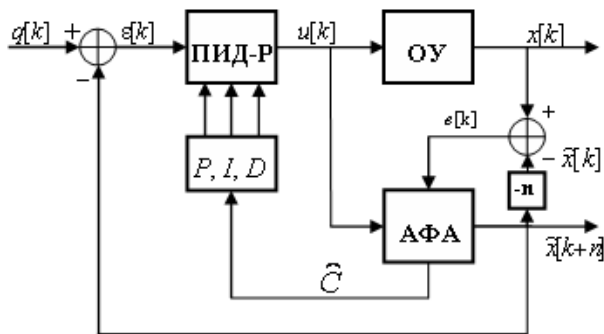


Рис. 3. Структура САУ с ПИД-регулятором и прогнозирующей моделью

Синтез адаптивного управления в этой САУ также включает процедуру вычисления прогноза $\bar{x}[k+n]$ по адаптированной модели ОУ, которая аналогична рассмотренной выше, и процедуру определения управляющего воздействия $u[k]$, которая имеет определенные особенности.

ПИД-регулятор реализует закон управления в виде идеализированного уравнения [7]:

$$u(t) = K_P \cdot \varepsilon(t) + K_I \cdot \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_D \cdot T_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (15)$$

где K_P, K_I, K_D – коэффициенты усиления ПИД-каналов; T_I, T_D – постоянные времени интегрального и дифференциального каналов; $\varepsilon(t)$ – ошибка управления.

В соответствии с (15) уравнение ПИД-регулятора представляется дискретным уравнением:

$$u[k] = u[k-1] + P[k] \cdot (\varepsilon[k] - \varepsilon[k-1]) + I[k] \cdot \varepsilon[k] + D[k] \cdot (\varepsilon[k] - 2\varepsilon[k-1] + \varepsilon[k-2]), \quad (16)$$

где $\varepsilon[k]$ – ошибка управления (5), а параметры $S = \{P, I, D\}$ в выражении (15) соответствуют коэффициентам K_P, K_I, K_D .

Таким образом, процедура определения управляющего воздействия $u[k]$ в этой САУ заключается в нахождении значений параметров S , которые согласно (16) определяют значение управления $u[k]$, являющегося решением уравнения (7) и соответствующего минимуму функционала (6). Это является задачей минимизации функции нескольких переменных, и решение (7) относительно S в зависимости от вида функции F находится известными аналитическими или численными методами [1, 5].

Так, например, при удовлетворении требований по использованию градиентных методов (гладкость функции F и ее дифференцируемость) минимуму функционала (6) с учетом (16) соответствует:

$$\partial J_\varepsilon[k] / \partial S[k] = 0; S[k] = \{P[k], I[k], D[k]\}, \quad (17)$$

откуда текущие значения параметров $S[k]$ определяются (адаптируются) аналогично выражению (3):

$$S[k] = S[k-1] - \alpha_S \cdot \partial J_\varepsilon[k] / \partial S[k], \quad (18)$$

где $\alpha_S = \{\alpha_P, \alpha_I, \alpha_D\}$ – коэффициенты настройки ПИД-каналов.

Для моделей ОУ с линейно входящим управлением (8), выражение (18) в соответствии с (16) принимает вид:

$$P[k] = P[k-1] + \mu_P \cdot \varepsilon[k] \cdot C\{x[k], \hat{a}_C[k]\} \times (\varepsilon[k] - \varepsilon[k-1]); \quad (19)$$

$$I[k] = I[k-1] + \mu_I \cdot \varepsilon[k] \cdot C\{x[k], \hat{a}_C[k]\} \cdot \varepsilon[k]; \quad (20)$$

$$D[k] = D[k-1] + \mu_D \cdot \varepsilon[k] \cdot C\{x[k], \hat{a}_C[k]\} \times (\varepsilon[k] - 2\varepsilon[k-1] + \varepsilon[k-2]). \quad (21)$$

Оценка качества адаптивной САУ

Оценка качества предложенной адаптивной САУ выполнялась путем оценки точности локальных САУ с помощью моделирования с использованием разработанных программ в среде Matlab для управления тепловым состоянием доменной печи.

В качестве моделей ОУ использовались: последовательно соединенные апериодическое звено с запаздыванием и безинерционное квадратичное звено (ПИТ2) – структура Винера-Гаммерштайна [1], нелинейная динамическая модель теплопередачи (NLD) [8], а также модели каналов управления доменной печью сверху (ПИТtop) и снизу (ПИТbat) в виде линейных апериодических звеньев с запазды-

ванием [7]. Из особенностей доменного процесса глубина прогноза по каналам управления сверху принята в 10 тактов, а по каналу управления снизу – 3 такта. При этом, глубина памяти принята равной 4.

В качестве задания (Set-point) использовалась ступенчатая функция Хевисайда, а время наблюдения составляло 256 тактов (около 5 суток при выбранном интервале управления). Нестационарность ОУ составляла 10...20 % от номинальных значений их параметров за время наблюдения. Для прогнозирования состояния ОУ использовался АФА (AFA) в виде нейронечеткой системы Anfis с колоколообразной функцией принадлежности, 2 уровнями разложения по входам и 15 эпохами обучения [4].

Моделировалась робота САУ с самонастраивающимся регулятором и прогнозирующей моделью

(СНС+АФА), САУ с ПИД-регулятором и прогнозирующей моделью (PID+АФА), а также адаптивная САУ с ПИД-регулятором без прогнозирования состояния ОУ (PID).

Для решения оптимизационной задачи (6), (7) в системе СНС+АФА использовался метод золотого сечения, а в системах с ПИД-регулятором – симплекс-метод Нелдера-Мида (Nelder-Mead) [9]. В качестве меры точности прогнозирования и управления использовались относительные среднеквадратические ошибки $\bar{\epsilon}$ и $\bar{\epsilon}$, соответствующие выражениям (4) и (6).

Результаты управления ОУ с помощью рассмотренных локальных адаптивных САУ приведены на рис. 4, 5, а значения ошибок прогнозирования и управления ОУ – в табл. 1.

Таблица 1

Ошибки прогнозирования и управления ОУ

Объект управления	Ошибка прогнозирования $\bar{\epsilon}$, отн. ед.		Ошибка управления $\bar{\epsilon}$, отн. ед.		
	Шум = 0	Шум = 0,1	СНС+АФА	PID+АФА	PID
PIT2	0,019	0,024	0,028	0,047	0,206
NLD	0,017	0,026	0,023	0,029	0,187
PITtop	0,055	0,087	0,085	0,093	0,102
PITbat	0,024	0,058	0,081	0,064	0,068

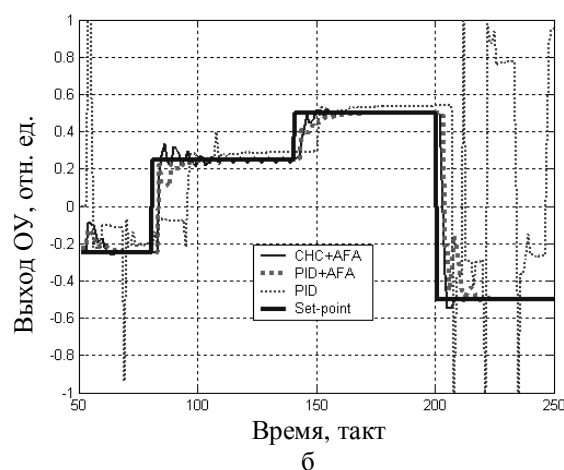
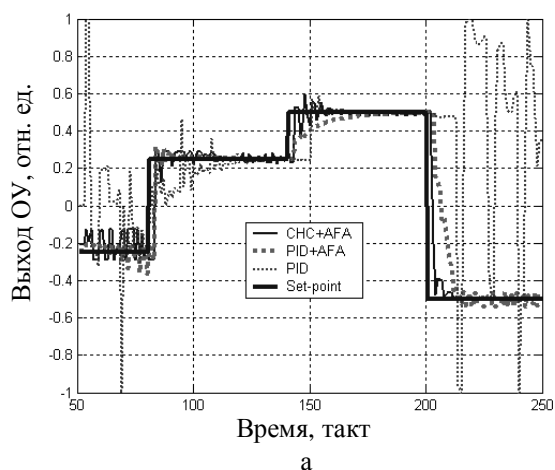


Рис. 4. Результаты управления нелинейными ОУ: PIT2 (а) и NLD (б)

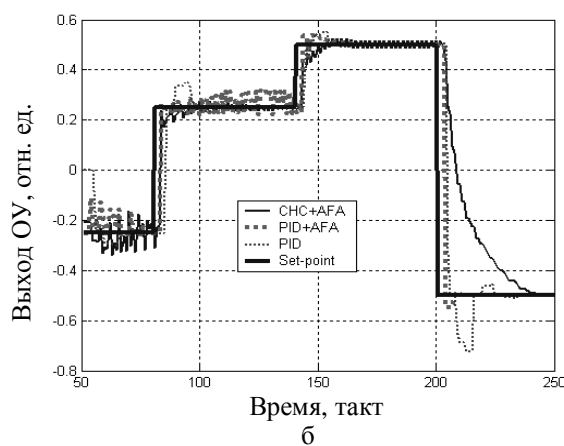
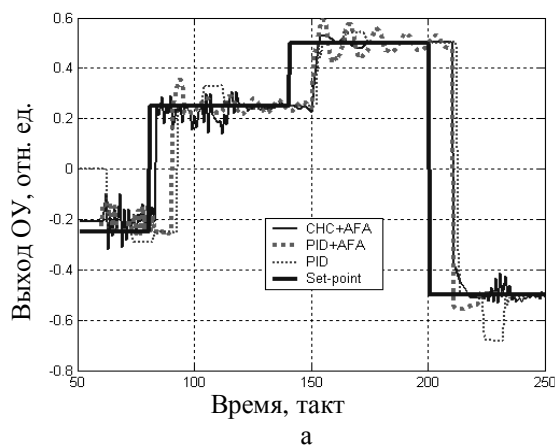


Рис. 5. Результаты управления линейными ОУ: PITtop (а) и PITbat (б)

Ошибки прогнозирования ОУ рассчитывались при уровнях шумов измерений, равных 0 и 0,1 от уровня входного воздействия.

Определено, что точность прогноза с помощью АФА на основе Anfis для нелинейных ОУ (PIT2 и NLD) в 1,5...3,2 раза выше, чем для линейных (PITtop и PITbat) и с увеличением шума измерения изменяется до приемлемых пределов.

Анализ результатов управления свидетельствует, что для нелинейных ОУ системы с интеллектуальным прогнозированием (СНС+АФА и PID+АФА) имеют в 4...7 раз меньшую ошибку управления, чем САУ без прогнозирования (PID). При этом система СНС+АФА имеет, в целом, большую точность, чем система PID+АФА, а система PID имеет перерегулирование больше 150 %. Для линейных ОУ качество рассмотренных САУ является сравнимым.

Статистическая проверка по критерию знаков [10] показала значимость полученных выводов. В целом ошибки управления определяются ошибками прогнозирования. Предобучение АФА улучшает сходимость алгоритмов адаптации и, соответственно, обеспечивает снижение ошибки управления.

Время синтеза управления на один такт прогноза при вычислении на процессоре Pentium IV составляет: для СНС+АФА – 1,4...2,7 с; для PID+АФА – 3,6...4,7 с и для PID – 0,07...0,13 с, что не вносит временных ограничений на применение этих систем в контурах управления тепловым состоянием доменной печи.

Выводы

Разработана адаптивная САУ с интеллектуальным прогнозированием состояния ОУ с использованием локальных адаптивных САУ с самонастраивающимся и ПИД регуляторами, которые обеспечивают качественное управление сложными многосвязными ОУ с возмущаемой средой функционирования.

Установлено, что для нелинейных моделей теплового состояния доменной печи предлагаемые

САУ обеспечивают ошибки прогнозирования состояния ОУ на уровне 0,02...0,03 и ошибки управления на уровне 0,02...0,05, что отвечает технологическим требованиям.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание автоматизированной системы управления многосвязным ОУ.

Список литературы

1. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. - М.: Наука, 1987. - 712 с.
2. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом / В.Н. Буков. - М.: Наука, 1987. - 288 с.
3. Корнієнко В.І. Нейронне вейвлет прогнозування та ідентифікація складних сигналів та об'єктів керування / В.І. Корнієнко, Г.В. Кузнецов, І.В. Гарнак // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. - 2009. - № 2 (15). - С. 38-44.
4. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. - М.: Физматлит, 2001. - 224 с.
5. Табак Д. Оптимальное управление и математическое программирование / Д. Табак, Б. Куо. - М.: Наука, 1975. - 280 с.
6. Мита Ц. Введение в цифровое управление: Пер. с японск / Ц. Мита, С. Хара, Р. Кондо. - М.: Мир, 1994. - 256 с.
7. Теория автоматического управления. Ч. 2. / Под ред. А.А. Воронова. - М.: Высшая школа, 1986. - 504 с.
8. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко. - К.: Наукова думка, 2008. - 243 с.
9. MathWorks Release 14. MATLAB 7. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа к ресурсу: http://www.mathworks.com/products/new_products/R14_transition.html.
10. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика / Б.Л. Ван дер Варден. - М.: Изд-во иностр. лит., 1960. - 436 с.

Поступила в редколлегию 28.10.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Слесарев, Национальный горный университет, Днепропетровск.

АДАПТИВНА САК СКЛАДНИМ БАГАТОЗВ'ЯЗНИМ ОБ'ЄКТОМ КЕРУВАННЯ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ ПРОГНОЗУВАННЯМ

І.Г. Гуліна, В.І. Корнієнко

Досліджені методи створення адаптивних систем автоматичного керування з інтелектуальним прогнозуванням для складних багатозв'язних об'єктів керування. Розроблені локальні системи автоматичного керування з самоналагоджувальним і ПИД регуляторами та прогнозуючою моделлю. На прикладі моделювання керування доменним процесом оцінена ефективність запропонованих локальних систем для нестационарних лінійних і нелінійних каналів управління з шумом.

Ключові слова: адаптивна САК, багатозв'язний об'єкт керування, інтелектуальне прогнозування, самоналагоджувальний регулятор, ПИД-регулятор.

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF THE DIFFICULT MULTICOHERENT CONTROL OBJECT WITH INTELLECTUAL PREDICTION

I.G. Gulina, V.I. Korniyenko

The methods of creation of the adaptive automatic control systems with intellectual prediction for the difficult multicoherent control object were investigated. The in-plant automatic control systems with self-tuning and PID regulators and predicting model were developed. On the example of design control of blast-furnace process it was appraised the efficiency of the offered in-plant systems for the non-stationary linear and nonlinear control ductings with noise.

Keywords: adaptive control system, difficult multicoherent control object, intellectual prediction, self-tuning regulator, PID-regulator.