

УДК 519.21.75

Ассоциативный автомат адаптивного управления технологическими процессами на основе нейронных сетей*

В.Н. СИЗЫХ, А.Ю. МУХОПАД

Иркутск, Иркутский государственный университет путей сообщений

Рассматривается задача нейронного управления динамическим объектом с параметрической неопределенностью. Предлагается новая архитектура организации технологического процесса через параллельное взаимодействие технологических модулей – однослойных нейронных сетей. На основе прямого метода Ляпунова и метода скоростного градиента в классе абсолютно устойчивых систем разработан нелинейный алгоритм оперативного обучения и управления. Разработанный алгоритм адаптации позволяет ускорить сходимость нейро-нечеткого управления через обучение нейронной сети в реальном времени, осуществить предварительное обучение и применить эффективные процедуры инициализации ее параметров. За счет дополнительной обратной связи по управлению и организации скользящих режимов в окрестностях особых точек нелинейного безынерционного преобразователя обеспечивается свойство нечувствительности системы к внешним, параметрическим и динамическим возмущениям. В отличие от традиционного адаптивного подхода при организации нейроподобных структур условие гурвицевости матрицы при векторе состояния линейной части замкнутой системы может не выполняться, а областью допустимых значений параметра регулятора является все множество действительных чисел. Программно-аппаратную реализацию блока принятия решения ассоциативного автомата адаптивного управления предполагается реализовать в информационно-управляющей системе реального времени на основе применения новой структурной организации схемы Мура.

Ключевые слова: динамическая система, технологический процесс, технологический модуль, нейронная сеть, управление, обучение, адаптация, абсолютная устойчивость, скользящие режимы.

ВВЕДЕНИЕ

Комплексная система управления сложной технической системы состоит из объекта управления и управляющего устройства.

В машиностроении объектом управления является технологический процесс (ТП). ТП – это часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства [1]. ТП как объект управления является сложной динамической системой, включающей ряд подсистем-операций (технологических модулей (ТМ)), каждая из которых в отдельности тоже может быть объектом управления. Отмечается [1], что основная сложность управления ТП заключается в недостаточной степени его изученности, в ограниченности объема и в неполноте измерений.

В связи с этим предлагается ТП представить в виде распараллеленных между собой ТМ – однослойных нейронных сетей (НС) с заданной топологией связей между модулями, в своей совокупности представляющих ассоциативный автомат адаптивного управления [2].

Существующие схемы нейронного управления из-за медленной сходимости алгоритмов адаптации оказываются квазиадаптивными с настройкой вне темпа процессов управления, либо, будучи по сути адаптивными, недостаточно обоснованными из-за сложностей анализа работоспособности, устойчивости, качества и достижения целей управления [3, 4]. Кроме того, классические постановки задач нейроуправления слабо связаны с понятиями многосвязности и многомерности технических систем, алгоритмы управления сводятся либо к реализации программного управления с эмпирическим выбором количества слоев НС и числа нейронов в каждом слое, либо к настройке параметров классического ПИД-регулятора [3].

* Статья получена 5 декабря 2013 г.

В статье предлагается новый подход к совмещенному синтезу (синтезу в реальном или в ускоренном времени) нейрорегуляторов ТП, направленный на преодоление этих сложностей.

Рассматривается ТП, состоящий из k взаимодействующих ТМ. ТМ имеют общую, известную заранее структуру и отличаются только переходами от j -го входа к i -му выходу ТП. Полагая, что каждый j -й ТМ выполняет определенную функцию ТП и описывается последовательным соединением линейного динамического объекта и нелинейного безынерционного преобразователя (НБП) – однослойного персептрона (искусственного нейрона) (рис. 1). Предлагаемая структура отличается от традиционной схемы адаптивного регулятора (АР) наличием НБП и положительной жесткой обратной связи по скалярному выходу z . Такие ТМ образуют класс абсолютно устойчивых нелинейных систем [5]. В дальнейшем индекс j для краткости записей переменных и параметров системы уравнений, описывающей j -й ТМ ($j = \overline{1, k}$), опускаем.

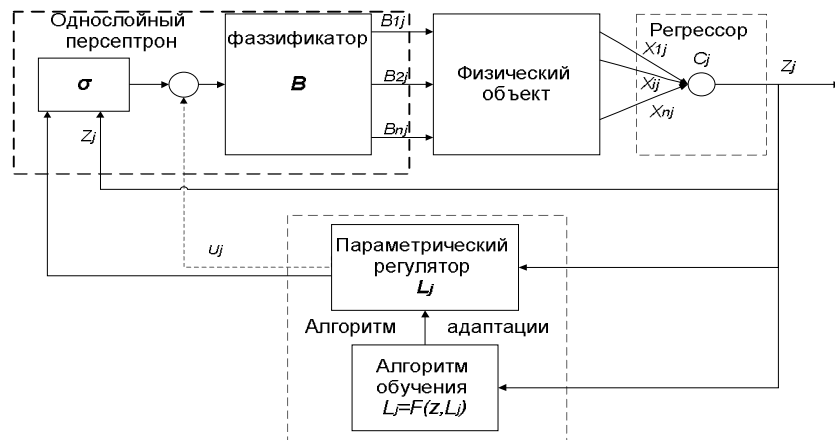


Рис. 1. Структура однослойной нейронной сети

На рис. 1 показана структура однослойной нейронной сети, параметрически адаптированной под j -й ТМ: сплошными линиями обозначена структура однослойной НС с нелинейностью в «прямой цепи» (прототип – структура адаптивного регулятора (рис. 16, а) работы [4, с. 351]); пунктирной линией и сумматором – «цепь внутренней обратной связи» по скалярному входу u (прототип – структура адаптивного регулятора (рис. 16, б) работы [4, с. 351]).

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НЕЙРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Математическое описание j -го ТМ соответствует уравнениям динамики многомерной односвязной технической системы (SISO-системы).

Уравнения j -го ТМ имеют вид

$$\dot{x} = Ax + B(\sigma(t, z, u) + u), \quad (1)$$

$$z = c^T x, \quad (2)$$

$$u = Lz. \quad (3)$$

Дифференциальные уравнения (1) описывают широкий класс объектов с неопределенностью и позволяют обособить разрывные системы управления в новый класс интеллектуальных систем ассоциативной адаптации [2]. В дальнейшем полагаем, что система (1) должна удовлетворять требованиям существования и единственности решения.

В формулах (1 – 3) обозначено: $x^T = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)$ – n -мерный вектор состояния j -го ТМ, $x \in R^n$; u – управление j -м ТМ (измеряемый скалярный вход системы (1)), $u \in U \subset C$; z –

наблюдение j -м ТМ (измеряемый скалярный выход системы (1)), $z \in R$; A – постоянная параметрически неопределенная матрица Якоби размерности $n \times n$; $B^T = (B_1 \ B_2 \ \dots \ B_n)$ – постоянный вектор настраиваемых параметров НБП размерности $n \times 1$; $c^T = (c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n)$ – вектор-столбец задаваемых параметров наблюдения (регрессии) размерности $1 \times n$; L – настраиваемая скалярная функция параметрического регулятора (3); $\sigma(t, x, z)$ – скалярная функция активации (ФА) однослойного персептрона, получаемая нелинейным преобразованием j -ого управления u и j -го наблюдения z .

Функция активации σ определяет архитектуру НС. В режиме *online* (оперативное обучение и управление), когда НС работает в реальном времени и выполняет функции адаптивного регулятора, будем полагать, что ФА удовлетворяет условиям [5]

$$0 \leq zu\sigma \leq \tilde{q}_1 \alpha z^2 + \tilde{q}_2 \beta u^2, \quad (4)$$

где $z \in (-\infty; \infty)$, $\tilde{q}_2 \in [0, 1]$, $\tilde{q}_1 = 1 - \tilde{q}_2$, $\alpha \in [0, \alpha_3]$, $\beta \in [0, \beta_3]$; $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$ – корректируемые на интервалах наблюдения нечеткие коэффициенты, определяющие перераспределение сигналов от входа к выходу и от выхода к входу (режим работы НС); α, β – весовые коэффициенты соответствующей физической размерности (ед.) при переменных в правой части ограничений на σ .

НБП $\sigma(\cdot)$ определяется правой частью выражения (4)

$$\sigma(t, z, u) = \tilde{q}_1 \alpha \frac{z}{u} + \tilde{q}_2 \beta \frac{u}{z}. \quad (5)$$

Функция (5) имеет две особые точки $z = 0$; $u = 0$. Предварительно будем считать их изолированными [4]. Так как наблюдение z и уравнение u – скалярные функции, то с учетом (3) НБП (5) можно представить в виде

$$\sigma(t, z, u) = \sigma(L) = \tilde{q}_1 \frac{\alpha}{L} + \tilde{q}_2 \beta L. \quad (6)$$

Зависимость $\sigma(\cdot) = \sigma(L)$ при фиксированных $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$ показана на рис. 2. Свойства функции активации $\sigma(\cdot) = \sigma(L)$ (формулы (5) и (6)) детально рассмотрены в работе [7].

НБП $B(u + \sigma)$ (1) определяет однослойный персептрон с ненулевым смещением, вектор-строка c^T называется регрессором или сенсором [6]. НБП являются базовыми процессорными элементами ассоциативного автомата [2].

При адаптивном подходе считается, что существует устойчивая внутренняя структура физического объекта [4], но неизвестны его параметры (коэффициенты матрицы A). В описании j -го ТМ присутствует и отделима линейная часть с передаточной функцией $W(p)$ (объект) и нелинейность с характеристикой $\sigma(\cdot)$. Поэтому коэффициенты передаточной функции $W(p)$ неизвестны, а относительно нелинейности указаны частичные свойства характеристики $\sigma(\cdot)$. Кроме того, неизвестен вектор B настраиваемых весовых коэффициентов однослойного персептрона.

Требуется осуществить оперативное управление j -м ТМ с помощью адаптивного параметрического нейрорегулятора L .

В основу предлагаемого подхода положена параллель со схемой адаптивного управления с самонастройкой: НС настраивает параметры управления, задающие работу обычного контроллера, таким образом, чтобы выходной сигнал j -го ТМ поддерживался как можно ближе к желаемому: $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_3 = 0$. Такое управление j -м ТМ называется стабилизирующим [4].

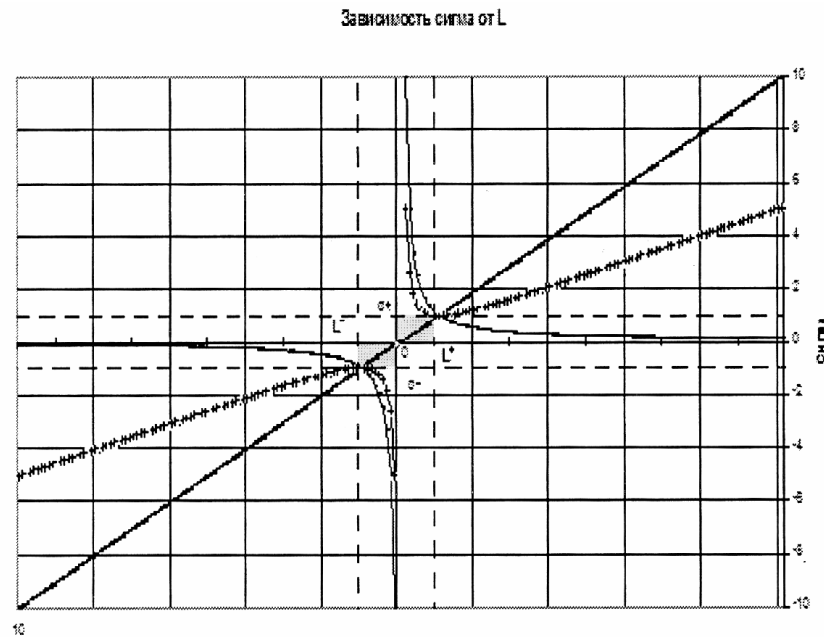


Рис. 2. Зависимость функции активации от значений регулируемого параметра при различных $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$ и $\alpha = 1$ (ед.), $\beta = 1$ (ед.).

Задача синтеза адаптивного параметрического нейрорегулятора решается в три этапа:

- 1) исследуется выбранный класс нелинейных систем на устойчивость;
- 2) синтезируется стабилизирующее управление u , обеспечивающее цель адаптации:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \vec{0};$$

- 3) по условиям устойчивости инициализируются параметры НС.

2. ПРЯМОЙ МЕТОД ЛЯПУНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ АБСОЛЮТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Устойчивость рассматривается как свойство свободного движения системы (1) после начального отклонения ее, вызванного какими-либо причинами. Невозмущенное движение $x_3 = 0$ определяется нулевым решением системы (1).

Если выполняются аналитическое условие устойчивости по Ляпунову [5] и условие $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_3 = 0$, то нулевое решение системы (1) асимптотически устойчиво. Если условие

$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_3 = 0$ выполняется для любых начальных условий $x(0)$, то нулевое решение системы (1) устойчиво в целом. Асимптотическую устойчивость нулевого решения системы (1) в целом при любом характере нелинейности внутри определенного класса определяет понятие абсолютной устойчивости.

Выдвинем следующие гипотезы.

Гипотеза 1. Для абсолютной устойчивости нулевого решения системы (1 – 3) при $u = 0$ в уравнении (1) для класса нелинейностей (4) необходимо и достаточно, чтобы эта система была асимптотически устойчива при $\sigma(t, z, u) = \tilde{q}_1 \alpha \frac{z}{u} + \tilde{q}_2 \beta \frac{u}{z}$ для любых $\tilde{q}_2 = [0, 1]$, $\tilde{q}_1 = 1 - \tilde{q}_2$, $\alpha \in [0, \alpha_3]$, $\beta \in [0, \beta_3]$.

Гипотеза 2. Для достижения цели адаптации $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ дифференциальной системы (1) при $u = 0$ необходимо и достаточно, чтобы ее нулевое решение было устойчиво в классе нелинейностей (4).

В работе [5] показано, что сформулированным гипотезам удовлетворяет система любого порядка, если ее импульсная функция положительна. Тогда задача данного класса абсолютно устойчивых систем сводится к определению эффективных критериев положительности таких функций.

Передаточная функция (ПФ) линейной части системы (1 – 3) от входа σ к выходу z (рис. 1) равна

$$W(p) = c^T (pI - A)^{-1} B = \frac{Q(p)}{P(p)}.$$

Здесь I – единичная матрица размера $n \times n$;

$P(p) = p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n$; $Q(p) = p^m + a_1 p^{m-1} + \dots + a_m$ ($m \leq n$) – полиномы для определения полюсов и нулей ПФ $W(p)$.

Обозначим через $p_1, \dots, p_n$ корни характеристического полинома $P(p)$ (полюса ПФ), а через $g(t)$ – импульсную переходную (весовую) функцию

$$g(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\operatorname{Re} p < \beta} e^{pt} \frac{Q(p)}{P(p)} dp, \quad \beta = \max_k \operatorname{Re} p_k.$$

Теорема 1. Если при неотрицательной импульсной функции ($g(t) \geq 0$ при $t \geq 0$) нулевое решение системы (1 – 3) при $u = 0$ в уравнении (1) устойчиво в целом, то для достижения цели адаптации $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ необходимо и достаточно выполнение одного из двух условий в классе нелинейностей (4):

- а) матрица A должна быть гурвицевой ($\operatorname{Re} p_k < 0$, $k = \overline{1, n}$);
- б) нулевое решение должно быть устойчивым

$$x(0) + [\tilde{q}_2 \beta L + \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L}] B = 0$$

$$\text{или} \quad \|x(0)\| \leq [\tilde{q}_2 \beta L + \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L}] \|B\|. \quad (7)$$

Теорема 2. Если при неотрицательной импульсной функции ($g(t) \geq 0$ при $t \geq 0$) матрица $A + LBc^T$ гурвицева и корни характеристического полинома управления u имеют особенности в левой полуплоскости, то нулевое решение уравнений (1 – 3) абсолютно экспоненциально устойчиво в классе нелинейностей (4). И, наоборот, если $g(t) \geq 0$ при $t \geq 0$, нулевое решение уравнений (1 – 3) экспоненциально устойчиво, то матрица A гурвицева, если гурвицев полином $U(p)$ управления u .

Следствие теоремы 2. Для достижения цели адаптации $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ в системе (1 – 3) необходимо и достаточно выполнение одного из двух условий в классе нелинейностей $u + \sigma(t, z, u)$:

- а) матрица $A + LBc^T$ должна быть гурвицевой;
- б) условие устойчивости нулевого решения должно совпадать с условием устойчивости нулевого решения уравнений (1 – 3) теоремы 1.

Аналитическое решение системы (1 – 3) при ограничениях вида (4) имеет вид [5]

$$x(t) = e^{(A+LBc^T)t} \left\{ x(0) + \left[\tilde{q}_2 \beta L + \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L} \right] B \right\}. \quad (8)$$

Доказательство теорем 1, 2 приводится в работе [5].

Теорема 3. Если для системы уравнений (1 – 3) существует положительная знакоопределенная функция $V(t, z, u) = \tilde{q}_1 \alpha z^2 + \tilde{q}_2 \beta u^2$, то при НБП вида (6) производная $\dot{V}$ от этой функции является тоже знакоопределенной, но противоположного знака, если одновременно выполняются условия

$$z \dot{z} < 0, L \dot{L} < 0. \quad (9)$$

При этом решение системы (1) асимптотически устойчиво: $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_3 = 0$.

Доказательство теоремы 3 приведено в работе [7].

Поскольку точки $z = 0, u = 0$ – особые точки, то достаточное условие асимптотической устойчивости приближенно выполняется в некоторой области, ограниченной вертикальными $L^\pm$ и горизонтальными $\sigma^\pm$ асимптотами функции $\sigma(L)$ (рис. 2). Эта область называется областью скользящих режимов [8]. При $L > L^+$ и $L < L^-$ функция $\sigma(L)$ близка к линейной зависимости, и, следовательно, параметрический регулятор L в этих областях изменения аргумента является квазилинейным.

В области скользящих режимов необходимо обеспечить выполнение условий (9) теоремы 3.

Более подробно выясним, какой физический смысл имеют задаваемая формулой (5) функция активации и условие б) теоремы 1.

Нетрудно заметить, что ФА (5) содержит два слагаемых: первое слагаемое соответствует обратному (инверсному) распространению сигнала, второе слагаемое – его прямому распространению.

Так как наблюдение z и управление u в архитектуре встроенной в обычный адаптивный регулятор однослойной НС – скалярные функции, а особые точки считаются изолированными, то ФА (5) для j -го ТМ вычисляется по формуле (6)

$$\sigma(t, z, u) = \tilde{q}_1 \frac{\alpha}{L} + \tilde{q}_2 \beta L, \quad \tilde{q}_2 \in [0, 1], \quad \tilde{q}_1 = 1 - \tilde{q}_2.$$

В задачах управления параметр $\tilde{q}_2$ рекомендуется связывать с интервалом наблюдения выходного сигнала z , который разбивается на s периодов дискретизации $T_0: T_0 = \frac{T - t_0}{s}$.

В каждый период дискретизации выполняется несколько обучающих итераций. В самом простом случае можно принять период дискретизации равным периоду корректировки обучающей итерации: $T_0 = T_L$ и связать при $t_0 = 0$ период наблюдения выходного сигнала с реальным временем: $\tilde{q}_2 = \frac{t}{sT_0}, t \in [0, sT_0], s = 1, 2, \dots$

Простой анализ выражений (5, 6) показывает, что нейронная сеть функционирует в трех режимах.

А. Если $\tilde{q}_2 = 0$, то выполняется инициализация параметров НС; сеть предварительно обучается ($\tilde{q}_1 = 1$) по алгоритму обратного распространения ошибки сигнала (в нашем случае сигнала z ($z_3 = 0$)).

Б. Если параметр $0 < \tilde{q}_2 < 1$, то в реальном времени происходит дальнейшее обучение нейронной сети и одновременно нейро-нечеткое управление параметрически неопределенного физического объекта известной структуры (рис. 1).

В. Если параметр $\tilde{q}_2 = 1$, то процесс обучения сети заканчивается и НС работает как обычный адаптивный регулятор ($\tilde{q}_1 = 0$).

Условия А – В представляют собой систему продукционных правил (продукций) и реализуются в блоке принятия решений (БПР) ассоциативного автомата адаптивного управления [2].

3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СКОРОСТНОГО ГРАДИЕНТА И ТЕОРИИ СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ

В качестве эффективного алгоритма обратного распространения в статье предлагается использовать метод скоростного градиента (МСГ) [6].

Формулировка задачи синтеза стабилизирующего управления по МСГ сводится к следующему.

Состояние j -го ТМ – $x \in R^n$, управление u – скалярное, наблюдается скалярная величина $z = c^T x \in R$. Эволюцию j -го ТМ описывает дифференциальная система (1), где измеряемая кусочно-дифференцируемая функция $\sigma(t, z, u)$ является аддитивной добавкой к скалярному управлению u и подчинена ограничению вида (4), B – постоянный n – вектор настраиваемых входных параметров (коэффициентов синоптических связей однослойной НС). Управление линейно зависит от наблюдаемой величины: $u = Lz$.

Матрица A и вектор B заранее неизвестны. Вектор c , учитывающий «вклады» переменных состояния x в наблюдение z , задается.

Требуется синтезировать параметрический регулятор $L = L(t)$.

Цель управления – выполнение условия $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ – соответствует минимизации в пределе локального функционала $J(t) = 0,5 x^T H x$, где H – положительно определенная, симметрическая матрица размерности $n \times n$.

Для синтеза нелинейного параметрического регулятора применим схему МСГ в дифференциальной форме [6].

Для этого определим полную производную от локального функционала

$$\dot{J}(t) = 0,5 (x^T H \dot{x} + \dot{x}^T H x) = x^T H \left[(A + L B c^T) x + B \left(\frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L} + \tilde{q}_2 \beta \right) \right]$$

и вычислим градиент по параметру L :

$$\nabla_L \varphi(x, L) = x^T H B \left(z - \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L^2} + \tilde{q}_2 \beta \right).$$

По схеме МСГ синтезируемый в дифференциальной форме нелинейный скалярный регулятор имеет вид

$$\dot{L} = -\gamma \nabla_L \varphi(x, L). \quad (10)$$

Для системы (1 – 3) при ограничениях на ФА типа (4) алгоритм адаптации (обучения) j -го ТМ записывается в виде

$$\dot{L} = -\gamma x^T H B \left(z - \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L^2} + \tilde{q}_2 \beta \right), \quad (11)$$

где $\gamma > 0$ – положительное число, определяющее скорость убывания градиента по параметру L .

По постановке задачи процедура управления должна зависеть только от наблюдаемой величины z (рис. 1). Поэтому в (11) потребуем соблюдения равенства

$$HB = c. \quad (12)$$

Тогда с учетом того, что $c^T = B^T H$, в окончательном виде получим алгоритм адаптации j -го ТМ

$$\dot{L} = -\gamma \left(z - \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L^2} + \tilde{q}_2 \beta \right) z, \quad (13)$$

где $\tilde{q}_2 \in [0, 1]$, $\tilde{q}_1 = 1 - \tilde{q}_2$ – параметры, определяющие режим работы НС.

Формула (13) справедлива в областях, для которых $L > L^+$, $L < L^-$ и функция $\sigma(L)$ близка к линейной зависимости. Параметрический регулятор L в этих областях изменения аргумента является квазилинейным (рис. 2).

В области, ограниченной вертикальными $L^\pm$ и горизонтальными $\sigma^\pm$ асимптотами функции $\sigma(L)$ (рис. 2), возникают скользящие режимы, для обеспечения асимптотической устойчивости которых при измерении r первых фазовых координат вместо формул (3), (13) параметрического регулятора используется закон управления с разрывными коэффициентами [8, с. 249]. В нашем случае для решения задачи стабилизации принимаем $r = 1$ и закон управления вида

$$u = -Lz - \delta_u, \quad L = \begin{cases} L^+, & zs > 0, \\ L^-, & zs < 0, \end{cases} \quad (14)$$

$$\delta_u = \begin{cases} \delta_0, & s > 0, \\ -\delta_0, & s < 0, \end{cases} \quad \delta_0 = |\delta_0| \text{sign}(c^T B). \quad (15)$$

Здесь δ_0 – сколь угодно малое отличное от нуля число, знак которого совпадает со знаком скаляра $c^T B$, а поверхность переключения определяется вторым сомножителем формулы (13):

$$s(z) = z - \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L^2} + \tilde{q}_2 \beta. \quad (16)$$

Производная по времени от функции s в силу уравнений (16) имеет вид

$$\dot{s}(z) = \dot{z} + \frac{3\tilde{q}_1 \alpha}{L^3} \dot{L}. \quad (17)$$

Условия осуществления скольжения при аксиоматическом подходе определяются неравенствами [8]:

$$\dot{s}^+ = \lim_{s(x) \rightarrow +0} \dot{s} < 0, \quad \dot{s}^- = \lim_{s(x) \rightarrow -0} \dot{s} > 0. \quad (18)$$

Указанные условия (18) отделяются друг от друга многообразием $\dot{s}^+ = 0$ или $\dot{s}^- = 0$, или в общем случае $\dot{s} = 0$.

Условие попадания изображающей точки на поверхность скольжения имеет вид [8]

$$s(z)\dot{s}(z) < 0. \quad (19)$$

и соответствует условиям (9) теоремы 3.

Искомое многообразие $\dot{s}(z) = 0$ определяется из формулы (17)

$$\dot{s}(z) = \dot{z} + \frac{3\tilde{q}_1\alpha}{L^3}\dot{L} = 0. \quad (20)$$

Учитывая, что в области скользящих режимов при $L = L^+$ или $L = L^-$ закон управления (13) приобретает вид

$$\dot{L} = -\gamma z^2, \quad (21)$$

после подстановки формулы (21) в равенство (20) получим уравнение скользящего движения

$$\dot{z} = \frac{3\tilde{q}_1\alpha\gamma}{L^3}z^2, \quad (22)$$

где параметр $L = L^\pm$ согласно формуле (14) принимает одно из возможных значений L^+ или L^- .

Решение уравнения скользящего движения (22) может быть получено в аналитическом виде через разделение переменных

$$\frac{dz}{z^2} = \frac{3\tilde{q}_1\alpha\gamma}{(L^\pm)^3}dt$$

после интегрирования его правых и левых частей

$$z = \frac{(L^\pm)^3}{3\tilde{q}_1\alpha\gamma t} + C = \pm \frac{\lambda_1}{t} + C, \quad (23)$$

где $\lambda_1 = \frac{(|L^\pm|)^3}{3\tilde{q}_1\alpha\gamma}$ – варьируемый коэффициент пропорциональности, C – константы, определяемые различными начальными условиями $z(0)$.

Семейство кривых (23) представляют собой функции обратно пропорциональных зависимостей $z = f(t)$ от времени, в I и IV квадрантах относительно оси времени. Анализ этих кривых показывает, что при $t \rightarrow \infty$ функция z стремится к нулю. Тем самым при организации скользящего движения достигается цель адаптации: $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = z_3 = 0$ по выходу системы

(1 – 3) в задаче стабилизации. Так как при $t \rightarrow \infty$ наблюдаемая величина $z \rightarrow 0$, то в силу уравнений (21), (3) в области скользящих режимов параметр L и управление u также стремятся к нулю.

Фазовый портрет движения изображающей точки согласно уравнению скользящего движения (22) определяется семейством парабол $\dot{z} = f(z) = \pm \lambda_2 z^2$, симметричных вверх и вниз относительно оси z . Здесь $\lambda_2 = \frac{3\tilde{q}_1\alpha\gamma}{(|L^\pm|)^3}$ – варьируемый коэффициент пропорциональности.

Таким образом, достижение системой (1 – 3) по выходу z естественной цели адаптации: $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = z_3 = 0$, т. е. достижение ограниченного предельного множества, определяет основное свойство адаптивных систем – диссипативность [6, с. 403]. В нашем случае свойство диссипативности обеспечивает грубость системы к внешним возмущениям за счет введения зоны нечувствительности $\sigma^\pm$ в функции $\sigma(L)$, грубость системы к параметрическим возмущениям

за счет введения зоны нечувствительности $L^\pm$ параметра регулятора L (рис. 2) и грубость системы к динамическим возмущениям за счет введения дополнительной обратной связи по выходу z (рис. 1).

4. ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Реализация условия устойчивости нулевого решения уравнений j -го ТМ (условие б) теоремы 1 или следствия теоремы 2) для достижения цели адаптации $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ сводится к инициализации начальных условий алгоритма адаптации (13).

Инициализация начальных условий алгоритма адаптации (13) сводится к следующему [5].

1) Используя пакет Mat Lab Toolbox LMI, методом линейного программирования решаем систему матричных неравенств Ляпунова для замкнутой АР линейной части системы (1)

$$HA_3 + A_3^T H < 0$$

и определяем матрицу H .

2) Задавая веса $c = c_3$ выходных сигналов x_k ($k = \overline{1, n}$), из формулы (12) вычисляем параметры вектора B НБП: $B = H^{-1} c_3$.

3) Применяя условие устойчивости б) теоремы 1, определяем начальное условие $L(0)$ алгоритма адаптации (13) ($\tilde{q}_1 = 1, \tilde{q}_2 = 0$): $L(0) = -\alpha \frac{c_3^T B}{z(0)}$.

В последующем начальные условия алгоритма адаптации (13) уточняются в реальном времени с шагом, равным периоду дискретизации (интервалу наблюдения) выходного сигнала z .

Альтернативный путь предварительной инициализации параметров НС по алгоритму обратного распространения – использование пакета Neural Toolbox среды Mat Lab [7].

Дальнейшее оперативное обучение и управление j -м ТМ производится по алгоритму адаптации (13) ($0 < \tilde{q}_2 < 1$). При $\tilde{q}_2 = 1$ процесс обучения НС заканчивается и НС работает как обычный АР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье на основе организации параметрического управления по методу скоростного градиента и теории систем с переменной структурой разработан эффективный алгоритм адаптации, позволяющий:

- 1) ускорить сходимость нейро - нечеткого управления за счет поинтервального за период дискретизации обучения нейронной сети в реальном времени;
- 2) применить гибридные сети, в которых искусственные нейронные сети связываются со структурами адаптивного управления на основе традиционных технологий;
- 3) осуществить предварительное обучение и применить эффективные процедуры инициализации параметров нейронной сети.

Для практической реализации алгоритма адаптации на базе однослойной нейронной сети достаточно знаний о порядке дифференциальных уравнений, описывающих физический объект с устойчивой структурой взаимосвязей между ее элементами.

В отличие от традиционного адаптивного подхода, когда область устойчивых решений линейной части системы (1) определяется условием $L < 0$, при организации нейроподобных структур областью допустимых значений параметра L регулятора является все множество действительных чисел $L \in R$.

Программно-аппаратную реализацию БПР ассоциативного автомата адаптивного управления предполагается реализовать в информационно-управляющей системе реального времени на основе применения новой структурной организации схемы Мура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Никифоров А.Д. Процессы управления объектами машиностроения / А.Д. Никифоров, А.Н. Ковшов, Ю.Ф. Назаров. – М.: Высшая школа, 2001. – 455 с.
- [2] Пашков Н.Н. Ассоциативный автомат децентрализованного адаптивного управления системой автономных вычислительных процессов / Н.Н. Пашков, Ю.Ф. Мухопад, Д.Ц. Пунсык-Намжилов // Научный вестник НГТУ. – № 2 (35). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 201–206.
- [3] Омату С. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2 / С. Омату, М. Халид, Р. Юсоф // Нейроконтроллеры и их применение / Под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с.
- [4] Срагович В.Г. Адаптивное управление / В.Г. Срагович. – М.: Наука, 1981. – 384 с.
- [5] Мухопад Ю.Ф. Адаптивный подход к нейронному управлению одним классом абсолютно устойчивых систем / Ю.Ф. Мухопад, Н.Н. Пашков, В.Н. Сизых // Фундаментальные исследования. – № 8. – М.: Изд-во РАЕ, 2011. – С. 139–147.
- [6] Фомин В.Н. Адаптивное управление динамическими объектами / В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, В.А. Якубович. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит., 1981. – 448 с.
- [7] Сизых В.Н. Адаптивное нейроуправление типовым технологическим модулем на основе метода скоростного градиента. Межрегиональный совет по науке и технологиям (МСНТ). Механика и процессы управления. Материалы XXXXI Всероссийского симпозиума / В.Н. Сизых, И.А. Шлыкова. – М.: РАН, 2011. – Т. 2. – С. 246–255.
- [8] Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д.П. Ким. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.

REFERENCES

- [1] Nikiforov A.D., Kovshov A.N., Nazarov Iu.F. Protsessy upravleniia ob"ektami mashinostroeniia [Engineering Management Processes]. Moscow, Vysshiaia shkola [High school], 2001, 455 p.
- [2] Pashkov N.N., Mukhopad Iu.F., Punsyk-Namzhilov D.Ts. Assotsiativnyi avtomat detsentra-lizovannogo adaptivnogo upravleniia sistemoi avtonomnykh vychislitel'nykh protsessov [Associative automatic adaptive control system of decentralized autonomous computational processes]. *Nauchnyi vestnik NGTU* [Scientific Journal of NSTU]. Novosibirsk, 2009, no. 2 (35), pp. 201–206.
- [3] Omatu S., Khalid M., Iusof R. Neuro-Control and its Applications. Springer-Verlag London Limited, 1996. 272 p. (Russ. Ed.: Neiroupravlenie i ego prilozheniia. Kn. 2 // Neirokontrol-lery i ikh primenieie / Pod red. A.I. Galushkina, V.A. Ptichkina. Moscow, IPRZhR, 2000, 272 p.
- [4] Sragovich V.G. Adaptivnoe upravlenie [Adaptive control]. Moscow, Nauka, 1981, 384 p.
- [5] Mukhopad Iu.F., Pashkov N.N., Sizykh V.N. Adaptivnyi podkhod k neironnomu upravleniiu odnim klassom ab-solutno ustoiichivyykh system [Adaptive approach to neuro-control of one class of absolutely stable systems]. *Zhurnal «Fundamental'nye issledovaniia»* [Fundamental research]. Moscow.: Izd-vo RAE. 2011, no. 8, pp. 139–147.
- [6] Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A. Adaptivnoe upravlenie dinamicheskimi ob"ektami [Adaptive control of dynamic objects]. Moscow, Nauka, Glavnaia redaksiia fiz.-mat. lit., 1981. 448 p.
- [7] Sizykh V.N., Shlykova I.A. Adaptivnoe neiroupravlenie tipovym tekhnologicheskim modulem na osnove metoda skorostnogo gradienta [Adaptive neuro-control for model technological module on bases of the high-speed gradient method]. *Mezhregional'nyi sovet po nauke i tekhnologii (MSNT). Mekhanika i protsessy upravleniia. Materialy XXXXI Vserossiiskogo simpoziuma* [The interregional Council of science and technology (MCST). Mechanics and control processes. Proc. of the XXXXI All-Russian Symposium]. Moscow, RAN [Russian science academy], 2011, vol. 2, pp. 246–255.
- [8] Kim D.P. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia. T. 2. Mnogomernye, nelineinye, opti-mal'nye i adaptivnye sistemy [Theory of automatic control, vol. 2. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Moscow, FIZMATLIT, 2004, 464 p.

Сизых Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры управления техническими системами Иркутского государственного университета путей сообщения. Основное направление научных исследований – теория оптимального управления, интеллектуальные системы управления. Имеет более 150 публикаций, в том числе 1 монографию и 3 учебных пособия. E-mail: sizykh_vn@mail.ru.

Мухопад Александр Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, докторант-соискатель Иркутского государственного университета путей сообщения. Основное направление научных исследований – теория конечных автоматов. Имеет более 50 публикаций. E-mail: jcmg@mail.ru

V.N. Sizykh, A.Iu. Mukhopad

Associating automat for technological processes adaptive control on based of neural networks

The problem of physical object neural control with parametric uncertain is considered. The architecture to organizations of the technological process through parallel interaction of technological modules (agents) similar one-layer neural-fuzzy control is offered. On based of the Lyapunov's direct research method of absolute stability and speed gradient method both a nonlinear algorithm of the operative education and control is designed. The developed algorithm of adaptation allows accelerating a convergence neural-fuzzy control through the neural network training in real time, carrying out preliminary procedures training and to apply an effective ways of parametrical their initialization. Through the additional feedback on control and the sliding modes organization about artificial neuron special points both the invariance property to external, parametrical and dynamic object noise is provided. At the organization similar neural network structures the Gurvitz's state matrixes condition for system linear part can't be carried out. Besides, area of admissible values of regulator's parameter is all set of real numbers. Software and hardware implementation of decision-making process an associating automat of adaptive control is expected to implement in informational real time systems on based of the new structural Moor's automates organization.

Key words: dynamics object, technological process, technological modules, neural network, control, education, adaptation, absolute stability, sliding modes.