

**МОДЕЛИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ
ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЗВЕНЬЯМИ
НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

© 2016 г. В.Е. БОЛНОКИН, В.И. СТОРОЖЕВ, НГУЕН ДИНЬ ЧУНГ

ФГУП Научно-исследовательский и экспериментальный
институт автомобильной электроники и электрооборудования
e-mail: vitalybolnokin@yandex.ru, stvi@i.ua, chungtasagroup@gmail.com

Введение

Адаптивные системы на базе нейронной сети позволят решить задачу управления нелинейными динамическими объектами, параметры которых могут меняться в процессе функционирования. Математическое описание таких систем недостаточно определено. Классические методы синтеза систем управления базируются на хорошо развитом аппарате интегро-дифференциального исчисления, созданном Ньютоном около трехсот лет назад, и преобразовании Лапласа. Искусственные нейронные сети (ИНС) представляют собой альтернативное, существующее всего несколько лет, направление в теории автоматического управления, предлагающее иной способ решения этой задачи [1-6].

Решающую роль во внедрении искусственных нейронных сетей в сферу управления сыграли работы *S. Narendra* [7]. Применение искусственных нейронных сетей в задачах идентификации и управления динамическими объектами нашло широкое распространение благодаря следующим их свойствам:

- способности к обучению и накоплению информации;
- аппроксимирующей способности;
- свойству параллельной обработки сигналов.

В системах управления они могут применяться в качестве регуляторов и идентификаторов. Для построения регуляторов и идентификаторов наибольшее применение получили многослойные нейронные сети прямого распространения, в которых информация следует от слоя к слою в направлении движения сигнала, обратное движение запрещено. ИНС такого типа получили широкое распространение благодаря простоте структуры, быстрдействию за счет параллельной обработки информации, наличию многочисленных разработанных алгоритмов обучения сетей и стандартных программ для их реализации.

Аппроксимирующие способности нейронных сетей с динамическими алгоритмами обучения позволяют моделировать сложные нелинейные динамические объекты управления в виде прямых и инверсных моделей по измерениям «вход-выход» объектов.

В работе рассмотрен метод аналитического конструирования адаптивных систем управления сложными нелинейными динамическими объектами на базе нейронной сети.

Методика построения адаптивных систем управления

Для изложения основной идеи подхода рассмотрим динамический объект, математическое описание которого представляется в виде:

$$\dot{x}_i = f_i(\underline{x}) + bu_j, \quad i=\overline{1,n}; \quad j=\overline{1,m}, \quad (1)$$

где x_i - переменная состояния; b – постоянный коэффициент; f_i – нелинейные функции; u_j – сигналы управления. Рассмотрим систему со скалярным управлением. Задача синтеза адаптивного регулятора решается в двух этапах.

Для объекта (1) требуется определить закон управления, который обеспечивает следующие условия:

а) асимптотическую устойчивость замкнутой системы;

б) минимизацию функционала качества в виде: $J = \int_0^{\infty} [\Psi(x)^2 + \dot{\Psi}(x)^2] dt$,

где Ψ – является произвольной дифференцируемой или кусочно-непрерывной функцией фазовых координат и $\Psi(0) = 0$.

В связи с тем, что на функцию Ψ не накладывается никаких ограничений, семейство устойчивых экстремалей должно удовлетворять уравнению Эйлера:

$$\Psi + \dot{\Psi} = 0. \quad (2)$$

Полная производная функции Ψ имеет вид:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{d\Psi}{dx_k} \dot{x}_k.$$

Поставим вместо \dot{x}_k правые части исходной системы дифференциальных уравнений объекта (1), тогда получим:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{d\Psi}{dx_k} f_k + \frac{d\Psi}{dx_n} u. \quad (3)$$

Из уравнения (2) с учетом выражения (3) в силу исходных уравнений объекта (1) получаем следующее уравнение:

$$\frac{d\Psi}{dx_n} u + \sum_{k=1}^n \frac{d\Psi}{dx_k} f_k + \Psi = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет определить сигнал управления u при выполнении условия $\frac{d\Psi}{dx_n} \neq 0$ в виде:

$$u = - \left(\frac{d\Psi}{dx_n} \right)^{-1} \left[\sum_{k=1}^n \frac{d\Psi}{dx_k} f_k + \Psi \right], \quad (5)$$

который обеспечивает перевод изображающей точки x_i в пространстве состояния системы из произвольного начального состояния в окрестность многообразия $\Psi = 0$. Закон управления (5) удерживает изображающую точку в этой окрестности при ее дальнейшем движении вдоль $\Psi = 0$. Это движение будет описываться системой дифференциальных уравнений размерности $n-1$:

$$\dot{x}_{i\Psi} = f_i \left(x_{1\Psi}, x_{2\Psi}, \dots, x_{(n-1)\Psi} \right), \quad i=1,2,\dots,n-1. \quad (6)$$

Следовательно, для обеспечения условия асимптотической устойчивости замкнутой системы необходимо выбрать функцию Ψ так, чтобы решение системы диффе-

ренциальных уравнений (6), описывающих движение изображающей точки вдоль многообразия $\Psi = 0$ к началу координат было устойчивым. Отметим, что качество системы управления задается соответствующими указанными многообразиями.

При отсутствии достаточной информации о функциях f_i и коэффициенте b реализовать закон управления в виде (5) невозможно. В этом случае возможным вариантом решения может быть применение адаптивного регулятора. Как было сказано выше, выходной сигнал нейронной сети обладает хорошим аппроксимирующим свойством. Это наводит на мысль, что использование нейронной сети может дать хороший результат. Нейрорегулятор формирует управляющее воздействие в следующем виде:

$$u = \frac{\sum_{j=1}^L \bar{\lambda}^j \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)}{\sum_{j=1}^L \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)}, \quad (7)$$

где $\bar{\lambda}^j$ - численное значение управляющего сигнала, при котором $\mu_{B^j}(\bar{\lambda}^j) = 1$.

Вводим обозначение векторной функции

$$\underline{\zeta}(\underline{x}) = (\zeta^1(\underline{x}), \zeta^2(\underline{x}), \dots, \zeta^L(\underline{x}))^T, \quad (8)$$

где $\zeta^j(\underline{x})$ имеет вид:

$$\zeta^j(\underline{x}) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i)}{\sum_{j=1}^L \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)}. \quad (9)$$

Тогда выражение (7) с учетом (9) можно представить:

$$u = \underline{\lambda}^T \underline{\zeta}(\underline{x}). \quad (10)$$

Хотя согласно (10) сигнал управления определяется как функция от переменных состояния, в некоторых случаях, где отсутствует возможность измерения всех переменных состояния, он может быть определен в зависимости от вектора ошибки.

Изложенный метод позволяет без ограничения общности решать задачу построения адаптивных систем управления не только для объектов второго порядка, но и нелинейных объектов n -го порядка, описывающихся системой уравнений (1). В этом случае закон адаптации примет вид:

$$\dot{\underline{\lambda}} = \gamma \alpha_n \frac{df_1}{dx_n} \Psi(\underline{e}) \underline{\zeta}(\underline{e}), \quad (12)$$

где: $\underline{e} = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]$ - вектор ошибки; $\Psi(\underline{e}) = \sum_{k=1}^n \alpha_k e_k$.

Заключение

Преимущество рассмотренного метода состоит в том, что он позволяет: во-первых, синтезировать регуляторы для объектов, математическое описание которых известно не точно, во-вторых, учитывать человеческие знания опыт при формировании закона управления. Полученные системы управления благодаря своей адаптивной способности могут функционировать в условиях неопределенности внешних и внутренних возмущений. Синтезированный закон адаптации параметров регуляторов прост в

реализации, что облегчает процесс адаптации в режиме on-line и находит широкое применение при построении систем управления технологическими процессами, например технологии в производстве изделий электронной техники [8–10].

На основе анализа рассмотренных примеров и систем управления с нейронными сетями [3], можно отметить следующие особенности их применения:

- отсутствуют аналитические методы для решения задачи выбора структуры сетей и количества нейронов в них;
- при формировании законов управления невозможно в рамках теории нейронных сетей учитывать знания и опыт экспертов; это приводит к мысли об интеграции подходов теории нечетких алгоритмов и нейронных сетей для создания более совершенных систем управления сложными нелинейными динамическими объектами;
- открытым остается вопрос об устойчивости системы управления с нейрорегулятором;
- как правило, процедура обучения нейронной сети требует значительного времени, величина которого зависит от количества нейронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев А.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные системы автоматического управления // Известия РАН. Техническая кибернетика. 1994. № 5. С. 23–27.
2. Болнокин В.Е., Хо Дак Лок, Данг Ван Уи. Адаптивные системы управления на базе нечетких регуляторов и нейросетевой технологии, монография, издание третье, расширенное и дополненное, М.: издательство ИИНТЕЛЛ, 2011. – 428 с.
3. Болнокин В.Е., Хо Д. Лок. Адаптивное управление на базе нечетких регуляторов и нейросетевой технологии. – Воронеж: Научная книга, 2012. – 280 с.
4. Bolnokin V.E., Ho Dac Loc, Nguyen Ngoc Hue. Adaptive control by nonlinear dynamic objects on basis of the neural network. // American Journal of Control Systems and Information Technology, ISSN 2327-9516. 2014. V. 3. № 1. P. 3–9.
5. Zakharov V.N. et al. Intelligent systems of control of apparatuses for artificial ventilation of the lungs. I. Principles of construction // J. computer and system sciences international. 1996. V. 35. № 1. P. 32–35.
6. Mudi R.K., Pal N.R. A self-tuning fuzzy PI controller // Fuzzy sets and systems. 2000. V. 115. . 23–26.
7. Narendra K.S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Trans. Neural networks. 1990. V. 1. P. 4–27.
8. Иванов В.И., Лучников П.А., Сигов А.С. Ионные технологии в производстве изделий электронной техники: учебное пособие / под ред. А.С. Сигова. Москва, 2010. – 206 с.
9. Афанасьев М.С., Лучников П.А., Митягин А.Ю., Назаренко А.А., Чучева Г.В. Особенности технологической совместимости формирования слоистых гетероструктур на основе углеродных и перовскитных пленок // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. 2012. Т. 3. № 1. С. 29–37.
10. Ярмоленко М.А., Рогачев А.А., Лучников П.А., Рогачев А.В. Структура вакуумных композиционных покрытий полимер-серебро, осажденных при электронно-лучевом распылении компонентов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 1–2. С. 276–279.