

УДК 681.513

Н.М. Кораблев, А.Э. Макогон, О.Г. Руденко

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМ
ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО
НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА С ИММУННОЙ НАСТРОЙКОЙ**

Аннотация: в статье рассматривается синтез адаптивной системы управления нелинейным динамическим объектом на основе использования нейросетевого нечеткого регулятора, в качестве базовой модели которого взята нечеткая модель Такаги-Сугено нулевого порядка. Предложены различные варианты настройки параметров регулятора в режимах off-line и on-line с помощью искусственных иммунных систем.

Введение

При построении адаптивных систем автоматического управления (АСАУ) возникают трудности в связи с недоступностью прямых измерений всех координат вектора состояния, описывающего объект управления при относительно высоком порядке дифференциального уравнения. Кроме того, наличие блока идентификации динамики объектов управления и оценка переменных состояния усложняют структуру АСАУ [1,2]. Законы настройки параметров управляющих устройств могут быть получены существующими методами только в частных случаях, т.е. не существует универсального метода синтеза законов адаптации. Во многих адаптивных системах эта задача решается путем использования поисковых алгоритмов, при использовании которых качество полученного решения существенно зависят от поверхности отклика искомых параметров. АСАУ, синтезированные на базе нечетких регуляторов и нейросетевой технологии, обладают более простой структурой и несложны в реализации [3]. На основании функционального сходства нечетких систем и нейронных сетей при конкретных условиях можно создавать системы управления, обладающие свойствами обучения и адаптации.

Задача настройки параметров нейросетевого нечеткого регулятора (НР), как правило, является многоэкстремальной

задачей оптимизации. Градиентные методы, которые можно использовать для настройки ННР, как известно, работают быстро только при малом количестве настраиваемых параметров и не гарантируют определения глобального экстремума.

Одним из путей решения проблемы настройки ННР является разработка новых и развитие существующих методов. Перспективным является подход, основанный на использовании искусственных иммунных систем (ИИС) [4, 5], которые являются новой парадигмой мягких вычислений. Поэтому синтез АСАУ нелинейными динамическими объектами на основе ННР с иммунной настройкой является актуальной задачей.

Постановка задачи

Рассматривается задача синтеза ННР АСАУ нелинейным динамическим объектом, математическое описание которого имеет вид [1,2]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(\bar{x}, \delta_i(t)) + g_j(\bar{x}) u_j^*; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}; \\ y = h(\bar{x}); \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – вектор переменных состояния; $f_i(\bar{x})$, $g_j(\bar{x})$ и $h(\bar{x})$ – нелинейные непрерывные дифференцируемые функции; $\delta_i(t)$ – неконтролируемые возмущения, ограниченные по амплитуде; u^* – сигнал управления; y – выходная переменная.

В качестве базовой модели ННР, входными сигналами которого являются ошибка e и ее производная $\dot{e}$, используется модель Такаги-Сугено нулевого порядка [3]:

$$R^j : IF \ e_1 \text{ is } T_1^j \text{ AND } e_2 \text{ is } T_2^j \text{ THEN } u = p_j, j = \overline{1, L}, \quad (2)$$

где $e_1 = e$; $e_2 = \dot{e}$; p_j – параметры регулятора; T_1^j, T_2^j – термы лингвистических переменных входных сигналов с гауссовыми функциями принадлежности, которые описываются выражениями:

$$\begin{aligned} \mu_i(e) &= \exp \left[- \left(\frac{e - m_i}{\sigma_i} \right)^2 \right], i = \overline{1, K}, \\ \mu_j(\dot{e}) &= \exp \left[- \left(\frac{\dot{e} - m_j}{\sigma_j} \right)^2 \right], j = \overline{1, K}, \end{aligned} \quad (3)$$

где m_i, m_j – центры нечетких множеств; σ_i, σ_j – отвечают за крутизну функций, K – число функций принадлежности, L – количество правил вывода.

Выходной сигнал ННР может быть записан в виде [6]:

$$u = p^T \bar{\xi}(\bar{e}), \quad (4)$$

где $\bar{e} = [e_1; e_2]$ – вектор ошибки основного контура системы управления, $\bar{\xi}(\bar{e}) = [\xi_1(\bar{e}), \xi_2(\bar{e}), \dots, \xi_L(\bar{e})]^T$ – вектор, характеризующий функции принадлежности терм лингвистических переменных входных сигналов, составляющие которого $\xi_j(\bar{e})$ имеют вид:

$$\xi_j(\bar{e}) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{T_i^j}(e_i)}{\sum_{j=1}^L \prod_{i=1}^n \mu_{T_i^j}(e_i)}, \quad (5)$$

ННР, выходной сигнал которого имеет вид (4), может быть представлен в виде нейронной сети (рис.1) [2], в которой в первом слое имеется два нейрона для подачи входных переменных ошибки e и ее производной $\dot{e}$, выходные сигналы нейронов второго слоя представляют собой значения функций принадлежности при конкретных значениях входных сигналов, нейроны третьего слоя выполняют нечеткий логический вывод, в четвертом слое имеется только один нейрон, который выполняет операцию дефазификации.

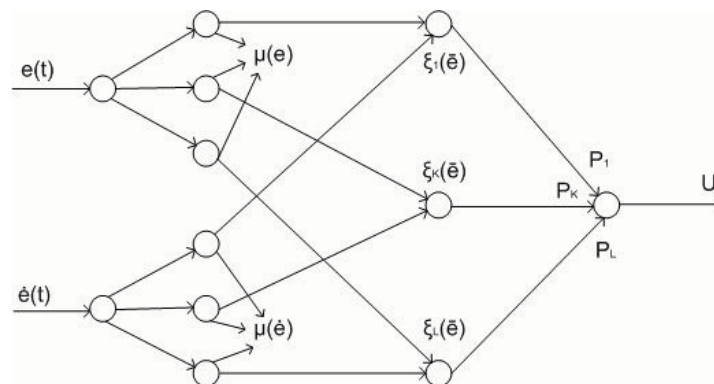


Рисунок 1 - Структура нечеткой нейронной сети

Целью синтеза является определение параметров нечеткого регулятора $m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j$ и p_k , которые обеспечивают выполнение условия: $\lim_{t \rightarrow \infty} |y_3(t) - y| = \lim_{t \rightarrow \infty} |e| = 0$, где $y_3(t)$ – задающее входное

воздействие.

Синтез ННР АСАУ на основе ИИС

Исходными данными для решения задачи являются математическое описание объекта управления с той точностью, которая возможна, а так же определенные возможности измерения переменных состояния и возмущающих сигналов.

Основные идеи предлагаемого метода рассмотрены на примере задачи синтеза ННР для нелинейного динамического объекта (1). Синтез можно представить в виде следующих этапов:

- построение математической модели ННР;
- синтез закона управления, обеспечивающего оптимизацию выбранного функционала качества управления заданным объектом;
- адаптация параметров ННР на основе ИИС.

Математической моделью ННР является модель Такаги-Сугено нулевого порядка (2), а закон управления, обеспечивающий оптимизацию выбранного функционала качества управления заданным объектом, описывается выражением [6]:

$$u^{\circ} = -\frac{1}{g(x)} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_n} \right)^{-1} \left[\sum_{i=1}^n \frac{\partial \psi}{\partial x_i} f_i(\bar{x}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \psi}{\partial \delta_i} + \psi \right], \quad (6)$$

где ψ является произвольной однозначной дифференцируемой или кусочно-непрерывной функцией переменных состояния управляемого объекта и $\psi(0) = 0$. Для обеспечения условия асимптотической устойчивости замкнутой системы необходимо выбрать функцию ψ так, чтобы решение было устойчивым. Этому условию удовлетворяет

функция вида $\dot{\psi}_j = e_j + a_j e_j$ [3]. Следует отметить, что качество системы управления тоже определяется этим многообразием.

В результате компьютерного моделирования замкнутой системы управления объектом (1) с оптимальным управляющим сигналом (6) при случайных возмущениях и изменениях параметров объекта может быть получена выборка относительно входных $\bar{e}$ и выходной u переменных. Полученная выборка используется для обучения ННР. Результаты обучения позволяют определить набор правил управления и параметры ННР m_i , m_j , σ_i , σ_j и p_k . Обучение реализуется на основе минимизации ошибки между реальным (7.9) и желаемым (6) управляющими сигналами при одинаковых входных сигналах.

Для решения задачи обучения и адаптации параметров ННР с использованием ИИС применяется иммунный алгоритм параметрической адаптации [7], формально представленный в виде:

$$\text{ImmAlg} = (P^L, L, Ab, N, Ag, M, Op, n_c, N_c, S, Alph, A, Aff, gen, t), \quad (7)$$

где P^L – пространство поиска; L – размерность пространства поиска; Ab – популяция антител; N – размер популяции антител; Ag – популяция антигенов; M – размер популяции антигенов; Op – множество используемых иммунных операторов вида $Op = \{Clone, Mutate, Edit\}$; n_c – количество антител для клонирования; N_c – количество клонов одного антитела; S – количество антител с худшей аффинностью, подлежащие замене при редактировании популяции антител; $Alph$ – алфавит, с использованием которого кодируются антитела; A – мощность алфавита $Alph$; gen – поколение работы иммунного алгоритма; t – критерий окончания работы алгоритма; Aff – функция аффинности вида $Aff = \frac{1}{1+D}$, в которой D является евклидовой нормой.

Основные этапы иммунного алгоритма следующие:

1. Генерация начальной популяции антител Ab .
2. Вычисление аффинности каждого из антител Ab_i , $i = \overline{1, N}$ популяции Ab ко всем антигенам популяции антигенов Ag путем подстановки параметров, закодированных в антителе Ab_i в базу правил управления ННР.
3. Выбор n_c антител с лучшей аффинностью.
4. Клонирование n_c выбранных в п.3 антител N_c раз, в результате которого формируется популяция клонов Ab_C .
5. Формирование популяции Ab_{CM} путем мутации клонов в популяции Ab_C .
6. Вычисление аффинности каждого из антител Ab_{CMj} , $j = \overline{1, \sum_{l=1}^{n_c} n_{cl} N_{cl}}$ популяции Ab_{CM} ко всем антигенам популяции антигенов Ag путем подстановки параметров, закодированных в антителе Ab_{CMj} в базу правил управления нечеткого регулятора.

7. Редактирование популяции антител Ab , в результате которого выполняется замена антитела Ab_i , $i = \overline{1, N}$ в популяции антител Ab на соответствующее антитело из популяции Ab_{CM} , если его аффинность улучшилась в результате мутации, и замена d худших антител в популяции антител Ab новыми случайно сгенерированными антителами.

8. Проверка критерия останова. Если не достигнут – переход к шагу 2, в противном случае – завершение алгоритма.

Предлагаются следующие подходы к адаптации ННР с использованием ИИС:

1. *Адаптация параметров функций принадлежности $\xi_j(x)$ в режиме off-line.*

В данном режиме для имеющейся базы правил управления ННР выполняется настройка параметров m_i , σ_i , m_j , σ_j . Для этого формируется популяция антител, в которой каждое антитело представляется в виде вектора фиксированной длины, в котором кодируются настраиваемые параметры m_i , σ_i , m_j , σ_j ННР.

2. *Адаптация параметров p_k в режиме on-line.*

После выполнения адаптации параметров ФП выполняется настройка параметров p_k ННР с использованием ИИС. Для этого в каждом антителе популяции антител кодируется вектор настраиваемых параметров p_k .

3. *Адаптация всех настраиваемых параметров нечеткого регулятора в режиме on-line.*

Возможна одновременная настройка всех настраиваемых параметров ННР m_i , σ_i , m_j , σ_j , p_k . Для этого все множество настраиваемых параметров кодируется в каждом антителе популяции антител. Используется вещественное кодирование антител. В качестве антигена используется обучающая выборка.

В качестве критерия останова принимается заданная точность работы алгоритма либо, если она не достигнута – заданное количество поколений работы алгоритма.

Результатом работы алгоритма является антитело с лучшей по популяции функцией аффинности, содержащее настроенные параметры нечеткого регулятора.

Моделирование адаптивной системы управления

При моделировании адаптивной системы управления рассматривался нелинейный динамический объект, описываемый системой уравнений с известными коэффициентами в виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{3}x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{2}{5}x_1x_2 + u, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (8)$$

Для этого объекта на основании разработанного метода решалась задача синтеза адаптивного ННР с управляющим воздействием на выходе вида (4). Для конкретных численных значений параметров объекта путем имитационного моделирования были получены параметры ННР $m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j, p_k$ и переходные характеристики (рис. 2) при скачкообразном изменении входного воздействия, показатели качества которых (перерегулирование и время регулирования) зависят от адаптируемых параметров нечеткого регулятора $m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j, p_k$. Анализ представленных кривых переходного процесса показывает, что синтезируемая АСАУ с иммунной настройкой устойчива и обеспечивает требуемое качество управления.



Рисунок 2 - График переходного процесса АСАУ

Кроме того, были получены графики ошибки регулирования при использовании классической АСАУ и АСАУ на базе ННР (рис. 3), анализ которой показывает, что АСАУ на базе ННР имеет более высокие показатели по скорости и точности регулирования.

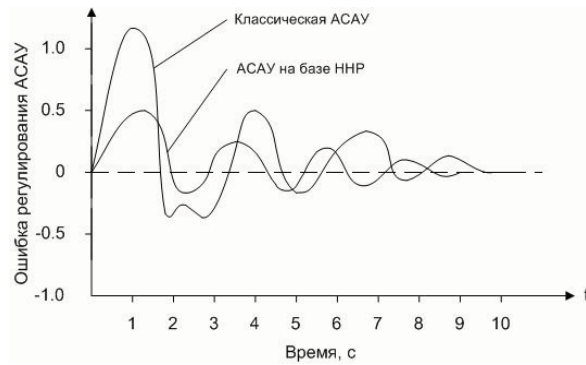


Рисунок 3 - График изменения ошибки регулирования

Выводы

В работе предложен синтез АСАУ нелинейным динамическим объектом на основе ННР, адаптация параметров которого осуществляется с помощью ИИС. Предложенный метод синтеза АСАУ предусматривает выбор модели ННР, синтез оптимального закона управления и адаптацию параметров на основе ИИС в различных режимах. Проведенное моделирование АСАУ на тестовом примере показало эффективность предложенного метода синтеза АСАУ нелинейным динамическим объектом на базе ННР с иммунной настройкой параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
2. Коломойцева М.Б., Хо Д.Л. Адаптивные системы управления динамическими объектами на базе нечетких регуляторов. – М.: Спутник, 2002. – 217 с.
3. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов Ф.С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
4. Искусственные иммунные системы и их применение / Под ред. Д. Дасгупты. Пер. с англ. под ред. А.А. Романюхи. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 344 с.
5. Timmis J.I., Knight T., De Castro L.N., Hart E. An Overview of Artificial Immune Systems // Computation in Cells and Tissues: Perspectives and Tools for Thought, Natural Computation Series, Springer, 2004 – p. 51-86.
6. Кораблев Н.М., Макогон А.Э. Синтез адаптивной системы управления нелинейным динамическим объектом на базе нечеткого регулятора с иммунной настройкой // Вестник ХНТУ. – 2009. – № 1 (34). – С. 337-341.
7. Кораблев М.М., Овчаренко І.В. Адаптація моделей нечіткого виводу з використанням штучних імунних систем // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2007. – №603. – С. 73 –76.