Г.А. Саитова, И.И. Сабитов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТКЛИКОВ ИСКУСТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

Для настройки параметров регулятора применяются как общие методы теории автоматического управления, такие как метод размещения полюсов, так и алгебраические методы. Все алгебраические методы настройки регуляторов основаны на аппроксимации динамики объекта моделью первого или второго порядка. Причиной применения данных методов является невозможность аналитического решения систем уравнений, которое необходимо при использовании моделей высокого порядка. Применение линейных регрессионных моделей не всегда дает адекватные и точные результаты. Для получения более точных результатов используются нелинейные регрессионные модели. Основная проблема нелинейного моделирования – выбор функций для описания модели, т.е. выбор совокупности простейших нелинейных функций, определяющих нелинейную регрессионную модель [1, 2]. В статье предлагается методика использования отклика искусственной нейронной сети (ИНС) для определения совокупности простейших нелинейных функций, описывающих нелинейную регрессионную модель для определения оптимальных коэффициентов пропорционально – интегрального (ПИ) регулятора для систем второго порядка.

Структура исследуемой системы

Рассмотрим систему автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис. 1.

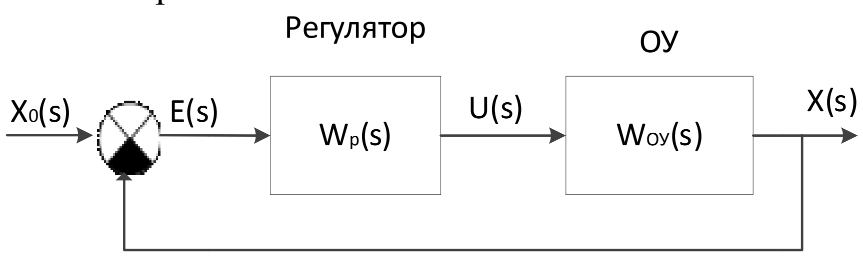

Рис. 1 – Структурная схема односвязной САУ

Данная система описывается уравнениями:

$$X(s) = U(s)W_{\text{ОУ}}(s); U(s) = W_{\text{Р}}(s)E(s); E(s) = X_0(s) - X(s),$$

где U(s), X0(s),X(s) – соответственно управляющие, задающие и управляемые координаты, Wp(s) – передаточная функция ПИ-регулятор, описываемая уравнением: $W_{\text{Р}}(s) = \frac{K_{\text{И}}}{\text{s}} + K_{\text{П}}.$ WOY(s) – передаточная функция объекта управления, описываемая уравнением: $W_{\text{ОУ}} = \frac{K}{(\tau_0 s^2 + \tau_1 s + 1)}.$

Требуется разработать нелинейную регрессионную модель настройки коэффициентов ПИ регулятора с помощью откликов нейронной сети.

Построение регрессионной модели на основе анализа откликов искусственной нейронной сети

Данный алгоритм расчета коэффициентов основан на построении регрессионной модели на основе откликов обученной искусственной нейронной сети.

Передаточная функция замкнутой системы:

$$\varPhi_{сист}(s)=\frac{KK_и\left(\frac{K_П}{K_и}s+1\right)}{\tau_0 s^3+\tau_1 s^2+(1+KK_П)s+KK_и}$$

Перейдем в частотную область путем замены s=jω. Мнимая и вещественная части частотной передаточной функции замкнутой системы $\varPhi_{сист}(j\omega)$:

$$imag(\varPhi_{сист}(j\omega))=\frac{-KK_и\omega+(\tau_0 KK_И-\tau_1 KK_П)\omega^3}{(KK_и-\tau_1\omega^2)^2+((1+KK_П)\omega-\tau_0\omega^3)^2}; \quad (1)$$

$$real(\varPhi_{сист}(j\omega))=\frac{K^2{K_и}^2+(K^2{K_П}^2+KK_П-\tau_1 KK_и)\omega^2+\tau_0 KK}{(KK_и-\tau_1\omega^2)^2+((1+KK_П)\omega-\tau_0\omega^3)^2} \quad (2)$$

Функции (1) и (2) описывают годограф системы. Введем ограничение на не положительность (1): $imag(\varPhi_{сист}(j\omega))\le 0$. Так как знаменатель (1) всегда является положительным, то необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие:

$$-KK_и\omega+(\tau_0 KK_И-\tau_1 KK_П)\omega^3\le 0 \quad (3)$$

Введем соотношение между КП и КИ:

$$\tau_0 KK_И-\tau_1 KK_П=0\rightarrow K_П=\frac{\tau_0}{\tau_1}K_И \quad (4)$$

Тогда уравнение (1) преобразуется:

$$imag(\varPhi_{сист}(j\omega))=\frac{-KK_и\omega}{(KK_и-\tau_1\omega^2)^2+((1+\frac{\tau_0}{\tau_1}KK_И)\omega-\tau} \quad (5)$$

Аналитическое решение (5) относительно КИ достаточно сложно. Для упрощения анализа представим K=1. Для определения зависимости КИ =f (τ0, τ1) синтезируем искусственную нейронную сеть (ИНС).

Синтез искусственной нейронной сети

Искусственная нейронная сеть строиться на основе многослойного персептрона. Входной слой ИНС состоит из 2 нейронов. Скрытый слой состоит из 9 нейронов. Выходной слой состоит из 1 нейрона. Архитектура ИНС представлена на рис. 2.

Для построения обучающей выборки моделировалась система с различными значениями параметров T_0 и T_1, которые изменялись в диапазоне [1,10]. Входными сигналами в обучающей выборке являются значения T_0 и T_1. Выходным сигналом является коэффициент $K_И$ ПИ-регулятора, обеспечивающий наименьшее время регулирования, не превышая заданное перерегулирование в 5%.

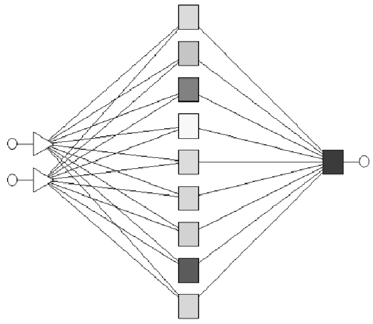

Рис. 2 – Архитектура искусственной нейронной сети

Для обучения нейронной сети используются методы детерминированного обучения с учителем: метод обратного распространения для первоначального схождения к вероятному минимуму ошибки и метод спуска по сопряженному градиенту для дальнейшего обучения НС. Так как, в общем случае, решается регрессионная задача, то данные методы позволяют быстро и эффективно обучить НС выдавать правильное отображение входного сигнала в выходной сигнал.

Анализ обученной нейронной сети

Так как НС является универсальным аппроксиматором, то на диапазоне обучающей выборки НС с заданной точностью аппроксимирует нелинейную зависимость выходного сигнала – коэффициента ПИ-регулятора, от входных сигналов – параметров T_0 и T_1. Вид данных нелинейных зависимостей можно определить на основе откликов НС – графиков, представляющих собой изменение выходной переменной от выбранной входной переменной при неизменных остальных входных переменных. Данные отклики представляют собой простейшие нелинейные функции одной переменной вида $y = f(x)$, где $f(x)$ является некой простейшей нелинейной функцией.

График отклика $y = f_1(\tau_0)$ представлен на рис. 3.1. Аналитическое уравнение кривой: $f_1 = A_1\sqrt{\tau_0}$, где A_1 – некоторый коэффициент. График отклика $y = f_2(\tau_1)$ представлен на рис. 3.2. Аналитическое уравнение кривой: $f_2 = \frac{A_2}{\tau_1}$, где A_2 – некоторый коэффициент.

Так как нейрон, находящийся в выходном слое, описывается линейной активационной функцией, то регрессионная модель имеет следующий вид:

$$f = f_1 + f_2 = A_1\sqrt{\tau_0} + \frac{A_2}{\tau_1} + C \qquad (6)$$

где C – некоторые коэффициенты регрессионной модели.

Для определения данных коэффициентов применяется метод Левенберга-Маркара. Таким образом, нелинейная регрессионная модель, описывающая зависимость $K_и = f(\tau_0, \tau_1)$, имеет вид:

$$f = f_1 + f_2 = 0{,}0194\sqrt{\tau_0} + \frac{0{,}8}{\tau_1} - 0{,}073 \qquad (7)$$

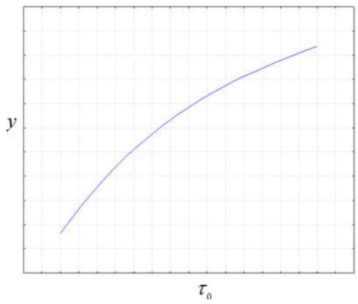

Рис. 3.1 – График отклика $y = f_1(\tau_0)$

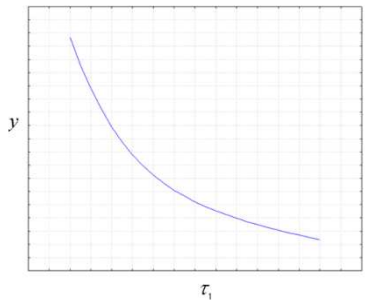

Рис. 3.2 – График отклика $y = f_2(\tau_1)$

Важными параметрами качества регрессионных моделей является стандартная ошибка оценки и значение R-квадрата. Стандартная ошибка оценки измеряет рассеяние наблюдаемых значений относительно линии регрессии. Стандартная ошибка оценки нелинейной регрессионной модели (7) – 0.007459576. Значение R-квадрат является индикатором степени подгонки модели к данным (значение R-квадрат близкое к 1 показывает, что модель объясняет почти всю изменчивость соответствующих переменных). Значение R-квадрат – 0.99077761. Стандартная ошибка достаточно мала, а значение R-квадрат близкое к 1 и регрессионная модель является адекватной.

Таким образом, для определения коэффициентов ПИ-регулятора применяется система уравнений (4) и (7):

$$K_И = 0{,}0194\sqrt{\tau_0} + \frac{0{,}8}{\tau_1} - 0{,}073 \qquad (8)$$

$$K_П = \frac{\tau_0}{\tau_1} K_И$$

Так как, в общем случае, K не всегда равно 1, то (9) преобразуется:

$$K_И = \frac{0{,}0194\sqrt{\tau_0} + \frac{0{,}8}{\tau_1} - 0{,}073}{K} \qquad (9)$$

$$K_П = \frac{\tau_0}{\tau_1} K K_И$$

Предложенная методика использования отклика НС для определения совокупности простейших нелинейных функций позволяет синтезировать нелинейную регрессионную модель для определения оптимальных коэффициентов ПИ-регулятора для систем второго порядка.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 15-08-01146-а)

Литература

1. Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 3-х т. Т.2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – 736 с.; ил.

2. Интеллектуальные системы управления и контроля газотурбинных двигателей / под ред. академика С.Н. Васильева. – М.: Машиностроение, 2008г. – 550 с.