

УДК 004.942

А.А. Голубева

## Алгоритм параметрической идентификации на основе модифицированного метода наименьших квадратов для нечетких систем типа Такаги-Сугено

Рассмотрен разработанный автором модифицированный алгоритм параметрической идентификации на основе метода наименьших квадратов для настройки консеквентов правил нечеткой системы типа Такаги-Сугено. Произведена оценка эффективности реализованного алгоритма при решении задачи определения приоритетности вывода в капитальный ремонт участков тепловой сети.

**Ключевые слова:** алгоритм, параметрическая идентификация, метод наименьших квадратов, консеквенты, нечеткая система, Такаги-Сугено.

При определении приоритетности проведения капитальных ремонтов участков трубопроводов тепловых сетей возникает ряд проблем. Одной из таких проблем является оперирование лишь приближенными значениями параметров, которые определяют состояние трубы.

Для уточнения состояния участков теплотрасс в однотипных показателях и определения приоритетности их ремонта разрабатывается матрица «Критериев оценки отрицательных факторов на состояние тепловых сетей». Исходя из многолетнего опыта эксплуатации тепловых сетей, специалистами формируется перечень из ряда факторов, которые влияют на надежность и продолжительность безотказной работы тепловых сетей, а также определяют степень риска при возможных повреждениях трубопроводов. Каждый фактор по степени воздействия на металл трубопровода, а также по степени возможного ущерба субъективно оценивается, опираясь на опыт и квалификацию специалиста.

Для определения приоритетности вывода в капитальный ремонт участков, предложенных тепловыми районами, производится подсчет суммы баллов, позволяющий определить участок с наибольшим влиянием отрицательных факторов и определить приоритетность среди всех групп ненадежных участков.

В связи с оперированием приближенными значениями факторов поставленную задачу логично решать с использованием аппарата теории нечеткой логики и эвристических методов.

**Постановка задачи.** Представим нечеткую систему в виде функции [1]

$$y = f(x, \theta, h),$$

$x$  – множество входных параметров системы  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ;  $\theta = \|\theta_1, \dots, \theta_q\|$  – вектор параметров антецедентов правил;  $h = \|h_1, \dots, h_r\|$  – вектор параметров консеквентов правил;  $y$  – выход системы, выходной параметр системы нечеткого вывода.

Среднеквадратические функции ошибки, являющиеся численным критерием адекватности модели, вычисляются по формуле [1]

$$СКО = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (y_k - f(x_k, \theta, h))^2}{m}}.$$

**Нечеткая система.** Весь процесс построения нечеткой системы основан на идентификации параметров и идентификации структуры нечеткой системы. Под идентификацией структуры понимается определение входных и выходных параметров, задание количества термов, определение функций принадлежности входных и выходных параметров, определение количества правил, определение системы нечеткого вывода, так называемого алгоритма вывода [2, 3].

Под идентификацией параметров нечеткой системы подразумевается подбор оптимальных параметров функций принадлежности лингвистических переменных и параметров консеквента в правиле. Другими словами, параметрическая идентификация нечеткой системы заключается в том, что необходимо оптимально подобрать параметры функций принадлежности лингвистических пере-

менных и параметры консеквента в правиле таким образом, чтобы минимизировать ошибку системы на обучающих данных [2, 3].

Для настройки консеквентов правил нечеткой системы типа Такаги–Сугено используется разработанный и реализованный модифицированный алгоритм метода наименьших квадратов.

*Алгоритм параметрической идентификации* на основе модифицированного метода наименьших квадратов для нечетких систем типа Такаги–Сугено:

$K$  – номер строки матриц,  $k = 1, m$ .

$J$  – номер столбца матриц,  $j = 1, n$ .

$M$  – количество строк в таблице наблюдений (количество наблюдений).

$N$  – количество входных параметров в таблице наблюдений (количество признаков).

*Вход:* таблица наблюдений, база правил.

*Выход:* консеквенты правил.

Шаг 1. Выбираем  $i$ -е правило и рассчитать значения элементов матрицы  $W_i$ .

Шаг 2. Рассчитываем матрицу  $[X^T W_i X]$ .

Шаг 3. Если  $\det(X^T W_i X) \neq 0$ , то находим обратную матрицу  $[X^T W_i X]^{-1}$  и переходим на Шаг 21, иначе Шаг 4.

Шаг 4. Выбираем  $k$ -ю строку из матрицы  $[X^T W_i X]$ .

Шаг 5. Если все элементы  $k$ -й строки равны 0 матрицы.

Шаг 6. Удаляем  $k$ -ю строку и  $k$ -й столбец матрицы  $[X^T W_i X]$  и матрицы  $X$ , иначе  $k = k+1$ , и переходим на Шаг 4.

Шаг 7. Если  $k \neq s$ ,  $k = k+1$ , и переходим на Шаг 4.

Шаг 8. Выбираем  $k$ -ю строку из матрицы  $[X^T W_i X]$ .

Шаг 9.  $g = k+1$ .

Шаг 10. Выбираем  $g$ -строку матрицы.

Шаг 11. Если строки  $k$  и  $g$  линейно зависимы, то удаляем  $g$ -строку матрицы  $[X^T W_i X]$  и  $X$ , иначе  $g = g+1$ , и переходим на Шаг 10.

Шаг 12. Если  $g \neq m$ ,  $g = g+1$ , и переходим на Шаг 10.

Шаг 13. Если  $k \neq m$ ,  $k = k+1$ , и переходим на Шаг 8.

Шаг 14. Выбираем  $j$ -й столбец матрицы  $[X^T W_i X]$ .

Шаг 15.  $g = j+1$ .

Шаг 16. Выбираем  $g$ -столбец матрицы.

Шаг 17. Если столбцы  $j$  и  $g$  линейно зависимы, то удаляем  $g$ -столбец матрицы  $[X^T W_i X]$  и  $X$ , иначе  $g = g+1$ , и переходим на Шаг 16.

Шаг 18. Если  $g \neq n$ ,  $g = g+1$ , и переходим на Шаг 16.

Шаг 19. Если  $j \neq n$ ,  $j = j+1$ , и переходим на Шаг 14.

Шаг 20. Переходим на Шаг 3.

Шаг 21. Находим значения элементов вектора  $\theta_i = [X^T W_i X]^{-1} X^T W_i Y$ . Принимаем в качестве параметров консеквентов правил элементы матрицы  $\theta_i$ .

Шаг 22. Если  $i \neq r$ ,  $i = i + 1$ , и переходим на Шаг 1.

Шаг 23. Выход.

**Эксперимент.** Исследования тестовой выборки проводились на основании статистических данных тепловых сетей Томского филиала ОАО «ТГК-11». Решалась задача определения приоритетности проведения капитальных ремонтов участков магистральных трубопроводов тепловых сетей.

В эксперименте участвовало 6 входных параметров и 91 наблюдение. За входы системы принимался ряд факторов, которые влияют на надежность и продолжительность безотказной работы тепловых сетей. К таким факторам относятся длина трубопровода, диаметр, срок эксплуатации участка, год последней замены, внешняя и внутренняя коррозия. Количество нечетких правил 54, ошибка до обучения нечеткой системы 0,4380, ошибка после обучения нечеткой системы 0,03428.

**Заключение.** Разработанный алгоритм на основе модифицированного метода наименьших квадратов для решения задачи настройки консеквентов нечеткой системы типа Такаги–Сугено, учитывающий значения таблицы наблюдений, параметры функций принадлежности и нечеткие правила, позволяет использовать метод без ограничений оригинального метода наименьших квадратов.

Исследование алгоритма идентификации нечеткой системы проводилось при решении задачи аппроксимации, суть исследования заключалась в оценке эффективности методов инициализации и обучения. Результаты исследований показали, что модифицированный метод наименьших квадратов позволяет снизить ошибку системы на порядок по сравнению с начальной.

#### *Литература*

1. Ходашинский И.А. Алгоритмы генерации структур двухкритериальных Парето-оптимальных нечетких аппроксиматоров / И.А. Ходашинский, Д.С. Синьков, И.В. Горбунов // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 1 (27). – С. 135–142.
2. Интеллектуальный анализ пространственно-временных данных объектов инженерной инфраструктуры / Л.В. Галицкая, А.А. Голубева, Ю.Б. Гриценко и др. // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2 (26), ч. 2. – С. 216–219.
3. Голубева А.А. Идентификация параметров объектов электронного генерального плана металлургического предприятия // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 1 (27). – С. 60–63.

---

#### **Голубева Александра Александровна**

Аспирант каф. автоматизации обработки информации ТУСУРа

Тел.: 8 913-825-84-26

Эл. почта: Sasha\_karateka@mail.ru

Golubeva A.A.

#### **Parameter identification algorithm based on a modified least square method for Takagi - Sugeno fuzzy systems**

In the article the author developed a modified parameter identification algorithm based on the least square method for adjustment of consequent fuzzy rules of a Takagi–Sugeno type. We estimated the efficiency of the implemented algorithm for solving the problem of determining the priority of output overhaul sections of the heat network.

**Keywords:** algorithm, parameter identification, least square method, consequent, fuzzy system, Takagi–Sugeno.