ИНФОРМАТИКА

УДК 517.551; 519.642.7

ПРИМЕНЕНИЕ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ СГЛАЖИВАЮЩЕЙ АППРОКСИМАЦИИ СЛОЖНЫХ СИНГУЛЯРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ, Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ,
Т.М. ГЛУХОВА, Г.А. САМОЩЕНКОВ
(Полоцкий государственный университет)

Обобщается многолетний опыт разработки лингвистических аппроксиматоров на нечеткой логике с точки зрения их применимости для аппроксимации сложных сингулярных зависимостей. Под сложностью в первую очередь понимаем многомерность зависимости и, во-вторых, наличие сингулярных особенностей, таких как скачкообразное изменение выходного параметра при незначительном изменении входных переменных. Нами разработан и исследуется оригинальный вариант нечеткой логики на унимодальных степенных функциях принадлежности, дающий лучшие результаты.

Активные исследования в области нечетких логических аппроксиматоров не прекращаются последних два десятилетия. Сталкиваясь с различными прикладными задачами, мы все чаще обнаруживаем, что применение универсальных обучающихся аппроксиматоров оказывается единственной альтернативой. Аппроксиматоры на нечеткой логике в силу своей простой реализации и заимствования механизма вывода у человека все чаще оказываются наиболее подходящим решением.

Нечеткая логика является формальной системой, претендующей на роль системы, объясняющей когнитивные способности живых существ, включая человека. Качественное подобие нечеткой логической системы когнитивной системе человека вытекает из ее привязки к лингвистическим конструкциям языка. Именно устанавливаемое точное соответствие нечетких множеств вербальным категориям в рамках выбранного измерения (шкалы) и обеспечивает данное концептуальное свойство нечеткой логической системы.

Говоря о нечеткой логической системе как об универсальном аппроксиматоре, мы имеем в виду ее способность повторять на качественном уровне сложные многомерные зависимости по аналогии с тем, как их в виде лингвистических описаний (правил) запоминает и воспроизводит человек в рамках когнитивного процесса. Языковое представление сложных многомерных зависимостей обладает свойством минимальности. Человек интуитивно стремится к минимальности количества как необходимых лингвистических термов, так и правил, описывающих зависимости.

Последнее обстоятельство входит в противоречие с желанием повысить точность аппроксимации. Точнее, задача построения лингвистического аппроксиматора может быть сформулирована как формирование такой минимальной по набору лингвистических термов и правил логической системы, которая обеспечивает необходимую точность.

В 1993 году Коско (Kosko) доказал теорему о нечеткой аппроксимации (FAT Fuzzy Approximation Theorem) [5], согласно которой любая математическая система может быть аппроксимирована системой на нечеткой логике. Следовательно, с помощью естественно-языковых высказываний «Если то», с последующей их формализацией средствами теории нечетких множеств можно сколь угодно точно отразить произвольную взаимосвязь «входы – выход» без использования сложного аппарата дифференциального и интегрального исчисления, традиционно применяемого в управлении и идентификации.

Однако требование минимальности системы правил не позволяет говорить о нечеткой аппроксимации как об инструменте, сколь угодно детально описывающем реальные процессы. В самом простом варианте нечеткая продукционная система обеспечивает кусочно-линейную аппроксимацию зависимостей, которая при возрастании количества узлов аппроксимации монотонно приближается к аппроксимируемой нелинейной зависимости. Но мы, вводя ограничение на количество точек аппроксимации (количество лингвистических термов), лишаем формальную систему такой возможности.

Фактически задачу построения нечеткого аппроксиматора при ограничении на количество узлов аппроксимации можно сформулировать как задачу оптимизации параметров аппроксимации (выбор положения узлов аппроксимации, выбор форм функций принадлежности параметра нечетким лингвистическим термам, выбор конкретной реализации нечеткой логики) с точки зрения минимизации ошибки аппроксимации для заданной предметной области. Причем интегральным критерием качества построенного аппроксиматора может выступать и классический критерий наименьших квадратов отклонений в узлах обучающей выборки.

Решение такой оптимизационной задачи ищется в многомерном пространстве значений параметров аппроксимации. Проведенные нами исследования показывают высокую эффективность генетических алгоритмов в решении задач оптимизации нечеткой логической системы [1 – 4].

С целью построения универсального аппроксиматора нами была предложена следующая формальная система, удовлетворяющая большинству задач, решением которых мы занимались на протяжении последних 15 лет:

$$НЭС = \langle \Psi, S, P, Y \rangle,$$

где $\Psi = \; \psi_1,...,\psi_k,...,\psi_n$ – множество свойств объектов предметной области; $\psi_i = \; \varphi_1^i,...,\varphi_{m_i}^i$ – множество оттенков i-го свойства;

$S = \; s_1,...,s_l,...,s_e$ – множество связей для выбора по текущей стратегии обследования. Здесь $s_l = \; {\varphi^l}_1,...,{\varphi^l}_n$ – условная связь (точка предпочтения);

$P = \; p_1,..., p_t,..., p_z$ – множество правил вывода (База знаний). Здесь $p_t = \; {\varphi^t}_1,...,{\varphi^t}_n \; \rightarrow \; {\varphi^t}_{k+1},...,{\varphi^t}_n$ – правило вывода фактов вторичных свойств. Один из вариантов этой записи – вывод одного вторичного свойства по сопоставлению базы фактов с указанными значениями (оттенками) свойств. Релевантность правил определяется по превышению уровня чувствительности достоверности вывода по правилу, определяемому сопоставлением с базой фактов, а также тем, определены ли свойства, участвующие в сопоставлении;

$Y = \; y_1,...,y_k,...,y_r,...,y_n$ – база фактов. Здесь $y_r \; y_1,...,y_k \; = \dfrac{\sum_t \sqrt[k]{\prod_j^k \varphi_j^t \; y_j} \cdot \varphi_r^t}{\sum_t \sqrt[k]{\prod_j^k \varphi_j^t \; y_j}}, \varphi^t \in p_t, y_r \in Y$ – вывод факта по вторичному свойству;

$\varphi_j^t \; y_j \; = 1 - \left(\dfrac{\left| y_j - y_j^t \right|}{h_j} \right)^p$ – вид функции принадлежности для оттенка j-го свойства в t-м правиле;

h – ширина экспертной области, p – характер;

$\neg x = 1 - x$ – отрицание;

$x_1 \wedge x_2 = \sqrt{x_1 \cdot x_2}$ – t – норма, конъюнкция;

$x_1 \vee x_2 = 1 - \sqrt{\; 1 - x_1 \; \cdot \; 1 - x_2 \;}$ – s – норма, дизъюнкция. В случае использования в базе знаний дизъюнктивных правил такие правила можно разбить на два или более, в зависимости от числа операций дизъюнкции, конъюнктивных правила. При этом возрастает влияние таких правил на вывод, но корректность вывода сохраняется;

$x_1 \vee x_2 = x_1 + x_2$.

Иными словами, мы получаем несколько правил, говорящих, что реализован такой-то оттенок такого-то вторичного свойства, представляя дизъюнкцию в виде суммы результатов сопоставления значений в базе фактов оттенкам свойств в правилах. Такое представление дизъюнкции не нормализовано, но при выбранном механизме вывода методом весов оно корректно порождает нормализованное значение вторичного свойства.

Достоверность логического вывода факта по вторичному свойству

$$Validity_r(y_1,..., y_k) = 1 - \sqrt[z]{\prod_i^z \left(1 - \sqrt[2k]{\prod_j^k Validity_j \varphi_j^i(y_j)} \right)}, \quad \forall p \in \varphi_r.$$

При статистическом характере нечеткости формирование базы фактов реализуется в следующем виде:

$St = st_1, ..., st_n$ – статистика исследования;

$st_i = \left\langle \varphi_1^i, add_1^i, all_1^i \right\rangle, ..., \left\langle \varphi_{m_i}^i, add_{m_i}^i, all_{m_i}^i \right\rangle$ – статистика по конкретному свойству;

$$y_r = \frac{\sum^{m_r} \varphi_i^r \cdot \frac{add_i^r}{all_i^r}}{\sum^{m_r} \frac{add_i^r}{all_i^r}}$$ – вывод факта по первичному свойству;

$$Validity_r = \frac{\sum_i^{m_r} \varphi_i^r \cdot \frac{add_i^r}{all_i^r}}{\sum_i^{m_r} \varphi_i^r}$$ – достоверность вывода факта по первичному свойству (в дальнейшем используется для корректирования достоверности вывода вторичных свойств).

Разработанное нами универсальное ядро нечеткого аппроксиматора включает в себя и функцию оптимизации набора правил с применением генетического алгоритма.

В рамках данной системы нами проведено исследование свойств универсального аппроксиматора при моделировании сингулярных зависимостей, выражающихся в скачкообразном изменении выходного параметра при незначительном изменении входных параметров. Такой сингулярностью обладает целый ряд реальных физических процессов, аппроксимацию данных которых нам приходилось осуществлять, в частности процесс скачкообразного изменения изгибной жесткости железобетонного элемента при трещинообразовании [2; 4].

Нами исследован характер поверхности логического вывода о неизвестном параметре при различных реализациях нечеткой логической системы (рис. 1).

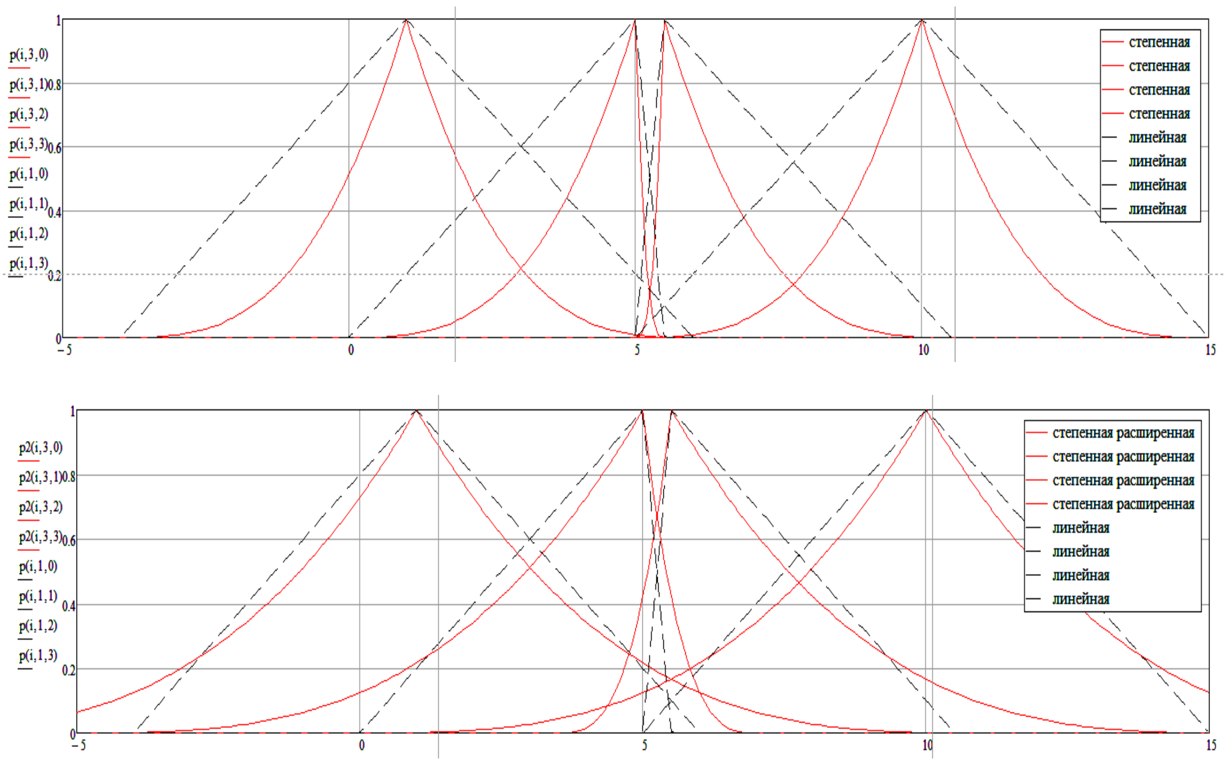

Рис. 1. Рассмотренные варианты функций принадлежности

Заключение

В результате проведенного анализа сделан вывод о противоречивости требований, предъявляемых к универсальному аппроксиматору при аппроксимации сингулярного участка и гладкой нелинейной зависимости (рис. 2).

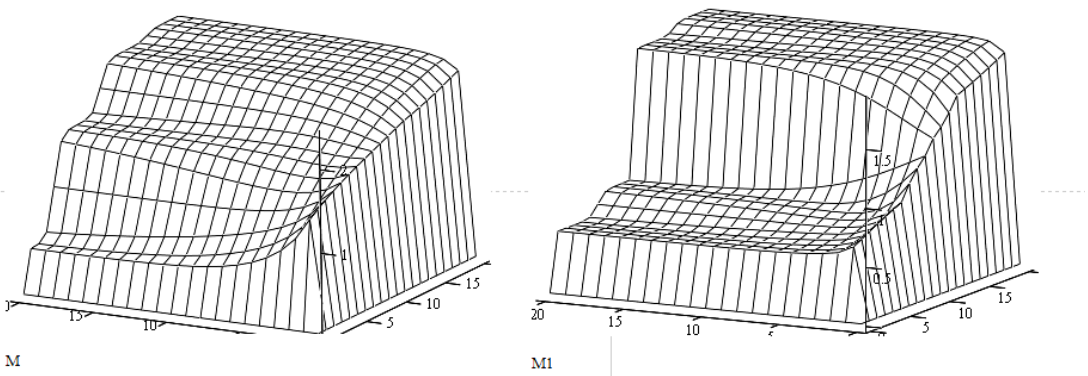

Рис. 2. Аппроксимация участка с сингулярностью и гладкой нелинейной зависимостью

При поиске компромисса удается в ряде случаев обеспечить качественную аппроксимацию (в пределах заданной ошибки) как для первого, так и для второго случая. Однако подбор параметров оптимизации логической системы в этом случае должен формулироваться как отдельная оптимизационная задача и решаться в рамках общей оптимизации нечеткой логической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов, Д.О. Метод устранения прерывности и локального минимума поверхности решения расчетной системы уравнений деформационной модели / Д.О. Глухов, А.В. Пранович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб. тр. VII междунар. науч.-метод. семинара; под ред. Н.П. Блещика, А.А. Борисевича, Т.М. Пецольда. – Брест: БГТУ, 2001. – С. 112.
2. Глухов, Д.О. Построение аппроксимации поверхности решения системы уравнений напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента в нормальном сечении / Д.О. Глухов // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. науч. тр.; под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – С. 63 – 69.
3. Глухов, Д.О. Применение унимодальных функций принадлежности в нечетких продукционных системах для решения задач интеллектуального управления динамическими процессами / Д.О. Глухов, А.П. Кастрюк, Т.М. Глухова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2009. – № 3. – С. 115 – 119.
4. Глухов, Д.О. Мягкие вычисления для организации компьютерного представления номограмм на примере вычисления предельного коэффициента ползучести / Д.О. Глухов, С.М. Кундас, Т.М. Глухова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2010. – № 3. – С. 2 – 6.
5. Kosko, B. Fuzzy Systems as Universal Approximators / B. Kosko // IEEE Trans. on Computers. – 1994. – Vol. 43, № 11. – P. 1329 – 1333.

Поступила 04.09.2012

APPLICATION OF SOFT COMPUTING FOR SMOOTHING APPROXIMATION OF COMPLICATED SINGULAR DEPENDENCES

D. GLUKHOV, E. LAZOVSKI, T. GLUKHOVA, G. SAMOSHCHENKOV

This paper summarizes many years of experience in the development of linguistic approximator on fuzzy logic from the viewpoint of their applicability for the approximation of singular complex dependencies. By complexity we mean, first of all, multiple dimensions of dependence, and, secondly, the presence of singular features, such as uneven change of the output parameter with insignificant change of the input variables. We have developed and studied the original version of fuzzy logic membership functions, which gives the best results for these cases.