

УДК 629.4

В.В. Скалозуб, М.В. Скалозуб

## **О ПОСТРОЕНИИ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

*Разработан метод управления типа Такаги-Сугено, который учитывает наличие различных возможных типов неопределенности параметров объектов. Предложена аксиоматическая мультипликативная структура агрегации выводов отдельных правил. Для реализации метода выполнена модификация компонентов библиотеки MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.*

*Ключевые слова: база правил, управление Такаги-Сугено, неоднородная неопределенность, мультипликативная модель компромисса.*

### **Введение**

Исследуется проблема математического моделирования (свойств, поведения и т.п.) и управления сложными процессами или объектами (экономическими, техническими, технологическими и др.), которые выполняются в условиях многократной неопределенности, имеющей различные виды: случайность, неточность, нечеткость, их комбинации [1]. На практике оценка состояний объектов и их интерпретация, а также эффективность реализации процессов осуществляется по значениям некоторого набора параметров нормативного, интервального, статистического и нечеткого характера, которые поступают из нескольких источников. В большинстве случаев моделирование и управление осуществляется на основе моделей, однородных относительно вида неопределенности рассматриваемых величин, либо путем перехода к ним [2]. Развитие моделей и процедур управления, полно и корректно использующих по возможности все имеющиеся данные, полученные из нескольких источников или в различной форме, расширяет возможности методов моделирования сложных систем.

Анализ форм представления неопределенности параметров или состояний позволяет выделить ряд их источников. Прежде всего, это способ формирования контролируемых параметров математических моделей (детерминированные, статистические, нечеткие, нечетко-

---

© Скалозуб В.В., Скалозуб М.В., 2010

статистические, статистически-нечеткие и др. величины [1, 2]). Другим источником является неоднозначность интерпретации результатов наблюдений явлений, использование различных методов измерений и описаний характеристик, исходя из допущений о свойствах процессов, требований точности и других. Далее – наличие нескольких источников информации, которые могут иметь разные методы наблюдений и не совпадать во времени. Наконец, представление сложных форм данных через обобщение более простых [1, 3]. Существование моделей величин с разными видами неопределенности отмечено уже в [3]. Такие свойства присущи многим сложным системам, что делает актуальным разработку приемлемых на практике методов управления в условиях неоднородной неопределенности параметров сложных систем.

Исходя из инвариантности относительно вхождения в модель вероятности расплывчатого события стохастических и нечетких характеристик событий [3], в [4] предложен метод нечетко-статистического управления (НСУ), который объединяет величины обоих видов неопределенности в рамках расширения классического модуля нечеткого управления и использует правила нечеткой импликации  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ . В нем учитывается неодинаковая вероятность возможных значений входных и выходных параметров модуля нечеткого управления. В статье выполнено развитие метода НСУ Такаги-Сугено при многократной неопределенности.

#### **Величины со свойствами неоднородной неопределенности**

Примером нечетко-случайной величины (НСВ – измеримой функции из вероятностного пространства в наборе нечетких величин), как описания нечетко-статистических явлений, является задача (Negiot and Ralescu) измерения глубины озера в случайно выбранных местах с использованием нечетких значений – «Глубоко», «Очень глубоко», «Около 6 метров» и др. [1, стр. 275]. Она может быть расширена следующим образом. Пусть после формирования НСВ «Глубина» проведено последовательно еще два измерения глубин и получены две стохастические модели глубины –  $P1[h(x,y)>h^*]$ ,  $P2[h(x,y)>h^*]$ . Формирование математической модели, представляющей многокомпонентную неопределенность разных видов, предлагается выполнять следующим образом – в виде индекса

$$d(x) = \left[ d_{D_1^N}(\bar{x}_1) \cdot d_{D_2^N}(\bar{x}_2) \cdot \dots \cdot d_{D_n^N}(\bar{x}_n) \right]^{1/n}, \text{ рис. 1.}$$

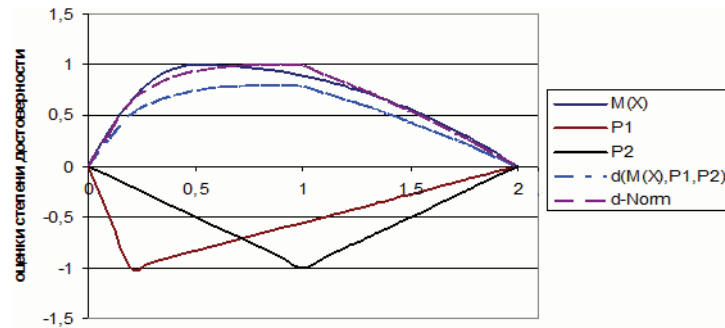


Рисунок 1 - Схема формирования индекса достоверности при много(трех)компонентной неопределенности

На рис. 1 отрицательные значения оси ординат соответствуют стохастическим моделям  $P1[*]$ ,  $P2[*]$ , пунктирные линии – ненормированные и нормированные значения индекса  $d(x)$ . Далее показатель достоверности значений, индекс  $d(x)$ , может быть использован в процедурах вывода типа НСУ.

Примером возникновения величин с многокомпонентной неопределенностью в задачах моделирования и управления на транспорте является оценка остаточного ресурса несущей конструкции железнодорожного экипажа. Здесь нечетко-случайная величина – «удельная наработка»: расчетно-экспериментальная оценка наработки несущей конструкции на один цикл колебаний:

$$D = \sum \sum \{p_{ij}(X) = p_i^v(X) p_j^{\text{cond}}(X)\} S_{ij-E}^m, \quad (1)$$

где  $S_{ij-E}^m$  – эквивалентная сила при скорости  $V_i$  в условиях  $j$  – ого типа,  $P_i^v$  – вероятность движения со скоростью  $V_i$ ;  $P_j^{\text{cond}}$  –  $j$  – ый тип условий движения (прямая, кривые разного радиуса). Двойственная природа величин обусловлена тем, что вероятности условий могут быть оценены, а для скоростей – могут быть получены только нечеткие модели описания.

#### Модифицированный модуль Такаги-Сугено с аксиоматическими свойствами многократно неопределенного управления

Правила модифицированного модуля имеют вид:

$$\begin{aligned} R^{(1)} : & \text{IF}(x_1 \text{ это } D_1^1 \text{ AND } x_2 \text{ это } D_2^1 \dots \text{AND } x_n \text{ это } D_n^1), \\ & \text{THEN } y_1 = f^{(1)}(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ R^{(N)} : & \text{IF}(x_1 \text{ это } D_1^N \text{ AND } x_2 \text{ это } D_2^N \dots \text{AND } x_n \text{ это } D_n^N), \\ & \text{THEN } y_N = f^{(N)}(x_1, x_2, \dots, x_n), \end{aligned} \quad (2)$$

$D_s$  – обобщенная оценка степени достоверности входных «сигналов»  $X_j$ .

$$d_{D_1}(\bar{x}_1) \cdot d_{D_2}(\bar{x}_2) \cdot \dots \cdot d_{D_n}(\bar{x}_n) \quad (3)$$

Вычисление «степени выполнения правил» – методы Мамдани, Ларсена:

$$W^1 = \begin{cases} \min \{d_{D_1}(\bar{x}_1), d_{D_2}(\bar{x}_2), \dots, d_{D_n}(\bar{x}_n)\} \\ \text{или} \\ d_{D_1}(\bar{x}_1) \cdot d_{D_2}(\bar{x}_2) \cdot \dots \cdot d_{D_n}(\bar{x}_n) = \prod_j d_{D_j}(\bar{x}_j) \end{cases}, \quad (4)$$

По оценкам сигналов  $X_j$  вычисляют

$$\bar{y}_1 = f^{(1)}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (5)$$

Как известно, формирование выходного сигнала модуля управления Сугено выполняется согласно [2]:

$$\bar{y} = \sum_{k=1}^N w^k \bar{y}_k / \sum_{k=1}^N w^k \quad (6)$$

Структура модели выбора управления (6) является результатом аксиом предпочтения на основе абсолютной уступки [5]. Такая форма компромисса может быть приемлемой для линейных систем, ее ограничением является также и отсутствие априорного представления о возможных отношениях между результатами отдельных правил в решении (6). Другая модель компромисса правил (2), (5), соответствующая принципу относительной уступки, обеспечивает выбор управления с аксиоматически установленным набором свойств [5]. С учетом этого предлагается модифицированный метод многократно неопределенного управления Такаги-Сугено, использующий оценки активности правил согласно (3), (4) и мультипликативную модель агрегации выводов правил (2), (5).

Задача формирования структуры модели для определения компромиссной величины управления типа Такаги-Сугено, а также соответствующего метода неопределенного управления при заданных величинах мер неопределенности посылок (3) – (4), заключается в поиске обобщенного функционала на основе учета всех частных значений (2)  $Y_j(k), j = 1, 2, \dots, m$ . При формулировке модели "справедливого" компромисса  $\{Y_j(k)\}_m$  будем придерживаться следующих предположений: симметрия (все  $Y_j$  являются равноправными); учитывается характеристика отклонения групповой

оценки; а также величина показателя для каждого  $Y_j : Y_j^*(k_j)$ . Такой тип компромисса  $Y_j(k)$ ,  $j=1,2,\dots,m$  определяется моделью относительной уступки [5], в соответствии с которой для каждого  $Y_j$  рассматривается нормируемая характеристика вида

$$\lambda_j = (Y_j^*(k_j) - Y_j^c(k_c)) / \max\{Y_j^*, Y_j^c\} \quad (7)$$

а компромиссно оптимальное значение рассчитывается на основе поиска экстремума следующей обобщенной функции:

$$\prod_{i=1}^b \lambda_i = \prod_{i=1}^m Y_i^c(k_c) \Rightarrow \max_{k_c} \quad (8)$$

В (7), (8) через  $Y_j$  обозначено значение функции согласно (2),  $k_c$  – номер итерации компромиссной модели (7), для управления Такаги-Сугено  $k_c=1$ .

С учетом (7), (8) получаем следующий модифицированный метод управления типа Такаги-Сугено:

$$Y = \sum_i^{\omega_i} \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n y_i^{\omega_i}} \quad (9)$$

где  $n$  – количество активных правил вывода;  $y_i$  – функции выходной величины, полученная в результате вывода по правилу  $i$ ;  $\omega_i$  – степень неопределенности правила « $i$ » (4).

На рис. 2. представлены примеры образования показателей многокомпонентной неопределенности для множественных чисел  $D_s$ , которые отвечают произведению в (4). При этом также происходит нормирование, что обеспечивает унифицированное представление разного количества форм неопределенности. Соответственно рис. 2, оценка  $d(x=1.5)$  при учете лишь степени принадлежности нечеткой величины  $M(X)$  равняется 0.8, при представлении как нечетко-статистической величины – 0.37, а в случае трехкомпонентной неопределенности за счет использования дополнительной информации  $d(x=1.5)=0.5$ .

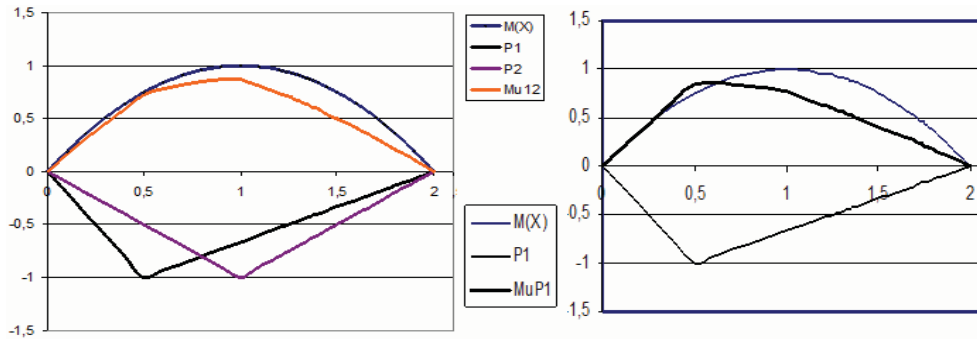


Рисунок 2 - Формирование показателей нечетко-статистической трехкомпонентной неопределенности

На рис. 3 приведен пример сравнения результатов реализации мультипликативного вывода  $Y_*$ , а также стандартного управления Такаги-Сугено  $Y$ .

#### Модификация компонентов моделирования нечетких систем MATLAB

Для реализации предложенных методов и процедур неоднородного и нечетко-статистического моделирования и управления был доработан компонент MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, который поддерживает все фазы разработки нечетких систем, включая синтез, исследование, проектирование, моделирование в режиме реального времени. Был создан код для функции принадлежности и процедур формирования заключений по методу Сугено. Усовершенствование функций компонентов MATLAB направлено на обеспечение возможности моделирования и управления с использованием величин с многократной неопределенностью в форме предложенных выше моделей образования интегрированных показателей. Чтобы оптимизировать системы нечеткого вывода, а также системы вывода с многократной неопределенностью, было разработано несколько специализированных программ.

	Y	My		Y	My
y1	1,5	0,5	y1	2,6	0,6
y2	3,6	0,3218	y2	1,5525	0,3
y3	1,7	0,25	y3	1,1	0,45
Y		2,1772	Y		1,8672
Y*		2,0088	Y*		1,7405

Рисунок 3 - Модифицированный мультипликативный вывод Такаги-Сугено

Они позволяют изменять вес правил системы нечеткого (с многократной неопределенностью) вывода, а также редактировать вид функций принадлежности входной величины, функций других типов неопределенности, на основе поиска наименьшей невязки системы.

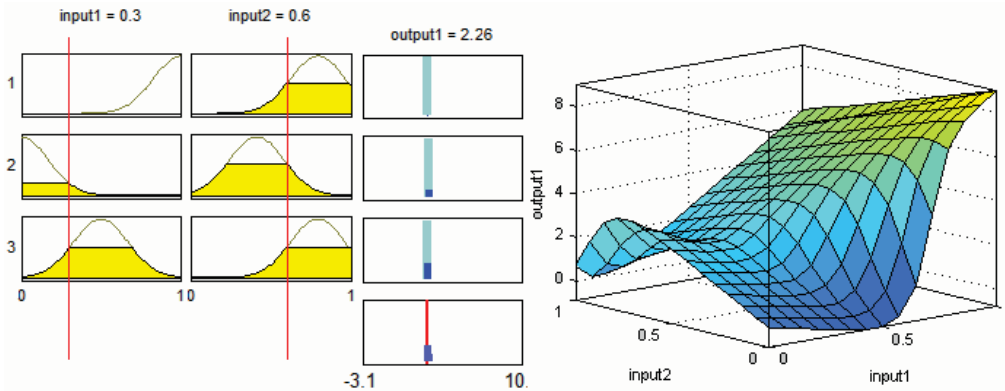


Рисунок 4 - Реализация нечетко-статистического управления средствами библиотеки модифицированных функции MATLAB

Рассмотрим модифицированный модуль Такаги-Сугено с тремя правилами:

$$R^{(1)} : \text{IF}(x_1 \text{ это большое AND } x_2 \text{ это среднее}), \text{ THEN } y_1 = 2 + 7x_1 - 3x_2$$

$$R^{(2)} : \text{IF}(x_1 \text{ это малое AND } x_2 \text{ это малое}), \text{ THEN } y_1 = -2x_1 + 5x_2$$

$$R^{(3)} : \text{IF}(x_1 \text{ это среднее AND } x_2 \text{ это среднее}), \text{ THEN } y_1 = 2 + 7x_1 - 3x_2$$

Его исходный сигнал («управление») определяется нечетко-статистическими параметрами  $x_1$  и  $x_2$ . Значение исходной величины модуля НС управления – по формуле (6), в которой  $W_k$  являются интегрированными оценками состояний неопределенности правил  $R(k)$ . В итоге получено значение параметра управления  $y=2.26$ . На рис. 4 приведены правила и поверхность вывода для классического модуля – при учете лишь нечеткой составляющей условий управления значения параметра управления  $y=2.33$ .

### Выводы

В работе развит подход к управлению в условиях неоднородной неопределенности параметров сложных систем. Разработанный модифицированный метод управления типа Такаги-Сугено на основе мультипликативной модели агрегации заключений правил базы знаний учитывает наличие различных возможных типов неопределенности параметров объектов. Реализация метода получена путем модификации компонентов MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования / Б. Лю; Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 416 с.
2. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. – М.: Изд-во Машиностроение, 2004. – 378 с.
3. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях. – М.: Мир, 1976. – С.172 – 215.
4. Скалзуб В.В. Метод и информационные технологии нечетко-статистического управления. Системні технології, 1' (50), 2008. С. 120 – 127.
5. Емельянов С.В., Борисов В.И., Малевич А.А. Модели и методы векторной оптимизации // В сб. Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. - М. Изд. ВИНТИ, т. 5, 1983. - С. 386 - 448.