

Свечкарев Валерий Петрович  
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»  
E-mail: [svecha\\_vp@mail.ru](mailto:svecha_vp@mail.ru)  
344090, Ростов-на-Дону, ул. Мельчакова, 10  
Тел.: +7(8632)696991

Натальченко Иван Андреевич  
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»  
E-mail: [native84@inbox.ru](mailto:native84@inbox.ru)  
344090, Ростов-на-Дону, ул. Мельчакова, 10  
Тел.: +7(8632)696991

Svechkarev Valeriy Petrovich  
Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»  
E-mail: [svecha\\_vp@mail.ru](mailto:svecha_vp@mail.ru)  
10, Melchikova street, Rostov-on-Don, 344090  
Phone: +7(8632)696991

Natalchencko Ivan Andreevich  
Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»  
E-mail: [native84@inbox.ru](mailto:native84@inbox.ru)

УДК 517.977.1

**В.В. Соловьев**

#### **РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

*Рассмотрена методика и пример построения нечеткой модели Takagi-Sugeno для нелинейной энергетической системы, позволяющая представить нелинейную модель в виде совокупности линейных моделей. Отличие построенной модели Takagi-Sugeno от известных нечетких моделей в том, что результирующая модель может быть в дальнейшем исследована методами классической теории управления.*

*Модель Takagi-Sugeno; энергетическая система.*

**V.V. Soloviev**

#### **WORKING OUT OF MODELS OF POWER SYSTEMS WITH APPLICATION OF THE DEVICE OF INDISTINCT LOGIC**

*The technique and example of construction of indistinct model Takagi-Sugeno for the nonlinear power system is considered, allowing to present nonlinear model in the form of set of linear models. Difference of constructed model Takagi-Sugeno from known indistinct models that a resultant the model can be investigated further methods of the classical theory of management.*

*Model Takagi-Sugeno; power system.*

Бурный рост промышленности и общего уровня благосостояния населения влечет за собой высокую потребность страны в электроэнергии. Общеизвестен тот факт, что основу энергетической системы страны составляют тепловые электрические станции (ТЭС). Одним из современных путей развития ТЭС является повышение мощности турбоагрегатов. Все турбоагрегаты большой мощности (1000 МВт и более) изготавливаются с одним или несколькими контурами промежуточного перегрева пара, что налагает повышенные требования к качеству управления турбоагрегатом.

Высокий уровень механизации турбоагрегата не избавляет человека от утомительного труда по управлению основными и вспомогательными установками ТЭС и, следовательно, не гарантирует их надежной работы. Систему управления турбоагрегатом составляют несколько подсистем, например: центробежный регулятор частоты вращения, быстродействующий ограничитель мощности, блок предварительной защиты, блок аварийной импульсной разгрузки, регулятор мощности турбины и т.д. [1].

Для построения эффективной системы управления необходимо выполнить математическое описание системы в целом. Сложность математического описания турбоагрегата определяется следующими факторами:

- процессы, протекающие в паровой турбине, описываются нелинейными уравнениями;
- работа турбоагрегата протекает в нескольких режимах (пуск, холостой ход, останов, максимальная нагрузка);
- необходимость проектирования оптимальной системы управления;
- необходимость рассмотрения турбоагрегата в рамках многомерных систем.

С использованием методов традиционной теории управления удастся добиться удовлетворительного математического описания отдельных подсистем. Причем при описании каждой из подсистем требуется вводить ряд упрощений для получения линейных зависимостей [2].

Лучших результатов можно достичь при использовании методов описания и исследования систем управления в пространстве состояний. Данный раздел теории управления уже достаточно хорошо разработан а, синтезированные регуляторы с использованием обратных связей по состоянию, доказали свою эффективность [3]. В связи с этим, на передний план выходит задача описания энергосистемы в пространстве состояний. В данной работе предлагается метод описания систем в пространстве состояний с использованием нечетких моделей Takagi-Sugeno (TS-модели) [4].

Нечеткая TS-модель задается базой нечетких правил «Если-То», которые описывают нелинейную систему в виде совокупности локальных линейных моделей. Полная нечеткая модель системы образуется нечетким объединением линейных моделей.

Нечеткое  $i$ -е правило для непрерывной системы имеет следующий вид:

Если  $z_1(t)$  есть  $H_{i1}$  и ... и  $z_r(t)$  есть  $H_{ir}$  тогда

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \\ y(t) = C_i x(t). \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, k., \quad (1)$$

где  $H_{ij}$  - термы нечеткого множества;  $k$  - количество нечетких правил;  $x(t) \in R^n$  - вектор переменных состояния;  $u(t) \in R^s$  - вектор входных воздействий;  $y(t) \in R^l$  - вектор выходных сигналов;  $A_i, B_i$  и  $C_i$  - матрицы размерностей  $n \times n$ ,

$n \times s$  и  $l \times n$  соответственно;  $z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_r(t)]$  - вектор-функция от переменных состояния системы.

Модели вида (1) будем называть «подсистемой». Модель в переменных состояния всей системы получается в результате нечеткого логического вывода вида

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^k q_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^k q_i(z(t))} = \sum_{i=1}^k p_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}, \quad (2)$$

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^k q_i(z(t)) C_i x(t)}{\sum_{i=1}^k q_i(z(t))} = \sum_{i=1}^k p_i(z(t)) C_i x(t), \quad (3)$$

где  $q_i(z(t)) = \prod_{j=1}^r H_{ij}(z_j(t))$ ,  $p_i(z(t)) = q_i(z(t)) / \sum_{i=1}^k q_i(z(t))$  для всех  $t$ .

Терм  $H_{ij}(z_j(t))$  определяет степень принадлежности  $z_j(t)$  множеству  $H_{ij}$ .

Для

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k q_i(z(t)) > 0, \\ p_i(z(t)) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k, \end{cases} \quad (4)$$

имеем

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k p_i(z(t)) = 1, \\ p_i(z(t)) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k, \end{cases} \quad (5)$$

для всех  $t$ .

Для построения нечеткой TS-модели, необходимо выделить ограничения на переменные состояния. В связи с этим удобно поведение нелинейной системы рассматривать в секторе [5]. Например, пусть задана математическая модель автономной системы в виде

$$\dot{x} = \phi(x(t)), \quad \phi(0) = 0, \quad (6)$$

где  $\phi(x(t))$  - нелинейная функция.

Предположим, что нелинейная функция правой части (6) целиком расположена в секторе ограниченном прямыми  $b_1 x(t)$  и  $b_2 x(t)$  (рис. 1, а).

Выделение «глобального» сектора поведения функции (при любых  $x(t)$ ) для некоторых нелинейностей может быть затруднительно, поэтому можно рассматривать локальные интервалы изменения переменных (рис. 1, б). Здесь нелинейная функция ограничена интервалом  $x(t) \in [-v, v]$ . Введение ограничений на переменные состояния вполне соответствует поведению реальных систем.

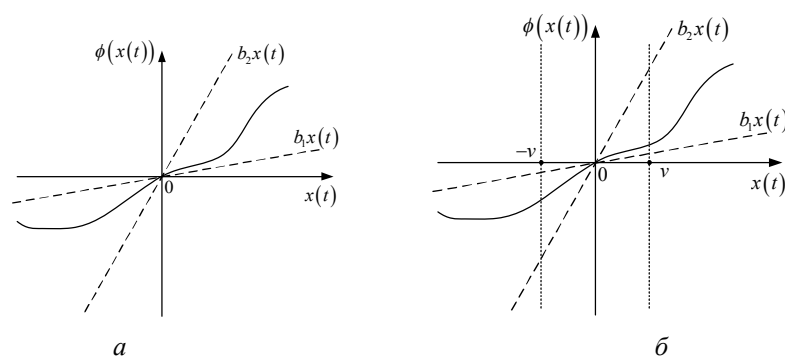


Рис. 1

**Пример 1.** Построим нечеткую TS-модель для нелинейной модели синхронного генератора [6].

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -a_1 \sin x_1 - (a_2 + a_3 \sin x_1)x_3 + a_0 \cdot f, \\ \dot{x}_3 = -x_3 + a_4 x_2 \sin x_1 + u. \end{cases} \quad (6)$$

где  $x_1$  - угол поворота ротора генератора относительно синхронной оси вращения;  $x_2$  - скольжение;  $x_3$  - отклонение ЭДС генератора от установившегося значения;  $u$  - отклонение напряжения возбуждения;  $a_1 - a_4$  - положительные постоянные;  $a_0$  - постоянная пропорциональная механической мощности турбины.

**Решение.**

Положим в модели (6) следующие коэффициенты [6]:  $a_0 = 0,57$ ,  $a_1 = 0,64$ ,  $a_2 = 0,3$ ,  $a_3 = 0,25$ ,  $a_4 = 1,37$ .

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -0,64 \sin x_1 - (0,3 + 0,25 \sin x_1)x_3 + 0,57 f, \\ \dot{x}_3 = -x_3 + 1,37 x_2 \sin x_1 + u. \end{cases} \quad (7)$$

Для нелинейных слагаемых введем вспомогательные переменные таким образом, чтобы результирующая форма модели была линейной.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -0,64 \cdot z_1(t) - (0,3 + 0,25 \cdot z_2(t))x_3 + 0,57 \cdot f, \\ \dot{x}_3 = -x_3 + 1,37 \cdot z_2(t) \cdot x_2 + u. \end{cases} \quad (8)$$

Так как в нелинейные слагаемые входит переменная  $x_1(t)$ , ограничим амплитуду ее изменения интервалом  $[-\pi/2, \pi/2]$ .

Рассмотрим поведение нелинейной функции  $z_1(t) = \sin x_1(t)$  в локальном секторе. При учете ограничения  $x_1 \in [-\pi/2, \pi/2]$  сектор образован прямыми  $b_1 x_1$  и  $b_2 x_1$ . В соответствии с рис. 2  $b_1 = 1$  и  $b_2 = 2/\pi$ . Таким образом представим  $z_1(t)$  в виде

$$z_1(t) = \sin(x_1(t)) = \left( \sum_{i=1}^2 M_i(z_1(t)) b_i \right) x_1(t). \quad (9)$$

Перепишем (9) в виде

$$z_1(t) = \left( \sum_{i=1}^2 M_i(z_1(t)) b_i \right) \arcsin(z_1(t)).$$

Согласно свойству функций принадлежности  $M_1(z_1(t)) + M_2(z_2(t)) = 1$  имеем

$$M_1(z_1(t)) = \begin{cases} \frac{b_2 \arcsin z_1(t) - z_1(t)}{\arcsin z_1(t)(b_2 - b_1)}, & z_1(t) \neq 0, \\ 1, & z_1(t) = 0, \end{cases}$$

$$M_2(z_1(t)) = \begin{cases} \frac{z_1(t) - b_1 \arcsin z_1(t)}{\arcsin z_1(t)(b_2 - b_1)}, & z_1(t) \neq 0, \\ 1, & z_1(t) = 0. \end{cases}$$

Определим максимум и минимум функции  $z_2(t) = \sin x_1(t)$  при учете ограничений

$$\min_{x_1(t), x_2(t)} z_2(t) = -1 = c_1, \quad \max_{x_1(t), x_2(t)} z_2(t) = 1 = c_2.$$

Тогда перепишем  $z_2(t)$  в виде

$$z_2(t) = \sum_{j=1}^2 N_j(z_2(t)) c_j = N_1(z_2(t)) \cdot (-1) + N_2(z_2(t)) \cdot 1.$$

Согласно свойству функций принадлежности  $N_1(z_2(t)) + N_2(z_2(t)) = 1$ , имеем

$$N_1(z_2(t)) = 0,5 - 0,5z_2(t), \quad N_2(z_2(t)) = 0,5 + 0,5z_2(t).$$

Перепишем математическую модель (8) в виде

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 M_i(z_1(t)) N_j(z_2(t)) \times$$

$$\times \left( \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -0,64 \cdot b_i & 0 & -0,3 - 0,25 \cdot c_j \\ 0 & 1,37 \cdot c_j & -1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0,57 \\ 0 \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \right). \quad (10)$$

Нечеткая модель (10) была представлена как FIS-структура в Fuzzy Logic Toolbox в среде MatLab 7.0.1. Поведение системы исследовалось, для каждой из моделей, при наличии возмущающих воздействий ( $f(t) \neq 0$ ) и отсутствии управляющих воздействий ( $u(t) = 0$ ). На рис. 2, а-в представлены результаты моделирования.

TS-модель превосходно отразила динамику исходной нелинейной системы. Точность аппроксимации нелинейной модели TS-моделью составила 3 %.

Результующая модель может быть исследована традиционными методами теории управления. Линейная форма модели позволяет использовать методы модального управления для синтеза регулятора.

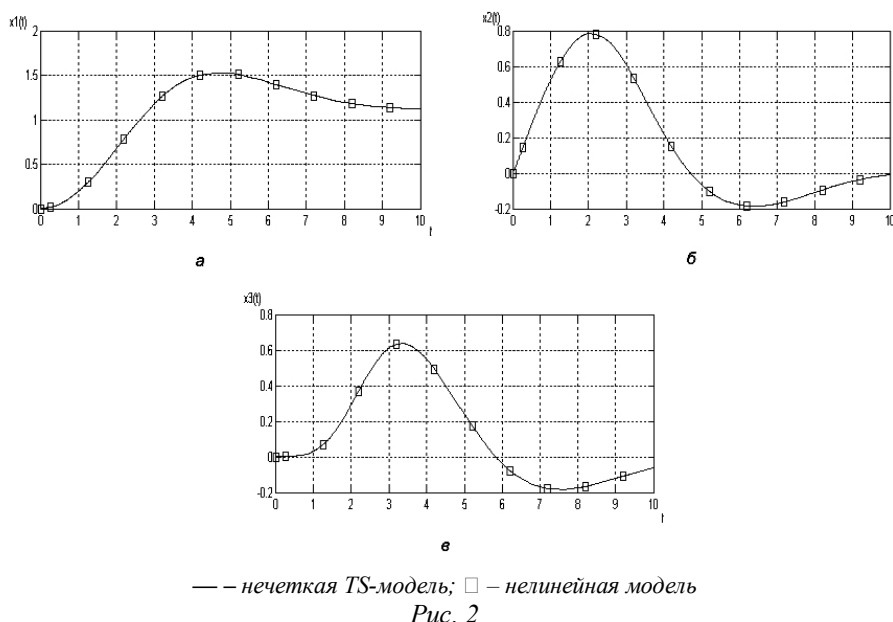


Рис. 2

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981.
2. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС: Уч. пособие. – Одесса: Астропринт, 2001.
3. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.
4. Tanaka K., Wang H. Fuzzy Control System Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach. Copyright, 2001.
5. Kawamoto S. et al., "An Approach to Stability Analysis of Second Order Fuzzy Systems" Proceedings of First IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 1, 1992.
6. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994.

Соловьев Виктор Владимирович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г.Таганроге

E-mail: [fin\\_val\\_iv@tsure.ru](mailto:fin_val_iv@tsure.ru)

347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44

Тел.: +7(8634)371773

Soloviev Viktor Vladimirovich

Taganrog Institute of Technological – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»

E-mail: [fin\\_val\\_iv@tsure.ru](mailto:fin_val_iv@tsure.ru)

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia

Phone: +7(8634)371773