

Приведенный пример показывает перспективность использования адаптивных научных методов для прогноза потребления электроэнергии. Развитие и тестирования на различных примерах предложенной методики использования нечеткой логики и искусственных нейронных сетей может привести к очень эффективному и удобному методу прогноза потребления электроэнергии. Данная задача является крайне важной для определения стратегии поведения в электроэнергетике. Внедрение методов и технологий компьютерного тестирования позволяет организовать эффективный контроль и оценку уровня качества оказания услуг.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А.* Эконометрика. Начальный курс: Учебник. – 7-е изд., испр. – М.: Дело, 2005. – 504 с.
2. *Кругов В.В.* Методы прогнозирования многомерных временных рядов / В.В.Круглов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 2. – С. 62-66.
3. *Швайко П.* Эконометрические модели анализа и прогнозирования емкости первичного рынка ГКО / П.Швайко // Эковест. – 2002. – № 2. – С. 111 – 153.
4. *Бирюков Е.В., Корнев М.С.* Практическая реализация нечеткой нейронной сети при краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки.
5. *Савельева Е.А., М Каневский.Ф., Кравецкий А.С., Огарь В.П., Большов Л.А.* Пример прогноза потребления электроэнергии при экстремальных погодных условиях//ЭСКО – Электронный журнал энергосервисной компании “Экологические системы”. 2004. – №2.
6. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

УДК 620.9.001.12/.18

**В.И. Финаев, В. Ю. Евтушенко**

### **МЕТОДОЛОГИЯ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ**

При управлении сложными техническими системами, как правило, приходится сталкиваться с различной степенью неопределенности исходных данных, параметров системы, нечеткостью целей и задач управления.

Выбор методов формализации исходной информации зависит главным образом от типа неопределенности, к которому относится данная задача.

В современной научной литературе обращается внимание на необходимость разработки и применения новых методов раскрытия неопределенности при управлении в условиях неполной (нечеткой) информации [5, 6, 9].

Методы управления, основанные на теории нечетких множеств, разработанной американским математиком Л. А. Заде, являются наиболее перспективными для решения данного класса задач.

Качественный процесс решения задачи, свойственный человеку, называют *нечетким алгоритмом*. Для более содержательного определения нечеткого алгоритма введем понятие *нечеткого оператора* – это любой оператор, содержащий в своей формулировке, по крайней мере, одну нечеткую или лингвистическую переменную, нечеткую функцию или нечеткое отношение. Тогда *нечеткий алгоритм* – это последовательность выполняемых в соответствии с их семантикой

нечетких операторов, приводящую к неполностью определенному нечеткому решению [3]. Впервые понятие нечеткого алгоритма было введено в работе [1].

Почти все причины успешного применения нечеткой логики в областях, не связанных с управлением, так или иначе, сводятся к идее нечеткого управления. Метод нечеткого управления может быть полезен для любых приложений.

При традиционном нечетком управлении осуществляется параллельная обработка большого числа правил, а не непрерывное выполнение последовательных предписаний типа нечеткого алгоритма. На практике применение правил сводится к нечетким выводам в нечеткой логике. Составляются несколько правил, результаты отдельных выводов по которым обобщаются, и полученный результат преобразуется в числовое значение (задающую величину) для ввода в оборудование, которое является объектом управления. Возможен также способ нечеткого управления с выбором только одного наиболее подходящего правила. Правила описываются с помощью неопределенных слов и называются правилами нечеткого управления.

Существует три основных способа составления правил нечеткого управления:

- 1) на основе опыта и знаний эксперта;
- 2) путем создания модели действий оператора;
- 3) путем обучения.

В первом случае методом вопросов и ответов в словесном виде извлекаются опыт квалифицированного оператора и знания инженера по управлению, которые затем обобщаются в виде правил нечеткого управления в форме «если ... то». Второй способ используется в случаях, когда от экспертов не удается получить правила в словесном выражении. Например, когда оператор запоминает манипуляции в виде движений рук, но представить их на языковом уровне затрудняется. В таком случае ему поручается выполнение операции и из хронометрированных данных воссоздается ситуация. Если действия оператора можно смоделировать в форме «если ... то», их можно непосредственно использовать в качестве правил управления. Третий способ эффективен в случаях, когда можно провести эксперимент на реальном оборудовании или на имитационной модели. Правила нечеткого управления в этом случае можно формировать, начиная «с нуля», когда еще нет ни одного правила, или в соответствии с изменением среды постепенно улучшать их за счет обучения «на ошибках», посредством анализа результатов управления.

В [2] выделяется еще четвертый способ – на основе нечеткой модели оборудования правила нечеткого управления легко выводятся теоретически, исходя из целей управления и модели оборудования.

Отметим некоторые особенности нечеткого управления [2, 4]. Первая особенность заключается в том, что правила нечеткого управления, будучи условными высказываниями типа «если ... то», являются логическими.

Использование правил осуществляется через механизм логических выводов. Логическое управление означает, что легко представить логику управления эксперта и разнообразным предпосылкам можно поставить в соответствие некоторое действие.

Для реального оборудования это не только использование при управлении полной информации в отличие от классической теории управления, но и изменение режимов управления в зависимости от различных условий, например, времени и значений параметров.

Логическое управление применяют также при обработке нештатных ситуаций. Во многих видах реального оборудования необходимо уделять особое внимание процедуре запуска; в этом случае для автоматизации очень удобно использовать нечеткое управление, поскольку можно описывать правила в форме «если ... то» одинаковым образом и для запуска, и для нормальной работы.

Вторая особенность – параллельное управление – заключается в том, что и нечеткие методы управления существенно различаются.

Традиционные методы управления – это методы, в которых обобщенное правило управления представляется с помощью одной формулы (целевой функции), в то время как при нечетком управлении используется большое количество частных правил.

Каждое правило действует в определенной области информационного пространства, используемого при управлении; для каждой локальной области распределенного информационного пространства целесообразно создавать отдельные правила управления.

Кроме того, если имеется много регулируемых величин, для каждой из них можно создать отдельные правила управления. Аналогично, если имеется много целей управления, для каждой цели желательно создавать правила управления. Классическое управление существенно ограничивало теоретически возможные разновидности целей в связи с необходимостью представлять цель обобщенной функцией.

При нечетком управлении необходимость в целевых функциях и в решении задач оптимального управления отпадает, поэтому можно успешно справиться со всем многообразием целей и даже со взаимно противоречащими целями.

Третья особенность нечеткого управления состоит в том, что правила записываются словами в форме «если ... то». Это означает, что можно организовать управление в виде диалога с оператором, а регулятор превращается из прежнего «черного ящика» в «серый ящик».

Следовательно, оператору легко будет понимать действия регулятора. Кроме того, за счет обучения оператор может улучшать способности нечеткого регулятора.

Поясним на упрощенном примере управления автономной фотоветроэнергетической системой (ФВЭС), как выполняются нечеткие выводы по правилам. ФВЭС является сложной технической системой (рис. 1) [7]. Она включает в себя следующие основные функциональные компоненты [8]:

- ФЭУ (фотоэнергетическое устройство);
- ВЭУ (ветроэнергетическое устройство);
- Потребитель (жилой дом);
- АБ (аккумуляторная батарея).

Каждый из этих компонентов обладает рядом характеристик многие, из которых носят вероятностный характер. Солнечная и ветровая энергии имеют стохастическую природу.

С учетом инертности системы представляется целесообразным управление с прогнозированием уровня приходящей энергии. В этом случае управление приобретает ярко выраженный нечеткий (расплывчатый) характер, что позволяет применить метод нечеткого управления.

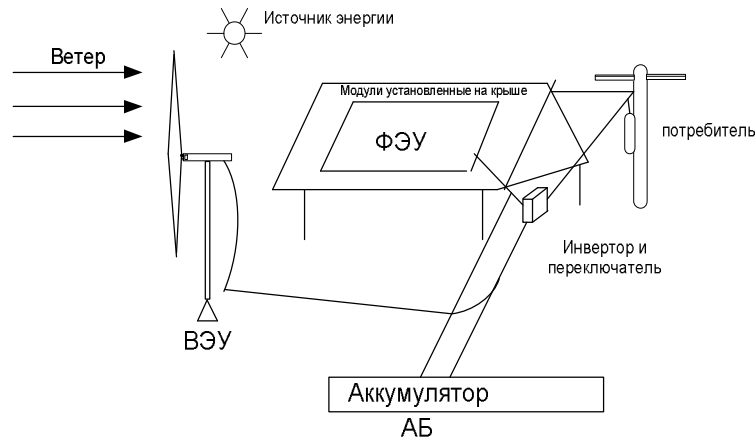


Рис. 1. Автономная ФВЭС

Предположим, что существуют знания эксперта о том, что необходимо зарядить аккумулятор, если уровень прогнозируемой солнечной и ветровой энергий высокий. Это знание можно представить с помощью нечеткого продукционного правила типа «если ... то» следующим образом:

*Если уровень энергии высокий, то зарядить аккумулятор* (1)

В данном случае важно описать предпосылку и заключение в виде нечеткого отношения. Другими словами, в исходное выражение не попали данные о том, каков уровень энергии, и на сколько нужно увеличить заряд аккумулятора. При этом интерпретация с помощью нечеткого множества, например:

$$\begin{aligned}
 \text{ВЫСОКИЙ} = & 0,1/3 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 0,3/5 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 0,7/7 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + \\
 & + 0,8/9 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 0,9/11 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 1,0/13 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 1,0/15 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 1,0/17 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (2)
 \end{aligned}$$

точками соответствующим образом интерполированы и показаны непрерывной линией). Обозначим через  $A$  нечеткое множество *ВЫСОКИЙ* в предпосылке  $X$  и через  $B$  нечеткое множество *ЗАРЯДИТЬ* в заключении  $Y$ . Нечеткое множество «довольно *ВЫСОКИЙ*» в данных наблюдения  $X$  (сокращенно  $A'$ ) из формулы (5) можно представить так, как на рис.2, а. На рис. 2, б графически изображен процесс классического нечеткого вывода. Как  $A \cap A'$  получен результат приближенного сопоставления предпосылки правила  $A$  и данных наблюдения  $A'$ . Затем рассмотрим максимальное значение  $\alpha$  как некую меру сопоставления  $A \cap A'$ , выполним редукцию по этой мере заключения  $B$  в правиле и получим результат вывода  $B$  (рис. 2, б). В качестве способа редукции  $B$  выбрано отсечение по мере сопоставления  $\alpha$ . На рисунке  $\alpha Y$  означает, что  $m_{\alpha Y}(y) = \alpha$  для  $\forall y \in Y$ .

Итак, для текущих данных наблюдения  $A'$  (= довольно *ВЫСОКИЙ*) в результате применения правила  $A \rightarrow B$  (= если *ВЫСОКИЙ*, то *ЗАРЯДИТЬ*) получаем  $B'$  (слегка *ЗАРЯДИТЬ*). Здесь результат вывода  $B'$  является нечетким множеством в  $Y$ , как показано на рис. 2, б. Однако пока никаких конкретных операций произвести нельзя. Дело в том, что на основе функции принадлежности  $m_B(y)$  для  $B$  необходимо извлечь для каждой точки в  $Y$  значения для выполнения операции. Этот процесс обычно называют дефазификацией. На рис. 2, б для этих целей использован метод центра тяжести (ЦТ), определено примерное значение

для операции ЦТ  $\approx 600$  (А·ч) и принято решение увеличить заряд аккумулятора до 600 А·ч.

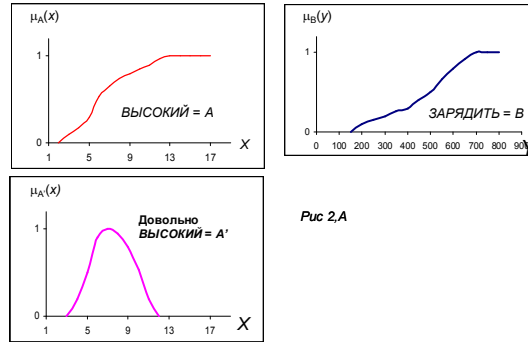


Рис. 2,А

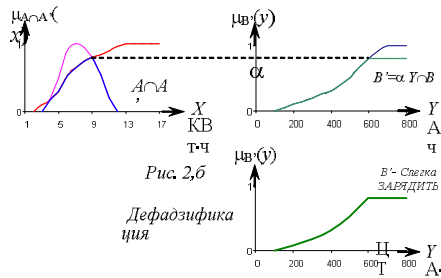


Рис. 2,б  
Дефаздификация

Рис. 2. Процесс классического нечеткого вывода

Знание эксперта  $A \rightarrow B$  отражает нечеткое причинное отношение предпосылки и заключения, поэтому назовем его нечетким отношением и обозначим через  $R$ :

$$R = A \rightarrow B \quad (7)$$

$R$  можно рассматривать как нечеткое множество на прямом произведении  $X \times Y$  полного пространства заключений  $Y$ . Таким образом, процесс получения (нечеткого) результата вывода  $B'$  с использованием данных наблюдения  $A'$  и знания  $A \rightarrow B$  можно представить в виде формулы

$$B' = A' \bullet R = A' \bullet (A \rightarrow B). \quad (8)$$

Здесь  $\bullet$  называется композиционным правилом нечеткого вывода. Стрелка  $\rightarrow$  в правиле  $A \rightarrow B$  (7) называется нечеткой импликацией. Фактически нечеткий вывод

Метод нахождения центра тяжести композиции максимум-минимум показанный на рис. 2 является самым используемым и самым типичным методом нечетких выводов. Основываясь на приведенных выше объяснениях для дефазификации можно предложить метод медианы (используется среднее значение), метод весов (основан на переменной  $y$ , задающей максимальное значение принадлежности), вместо отсечения  $\alpha Y \cap B$ , получающего  $B'$  по  $B$  и  $\alpha$ , – метод применения сжатия  $\alpha B$  заключения  $B$  по  $\alpha$  и т.п. Перечислить все эти методы практически невозможно, их предложено более ста [2].

Нечеткие знания, используемые в продукционных правилах, составляются в виде базы знаний. Кроме того, в нечетких суждениях, описываемых в предпосылках и заключениях каждого правила, имеется несколько членов. Следовательно, в общем случае рассматривается база знаний типа:

$$\text{если } A_{i1} = 0, A_{i2} = 0, \dots, A_{im} = 0,$$

$$\text{то } B_{i1} = \Delta, B_{i2} = \Delta, \dots, B_{in} = \Delta \Big|_{i=1}^I,$$

где  $I$  – число правил в предпосылке,  $m$  – число членов в предпосылке,  $n$  – число членов в заключении.

С использованием теории нечетких множеств решаются задачи согласования противоречивых критериев, создание нечетких логических регуляторов.

Нечеткие алгоритмы позволяют применять лингвистическое описание для моделирования сложных процессов, устанавливать нечеткие отношения между понятиями, описывать одни нечеткие понятия другими, уже определенными, прогнозировать поведение объекта управления, формировать множество альтернатив и производить формальное описание нечетких правил принятия решения.

Таким образом, достоинства нечеткой логики заключаются в том, что она позволяет удачно представить мышление человека, т.е. способы принятия решения человеком и способы моделирования сложных объектов, и, кроме того, пригодна для представления знаний.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zadeh L. A. Fuzzy Algorithms//Inform. a. Control. 1965. – Vol. 12, № 2. – С. 94-102.
2. Асаи К., Ваида Д. и др. Прикладные нечеткие системы/ Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
3. Борисов А. Н., Алексеев А. В., Меркурьева Г. В. и др. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
4. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Поспелова Д. А. – М.: Наука, 1986. – 386 с.
5. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
6. Симанков В.С., Буцацкий П.Ю., Шотин А.В. Методология моделирования физических процессов в энергетических комплексах с нетрадиционными источниками энергии и оптимизация их параметров // Труды ФОРА. 1998. – №3. – С. 18-26.
7. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 391 с.
8. Экель П. Я., Попов В. А. Учет фактора неопределенности в задачах моделирования и оптимизации электрических сетей. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. – № 2.

УДК 62-50:004.032.26: 620.9

**В.С. Пономарев, В.И. Финаев**

#### **ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Необходимость применения адаптивных систем управления электроэнергетическими объектами на современном этапе развития энергетики возрастает из-за изменения условий их функционирования. Структурная перестройка и вне-