

МЕТОДОЛОГИЯ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ФОТОВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

В. С. Симанков, А. В. Шопин, П. Ю. Бучацкий

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Майкопский государственный технологический институт, Майкоп

В статье рассматривается методология решения проблемы управления сложными техническими системами, характеризующимися нечеткой информацией о протекающих процессах. Предлагается применение метода нечеткого управления, основанного на продукционных правилах. Приводится упрощенный пример нечеткого управления автономной фотоветроэнергетической системой (ФВЭС).

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

Причины возникновения неопределенности могут заключаться в стохастической природе влияющих на систему внешних факторов, в особенностях протекающего технологического процесса и в непредсказуемости управляющего воздействия человека.

Выбор методов формализации исходной информации зависит главным образом от типа неопределенности, к которому относится данная задача. Существует несколько вариантов подходов к классификации типов неопределенности. Нет также единства в терминологии. Тем не менее можно выделить наиболее общие закономерности:

1. *Полная определенность* (Детерминированная информация. Для принятия решения используются методы линейного программирования с учетом погрешности исходных данных).
2. *Пробабилитическая неопределенность* (Информация носит вероятностный характер. Задается поведением самого объекта исследования, причем известны вероятности наступления каждого исхода. Устраняется методами вероятностно-статистических описаний);
3. *Эпистемологическая неопределенность* (Информация нечеткая, расплывчатая. Задается не только поведением объекта, но и не полностью контролируемой деятельностью познающего субъекта).

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, на наш взгляд, 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].

Идея нечеткого управления состоит в реализации нечеткого алгоритма в компьютере с использованием нечеткой логики. Исследования применения нечеткой логики в промышленности начались с нечеткого управления и привели к впечатляющим результатам; более того, благодаря успехам нечеткого управления повысился интерес к нечеткой логике во всем мире. 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 удастся 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 справляться 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.

Почти все реально работающие прикладные системы, активно использующие промежуточные нечеткие оценки, это в настоящее время либо системы, основанные на правилах, а именно на нечетких продукционных правилах, либо реляционные системы использующие нечеткие отношения. Работу и тех и других систем теоретически можно объяснить с единых позиций использования композиционных правил нечетких выводов, но внешне реальные технические алгоритмы выводов в каждом случае имеют существенные отличия.

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.

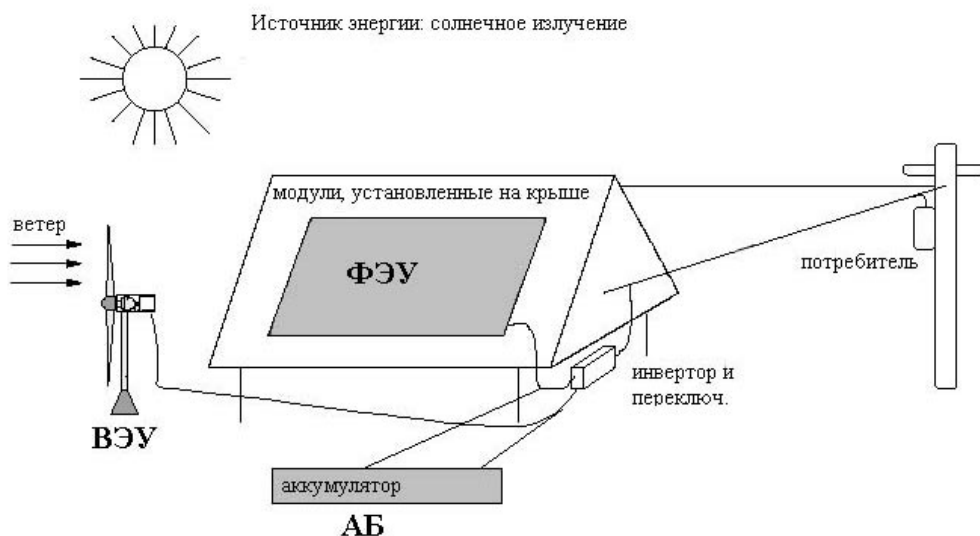


Рис. 1. Автономная ФВЭС

Пусть 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)

Здесь выражение, стоящее после **если**, называют антецедентом, предпосылкой, условием и т.п., а выражение, стоящее после **то**, – заключением, операцией и т.п. В нашем 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:

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

гораздо более точно отражает мысль эксперта, нежели строгая интерпретация его слов: «До 11 КВт·ч еще невысокий уровень, а начиная с 13 КВт·ч – высокий». Аналогично заряд аккумулятора, если принять 800 А·ч за полный заряд, можно описать с помощью следующей функции принадлежности:

$$\begin{aligned} \text{ЗАРЯДИТЬ} = & 0,1/200 \text{ А}\cdot\text{ч} + 0,2/300 \text{ А}\cdot\text{ч} + 0,3/400 \text{ А}\cdot\text{ч} + 0,5/500 \text{ А}\cdot\text{ч} + - \\ & + 0,8/600 \text{ А}\cdot\text{ч} + 1,0/700 \text{ А}\cdot\text{ч} + 1,0/800 \text{ А}\cdot\text{ч}. \end{aligned} \quad (3)$$

Человек, проектирующий данную систему, создает из правил в словесном представлении типа (1) конкретные функции принадлежности типа (2), (3). Полученные функции принадлежности можно запомнить в ЭВМ как базу знаний. Например, формулы (2) и (3) можно запомнить как информацию в одномерном массиве, индексы в котором соответствуют элементам полного пространства. Без ограничения общности будем считать, что нечеткие производные правила типа (1) накапливаются в базе знаний. Пусть также при прогнозировании текущего уровня энергии обнаружено, что

$$\text{Уровень энергии довольно высокий.} \quad (4)$$

Если прогноз уровня энергии возможен с большей точностью, то можно получить точную информацию. Однако, на практике при управлении ФВЭС с учетом изменения облачности информацию с достаточно хорошей точностью получить не удастся. В подобных случаях удобно принимать за информацию наблюдение (4), представленное с помощью нечеткого множества следующим образом:

$$\text{Довольно ВЫСОКИЙ} = 0,5/5 \text{ КВт}\cdot\text{ч} + 1,0/7 \text{ КВт}\cdot\text{ч} + 0,8/9 \text{ КВт}\cdot\text{ч} + 0,2/11 \text{ КВт}\cdot\text{ч}. \quad (5)$$

Разумеется, предпосылка *ВЫСОКИЙ* и наблюдение «*довольно ВЫСОКИЙ*» образуются путем сопоставления. В четкой логике сопоставление не имеет смысла, поэтому никакого логического вывода сделать нельзя. Однако, мы говорим о человеке, а он, получит путем приближенного сопоставления вывод:

$$\begin{aligned} & \text{Если ВЫСОКИЙ, то} \\ & \text{ЗАРЯДИТЬ} \\ & \text{Довольно ВЫСОКИЙ} \\ & \text{Слегка ЗАРЯДИТЬ} \end{aligned} \quad (6)$$

По сути он выполнил нечеткий вывод (точнее, провел приближенные рассуждения).

Существует более ста методов преобразования нечетких выводов на лингвистическом уровне в вычисления, но если ограничиться только методом, наиболее часто используемым на практике, то все объяснения можно привести с помощью рис. 2. Здесь полное пространство предпосылок - уровни энергии, а полное пространство заключений – уровень заряда аккумулятора. Обозначим их соответственно X и Y . Используя формулы (1) и (3), нечеткое производное правило (5) можно графически изобразить так, как на рис. 2, *а* (данные между 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 α 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 α . На рисунке αY означает, что $m_{\alpha}(y) = \alpha$ для $\forall y \in Y$.

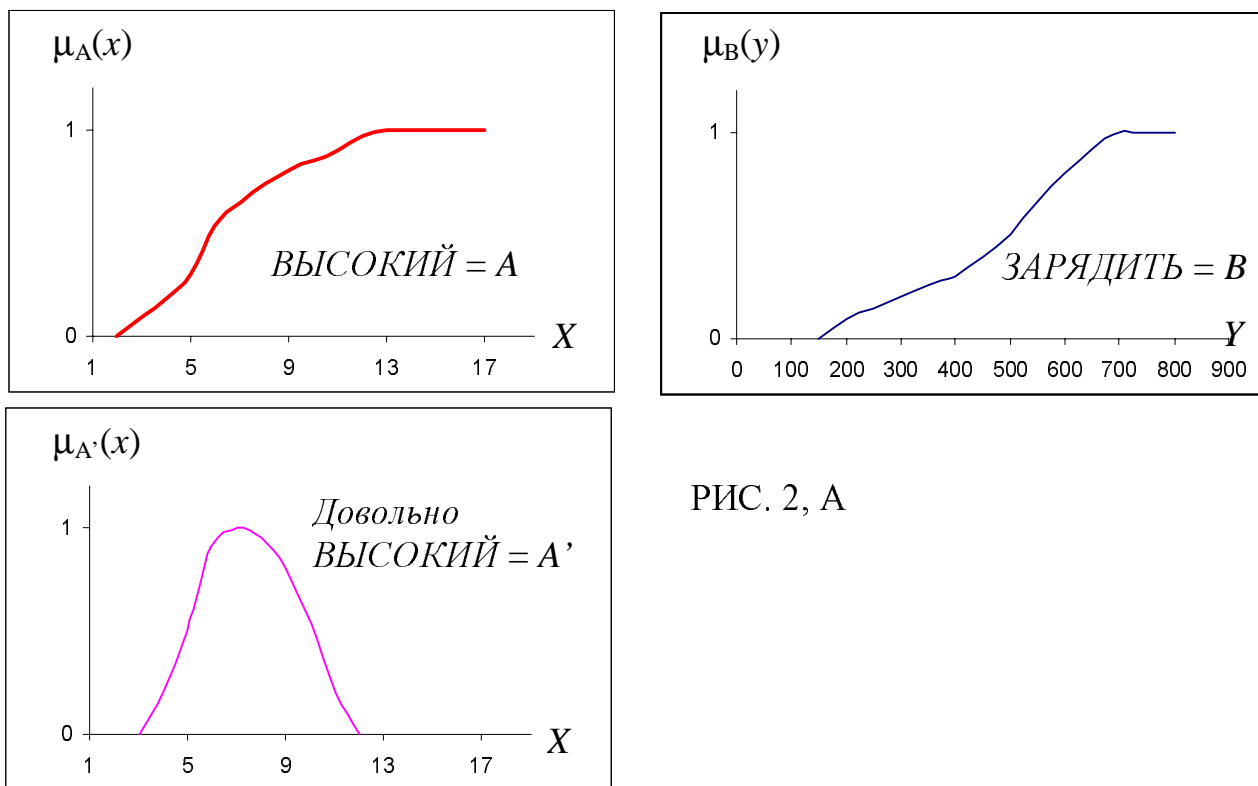


РИС. 2, А

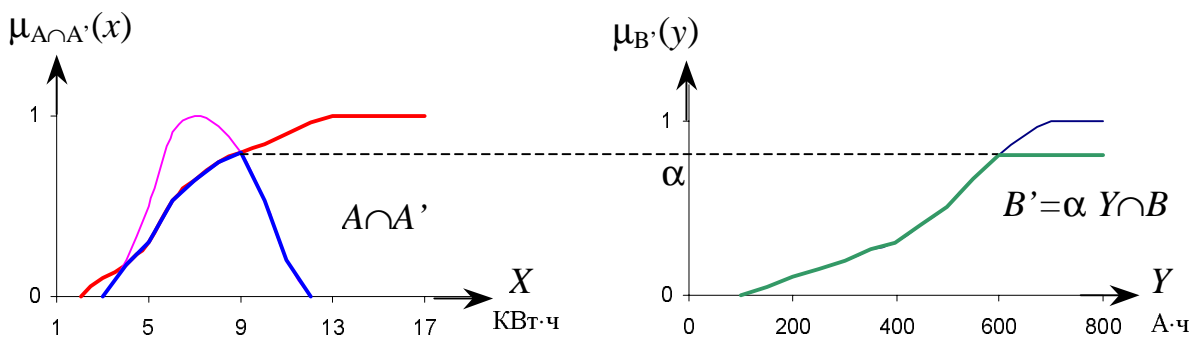
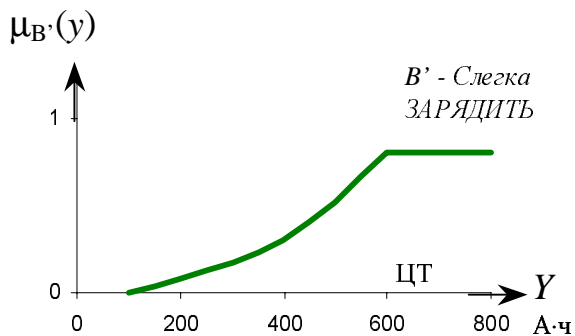


Рис. 2, б

Дефаздификация



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 дефадзификацией. На рис. 2, б для этих целей использован метод центра тяжести (ЦТ), определено примерное значение для операции ЦТ ≈ 600 (А·ч) и принято решение увеличить заряд аккумулятора до 600 А·ч.

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 на рис. 2 является применением максиминной композиции в качестве композиционного правила нечеткого вывода и операции взятия минимума в качестве нечеткой импликации. В данном случае операции взятия максимума и минимума удобно выразить в форме \vee и \wedge соответственно. Можно записать указанные выше определения на уровне функций принадлежности:

$$\begin{aligned} m_{B'} &= \vee_{x \in X} (m_{A'}(x) \wedge m_R(x, y)) = \vee_{x \in X} (m_{A'}(x) \wedge (m_A(x) \wedge m_B(y))) = \\ &= \vee_{x \in X} ((m_{A'}(x) \wedge m_A(x)) \wedge m_B(y)) = \vee_{x \in X} (m_{A' \cap A}(x) \wedge m_B(y)) = \\ &= \alpha \wedge m_X(y) = m_{\alpha Y \cap B}(y), \end{aligned} \quad (9)$$

$$ЦТ = \int_Y y \cdot m_{B'}(y) dy / \int_Y m_{B'}(y) dy. \quad (10)$$

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 дефадзификации 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 α , - метод применения сжатия αB заключения B по α 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:

$$\begin{aligned} \text{если } A_{i_1} = 0, A_{i_2} = 0, \dots, A_{i_m} = 0, \\ \text{то } B_{i_1} = \Delta, B_{i_2} = \Delta, \dots, B_{i_n} = \Delta \}_{i=1}^I, \end{aligned}$$

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

На практике, в отличие от систем с четкими правилами, в случае нечетких систем число правил на порядок меньше. Это связано с тем, что каждое нечеткое правило детализируется в четком мире, а также с тем, что целое число представляется приближенно с помощью существенно меньшего числа правил. Этот факт упрощает отладку системы, позволяет строить систему с хорошим соотношением стоимость/производительность и стимулирует практическое внедрение систем управления и экспертных систем основанных на нечетких выводах.

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.

Литература

1. *Zadeh L. A.* Fuzzy Algorithms//Inform. a. Control.-1965.-Vol. 12, № 2. - P. 94-102.
2. *Асаи К., Ватада 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. Д. А. Поспелова, 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., Бучацкий П.Ю., Шопин 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. *Симанков В.С., Зайцев И.В.* Проектирование систем управления автономных геливетроэлектроэнергетических систем на основе имитационного моделирования // X научн. конф. “Моделирование электроэнергетических систем”: Тез. докл. - Каунас 1991. - С 196-198.
8. *Твайделл Дж., Уэйр А.* Возобновляемые источники энергии. М.: Энергоатомиздат, 1990. - 391 с.
9. *Экель П. Я., Попов В. А.* Учет фактора неопределенности в задачах моделирования и оптимизации электрических сетей. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985, № 2.

Methodology of fuzzy control of autonomous photowindenergy system

V.S. Symancov, P.Yu. Buchatski, A.V. Shopin

The methodology solution of problem of control compound technical systems with fuzzy information by processes in them is considered. Application of method of fuzzy control under certain rules is proposed. The simple example of fuzzy control autonomous photowindenergy system is described.