
УДК 621.39
ББК 31.2
С 37

Симанков В.С.

Доктор технических наук, профессор, директор института информационных технологий и безопасности университетского комплекса Кубанского государственного технологического университета, Краснодар, тел. (861) 275-11-10, e-mail: vs@simankov.ru

Шопин А.В.

Директор вычислительного центра Адыгейского государственного университета, Майкоп, тел. (8772) 57-11-47, e-mail: ashop@qip.ru

Синтез системы управления автономной фотоветроэлектроэнергетической станцией на основе нечеткой логики
(Рецензирована)

Аннотация

Рассматривается методология синтеза системы управления сложными техническими системами, характеризующимися нечеткой информацией. Предложена классификация типов неопределенности исходных данных и используемого математического аппарата для реализации систем управления. Определяются основные свойства фотоветроэлектроэнергетической станции (ФВЭС) как сложного объекта управления и обосновывается выбор математического аппарата нечеткой логики для управления. Предложена и рассмотрена методология нечеткого ситуационного управления ФВЭС.

Ключевые слова: *система управления, нечеткая логика, ситуационное управление, нетрадиционные возобновляемые источники энергии, фотоветроэлектроэнергетическая установка, имитационное моделирование.*

Simankov V.S.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Institute of Information Technologies and Security of University Complex, Kuban State University of Technology, Krasnodar, ph. (861) 275-11-10, e-mail: vs@simankov.ru

Shopin A.V.

Director of Computer Center of the Adyghe State University, Maikop, ph. (8772) 57-11-47, e-mail: ashop@qip.ru

Synthesis of a control system of the autonomous photo-wind-electric power station on the basis of indistinct logic

Abstract

This paper discusses the methodology for synthesis of a system of control by the complicated technical systems, which are characterized by indistinct information. The author presents a classification of uncertainty types for initial data and mathematical apparatus used to realize the control systems. The main properties of the photo-wind-electric power station as a complex object of control are defined and the choice of mathematical apparatus of indistinct logic for control is substantiated. The methodology of indistinct situational management of the photo-wind-electric power station is proposed and considered.

Keywords: *a control system, indistinct logic, situational management, nonconventional renewable energy sources, photo-wind-electric power installation, imitating modeling.*

Развитие технологий использования возобновляемых источников энергии для автономного энергообеспечения потребителей, а также отработка технологий комбинированного использования возобновляемых источников энергии находятся в числе приоритетных направлений научно-технического прогресса в энергетической стратегии России на период до 2030 года. На сегодняшний день наиболее актуальной задачей является создание автономных комбинированных энергетических комплексов с нетрадиционными возобновляемыми источниками энергии (АЭК с НВИЭ) малой и средней

мощности, находящихся в труднодоступных районах, удаленных от линий электропередач и теплотрасс.

Наиболее эффективная работа АЭК с НВИЭ возможна только при использовании систем автоматического управления. По данным исследований [1] вследствие сравнительно высокой стоимости возобновляемой энергии и неравномерности ее поступления система автоматического управления (САУ) повышает эффективность энергосистемы на 60-70%. Эффективность (оптимальность) автономной энергосистемы определяется экономическим критерием и критерием надежности энергообеспечения потребителя.

Автономные энергетические комплексы с нетрадиционными возобновляемыми источниками энергии представляют собой типичный пример сложной динамической технической системы.

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.

Для реализации системы управления сложным объектом необходимо разрешить следующие задачи:

- формализация исходных данных и цели управления;
- создание адекватной имитационной модели объекта управления;
- расчет оптимального пути достижения цели.

Эти задачи обладают лишь относительной самостоятельностью. Выбор средств и методов математических расчетов зависит от формы представления имитационной модели объекта, от выбранного способа формализации исходных данных и цели управления, которые в свою очередь зависят от уровня достоверности и объема исходных данных.

Модели объекта управления могут иметь различную форму представления: аналитические выражения, качественное описание (знания экспертов), логико-динамические уравнения (гибридные системы), в виде программного кода, таблиц и т.п.

В таблице 1 приведена краткая, классификация некоторых возможных типов неопределенности через указание характеристик исходных данных, формы представления модели и соответствующих математических методов расчета управленческого воздействия. Указанные типы неопределенности, очевидно, условны и не отражают всего разнообразия возможных практических ситуаций, а служат лишь иллюстрацией рассматриваемого вопроса.

Следует отметить условность таблицы 1, которая заключается в следующем:

- элементы системы управления J , F , X , Y , W избраны наиболее типичные, в конкретных условиях они могут частично отсутствовать, список их может быть расширен или интерпретирован иначе;
- отсутствует достаточно четкая граница между выделенными характеристиками исходных данных, классификация характеристик может быть иной;
- существует большое число комбинаций элементов J , F , X , Y , W и соответствующих характеристик, в таблице приведены лишь некоторые из них.

В качестве примера сложной технической системы рассмотрим автономную комбинированную фотоветроэлектроэнергетическую станцию (ФВЭС) (рис. 1).

Классификация типов неопределенности

Тип неопределенности информации об объекте управления	Тип модели	Математические методы формализации неопределенности
Полная информация. Функционал J и структура f известны, они также как и X и Y , не искажены шумом W . Элементы J, f, X, Y, W детерминированные.	Детерминированная	Методы линейного, нелинейного, целочисленного, динамического программирования, прямые вариационные методы, и методы основанные на принципе максимума Понтрягина.
Неполная информация. Функционал J и структура f известны, они также как и X и Y , не искажены шумом W . Элементы J, f, X, Y, W детерминированные.	Интервальная	Интервальная математика, уравнения с интервальными коэффициентами.
Статистическая информация (большая выборка). Функционал J и структура f известны. Элементы J, f детерминированные, X, Y, W вероятностные.	Вероятностная	Теория вероятностей, математическая статистика, статистические методы теории распознавания образов и т.д.
Статистическая информация (малая выборка). Элементы J, f неизвестны, X, Y, W экспериментальные.	Нейросетевая	Искусственные нейронные сети, перцептрон Розенблата, машина Гамба и т.д.
Качественная информация. Элементы J, f, X, Y, W не имеют четкого значения, не имеется предпосылок предполагать тот или иной закон распределения.	Лингвистическая	Методы теории нечетких множеств, нечеткая логика.
Знания экспертов. Элементы J, f, X, Y, W гипотетические, не имеют четкого значения, заданы на основе интуиции и опыта.	Экспертная	Методы принятия решений, методы теории нечетких множеств.

Примечание: J – функционал, отражающий цель управления;

f – структура объекта управления;

X – входные не управляемые переменные;

U – входные управляемые переменные;

W – помеха; Y – выходные переменные.

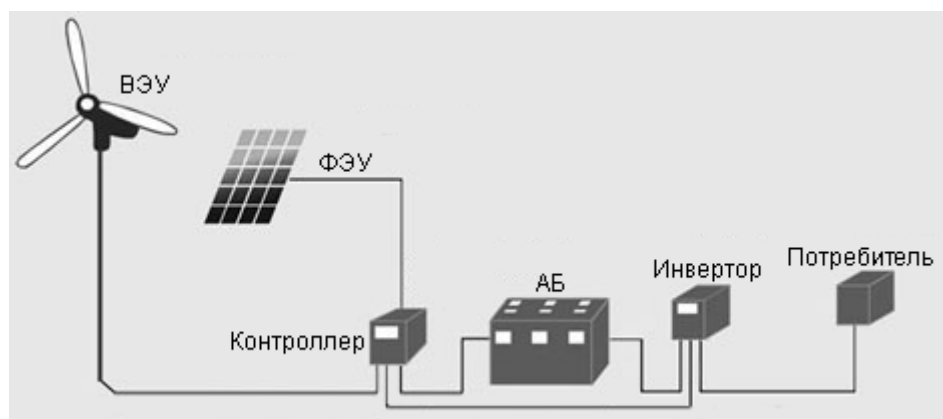


Рис. 1. Структурная схема ФВЭС

Структурно ФВЭС состоит из следующих основных модулей:

- фотоэнергетическое устройство (ФЭУ);
- ветроэнергетическое устройство (ВЭУ);
- аккумуляторные батареи (АБ);
- инвертор;
- потребитель (нагрузка);
- контроллер (управление уровня компонентов).

В соответствии с иерархическим принципом [2] построения интеллектуальных систем для автономных ФВЭС определяют два уровня управления:

- операционный уровень;
- приводной уровень (уровень компонентов).

На приводном уровне осуществляется управление компонентами по техническим критериям эффективности. Это могут быть: система слежения за солнцем (для ФЭУ); система стабилизации вращения ротора (для ВЭУ); управление инвертором и т.п.

На операционном уровне осуществляется оперативное управление распределением энергопотоков с целью наиболее полного и бесперебойного обеспечения потребителя электроэнергией при ее неравномерном поступлении в условиях нормального эксплуатационного режима всех элементов энергосистемы. Далее будет рассматриваться именно этот уровень управления. В настоящее время не существует оптимального алгоритма управления энергораспределением автономных ФВЭС в условиях дефицита вырабатываемой мощности.

Перечислим особенности автономных ФВЭС критичных для выбора математического аппарата реализации системы управления.

1. Входными данными для системы управления являются: величина суммарной получаемой энергии с ФЭУ и ВЭУ (E_p), величина потребляемой энергии (E_R), уровень заряда АБ (E_Z). Текущие значения этих величин четкие, но в силу природной неопределенности, функциональные зависимости этих величин не могут быть получены, прогноз этих величин носит приблизительный, нечеткий характер.

2. Целью управления является максимальная обеспеченность потребителя электроэнергией, исключение ситуаций отсутствия энергии и сброса «лишней» энергии. Эффективное решение этой задачи возможно с использованием прогнозных значений состояния объекта и ранжированием нагрузки по приоритетам. С учетом этих факторов задачи управления объектом носят противоречивый нечеткий характер.

3. Несмотря на сложность автономной ФВЭС, управление станцией может осуществляться с помощью оператора-эксперта.

4. Динамика изменения состояния объекта управления невысокая, можно говорить об инерционности объекта, следовательно, система управления обладает некоторым запасом времени для управленческого воздействия.

В силу низкой предсказуемости и высокой неопределенности как поступления возобновляемой энергии, так и потребляемой мощности, алгоритм управления должен обладать высокой степенью интеллектуальности и адаптивности. На основе перечисленных факторов можно сделать вывод о том, что для создания системы управления ФВЭС, наиболее адекватно реализующей перечисленные особенности объекта, наилучшим образом подходит математический аппарат теории нечетких множеств и нечеткого управления.

В большинстве случаев практической реализации систем нечеткого логического вывода блок нечеткого управления выполняется как надстройка над обычным регулятором, настраивая нужным образом ограниченное число его параметров (1-2). Это объясняется тем, что построение адекватной модели при большом количестве входных переменных требует большого объема базы знаний, количество продукционных правил в

которой экспоненциально возрастает с увеличением входов модели, что снижает качество и скорость нечеткого логического вывода.

При создании системы автоматического управления ФВЭС целесообразно включить блок нечеткого управления непосредственно в контур управления (рис. 2).

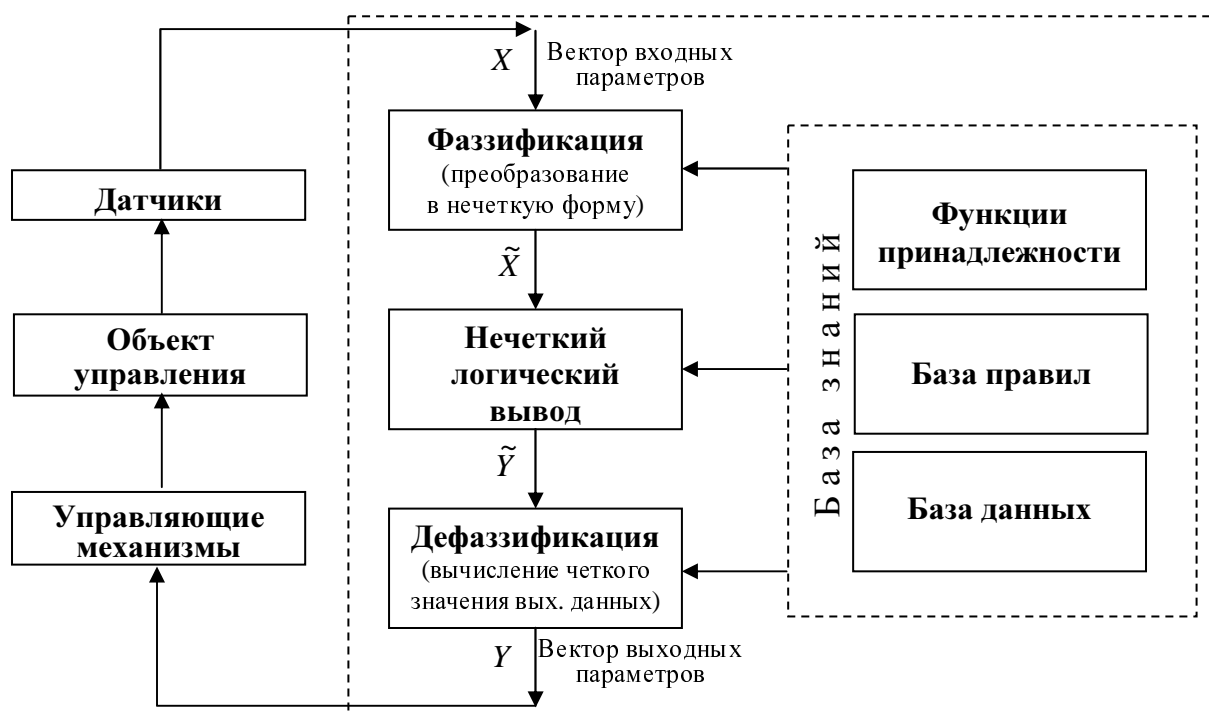


Рис. 2. Типовая структура систем нечеткого управления

Количество независимых входных и выходных параметров, характеризующих состояние объекта неоднозначным образом, гораздо больше. В этом случае на этапе генерации базы знаний, состоящей из нечетких логических правил, целесообразно использовать ситуационный подход, т.е. оперировать не конкретными параметрами системы, а классами ее состояний (ситуациями) [3]. Это в большинстве случаев приводит к уменьшению объема базы знаний и соответственно к повышению точности управления.

Ситуационный подход является одним из эффективных методов организации систем управления, функционирующих в условиях неопределенности. В этом случае в основе принятия решения об управлении используется понятие ситуации, как обобщенной совокупности параметров внешнего мира и самого объекта управления [4]. Все возможные состояния объекта управления могут описываться набором типовых ситуаций, каждая из которых есть совокупность лингвистических значений признаков.

При нечетком ситуационном управлении необходимо решать следующие основные задачи:

- определение множества признаков, характеризующих состояние объекта управления, существенных для достижения целей управления;
- определение количества термов лингвистических переменных, соответствующих признакам объекта, построение функций принадлежности термов;
- разбиение пространства состояний объекта управления на классы (кластеры);
- идентификация текущего состояния объекта управления, определение класса состояний (кластера), которому текущая ситуация соответствует в наибольшей степени;
- определение множества управляющих воздействий, их лингвистических пере-

менных и построение функций принадлежности соответствующих им термов, определяющих достижение целей управления;

– сопоставление каждому классу состояний объекта управления (кластеру) соответствующего управляющего воздействия;

– определение управляющего воздействия, соответствующего классу состояний текущей ситуации с помощью выбранного решающего правила.

Для построения блока управляющих воздействий строится решающая таблица, т.е. соответствие между всеми возможными ситуациями и некоторым набором управляющих решений. Размер таблицы определяется числом ситуаций, которое, в свою очередь, зависит от степени конкретизации значений признаков. Если p – число признаков, m_i – число значений признака $y_i \in Y$ ($i \in J = \{1, 2, \dots, p\}$), то число возможных ситуаций не превышает $m_1 \times m_2 \times \dots \times m_p$.

Для исключения неоправданно большого количества ситуаций все возможные состояния объекта управления описываются набором типовых ситуаций, каждая из которых есть совокупность лингвистических значений признаков. Первоначально количество термов лингвистических переменных признаков и вид их функций принадлежности определяется на основе экспертного опроса, затем они могут корректироваться в процессе отладки на имитационной модели.

Нечеткой ситуацией \tilde{S} называется нечеткое множество второго уровня

$$\tilde{S} = \{ \langle \mu_S(y_i) / y_i \rangle, y_i \in Y, \}$$

где $\mu_S(y_i) = \{ \langle \mu_{\mu_S}(T_j^i) / T_j^i \rangle, T_j^i \in T_i; \}$

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$ – множество признаков, характеризующих состояние системы;

$\langle y_i, T_i, D_i \rangle$ – лингвистическая переменная, соответствующая признаку $y_i \in Y$ ($i \in I = \{1, \dots, p\}$);

$T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}$ – терм-множество лингвистической переменной y_i ;

D_i – предметная шкала (базовое множество признака y_i).

Для описания термов T_j^i ($i \in L = \{1, 2, \dots, m_i\}$), соответствующих значениям признака y_i , используются нечеткие переменные $\langle T_j^i, D_i, \tilde{C}_j^i \rangle$, т.е. значение T_j^i описывается нечетким множеством \tilde{C}_j^i в базовом множестве D_i ,

$$\tilde{C}_j^i = \{ \langle \mu_{C_j^i}(d) / d \rangle, d \in D_i. \}$$

Ограниченным набором нечетких ситуаций могут задаваться бесконечное число состояний, в которых находятся объект управления, окружающая среда и система управления.

Для определения состояния объекта управления необходимо сравнить входную нечеткую ситуацию \tilde{S}_0 с каждой нечеткой ситуацией из некоторого набора типовых нечетких ситуаций $S = \{ \tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_N \}$. В качестве меры для определения степени близости нечеткой ситуации \tilde{S}_0 нечеткой ситуации $\tilde{S}_i \in S$ ($i \in K = \{1, 2, \dots, N\}$) будем использовать степень нечеткого включения нечеткой ситуации \tilde{S}_0 в нечеткую ситуацию \tilde{S}_i , которая обозначается $\nu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j)$ и определяется следующим образом:

$$v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \bigwedge_{y \in Y} v(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y)),$$

где $v(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y))$ является степенью включения нечеткого множества $\mu_{S_i}(y)$, в четкое множество $\mu_{S_j}(y)$.

Считается, что ситуация \tilde{S}_i нечетко включается в ситуацию \tilde{S}_j , $\tilde{S}_i \subseteq \tilde{S}_j$, если степень включения \tilde{S}_i в \tilde{S}_j не меньше некоторого порога включения, определяемого условиями управления, т.е. $v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) \geq t_{inc}$, где $t_{inc} \in [0, 5; 1]$.

Каждой эталонной ситуации соответствует принимаемое в ней решение, т.е. информация о способе управления объектом представляется в виде условных выражений «Если x есть A , то y есть B ». Каждое правило задается нечетким отношением [5]. Композиционное правило вывода заключается в вычислении операции композиции между входным нечетким множеством и соответствующей матрицей отношений R .

В условном выражении «Если A , то B » ($A \Rightarrow B$ в сокращении), в котором A и B представляют собой нечеткие множества, « A » называется антецедентом, « B » – заключением (консеквентом). Отношением R из A в B называется нечеткое подмножество декартового произведения $U \times V$, где $A \in U$, $B \in V$. Условное выражение вида «Если U есть A , то V есть B » представляется нечетким отношением R и определяется выражением

$$R = A \Rightarrow B,$$

и представляет собой матрицу, каждый элемент которой представляется выражением:

$$r(u, v) = \mu R(u, v) = \min(\mu_A(u), \mu_B(v)).$$

Элемент матрицы отношения R представляет собой степень истинности, которая принимает значение из замкнутого интервала $[0; 1]$.

Таким образом, если R является нечетким отношением из U в V , а x – это нечеткое подмножество из U , то нечеткое подмножество y из V , которое выводится из x , объявляется как $y = x \bullet R$ и определяется следующим образом:

$$\mu_y(v) = \max_{u \in U} \min(\mu_x(u), \mu_R(u, v)).$$

Объединив по операции \max все R_i (i – номер продукции в базе знаний), получим матрицу R , которую будем затем использовать для нахождения выходного нечеткого множества.

Описанный выше способ определения нечеткого множества y из нечеткого множества x называется композиционным правилом вывода.

Размер матрицы отношений R зависит от структуры правила. Чем больше участвует признаков в нечеткой ситуации, тем больше размеры имеет эта матрица. Очевидно, что такой метод реализации композиционного вывода требует большого объема памяти, что крайне не подходит для его аппаратной реализации. Кроме того, сильно замедляется скорость нечеткого вывода.

Более предпочтителен другой способ композиционного вывода [5], который базируется на вычислении степени сходства между входной и эталонными ситуациями, на основании которой модифицируется функция принадлежности заключения. Выходное управляющее решение выдается как по правилу, имеющему максимальную степень сходства с входным нечетким множеством, так и по всем правилам. В последнем случае окончательное выходное нечеткое множество по j -ому признаку получается в результате объединения всех модифицированных функций принадлежности, связанных с этим признаком. Рассмотрим этот алгоритм.

Если A и B являются нечеткими множествами из предметной области U и V соответственно, то нечеткое правило вида «Если A , то B » определяется как

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = f_{\rightarrow}(\mu_A(u), \mu_B(v)),$$

где $u \in U, v \in V$.

Пусть имеется набор нечетких множеств A_1, A_2, \dots, A_N и B_1, B_2, \dots, B_N из предметной области U и V соответственно и нечеткое отношение определяется следующим набором правил:

Правило 1: Если A_1 , то B_1 иначе

Правило 2: если A_2 , то B_2 иначе

...

Правило N : если A_N , то B_N .

Нечеткое отношение R получаем объединением всех R_i отношений, где i – это номер правила, т.е.

$$R = \bigcup_i R_i = \max_i f_{\rightarrow}(\mu_{A_i}(u), \mu_{B_i}(v)),$$

где $i=1, \dots, N$.

Предположим, что мы имеем некоторое нечеткое входное множество A' . Тогда результирующее выходное нечеткое множество B' согласно композиционному правилу вывода определяется как

$$B' = A' \bullet R.$$

Значения степеней функции принадлежности B вычисляются согласно «*max-min*» операции по следующей формуле:

$$\mu_{B'}(v) = \max_{u \in U} \min(\mu_{A'}(u), \mu_R(u, v)).$$

Рассмотрим некоторое i -ое правило из N правил. Пусть A' – это входное нечеткое множество, а R_i – нечеткое отношение для i -го правила.

Выходное нечеткое множество B' вычисляется с помощью операции композиции, т.е.

$$B'_i = A' \bullet R_i; \quad A' \in U, \quad B'_i \in V, \quad R_i \subset U \times V.$$

$$\mu_{B'_i}(v) = \min(\alpha_i, \mu_{R_i}(v)),$$

здесь

$$\alpha_i = \max_{u \in U} \min(\mu_{A'}(u), \mu_{A_i}(u)).$$

Если имеется набор нечетких входных множеств A'_1, A'_2, \dots, A'_k , i -ая продукция представляет собой:

Если $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ik}$, то B_i , тогда

$$\alpha_i = \min_k (\max_u \min(\mu_{A_{ik}}(u), \mu_{A_{ik}}(u))).$$

Окончательное выходное нечеткое множество B' (выдается управляющее решение по всем признакам) получается согласно следующей формуле:

$$B' = \bigcup_i B'_i.$$

В другом случае в качестве B' выдается B'_i для i -ой продукции, имеющей наибольшую α_i .

Этот метод логического вывода исключает хранение каких-либо матриц, что при-

водит к значительному выигрышу в скорости, при этом качество нечеткого вывода абсолютно не уступают композиционному логическому выводу.

Функционирование блока выработки управляющего воздействия в упрощенном виде можно представить следующим образом. Состояние объекта управления оценивается через некоторые дискретные промежутки времени и представляется в виде нечеткой ситуации. Полученная входная нечеткая ситуация сравнивается с типовыми ситуациями, хранящимися в базе знаний. Определяется типовая нечеткая ситуация, в некотором смысле наиболее близкая входной нечеткой ситуации. Информация о типовой нечеткой ситуации поступает в блок выработки управляющего воздействия, где в результате нечеткого ситуационного логического вывода определяются соответствующие входной ситуации управляющие решения.

Разработанные методы могут быть применены для построения систем управления широкого класса автономных энергетических комплексов с комплексированием разных видов НВИЭ. Применение предложенной методики для управления автономными энергетическими комплексами с НВИЭ повышает эффективность их функционирования и улучшает стоимостные характеристики данных систем.

Примечания:

1. Симанков В.С. Автоматизация системных исследований. Краснодар: КубГТУ, 2002. 376 с.
2. Лохин В.М., Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения / Интеллектуальные системы автоматического управления: сб. науч. статей / под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. С. 25-38.
3. Симанков В.С., Шопин А.В. Ситуационное управление сложным объектом в условиях нечеткой исходной информации // Труды ФОРА. 2004. № 9. С. 116-120. URL: <http://fora.adygnet.ru>
4. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.
5. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.

References:

1. Simankov V.S. Automation of system research. Krasnodar: KubGTU, 2002. 376 pp.
2. Lokhin V.M., Zakharov V.N. Intellectual control systems: concepts, definitions, principles of construction / Intellectual systems of automatic control: coll. of scient. articles / ed. by I.M. Makarov, V.M. Lokhin. M.: FIZMATLIT, 2001. P. 25-38.
3. Simankov V.S., Shopin A.V. Situational control of a complex object in the conditions of fuzzy source information // FORA Works. 2004. No. 9. P. 116-120. URL: <http://fora.adygnet.ru>
4. Fuzzy sets in models of control and artificial intelligence / ed. by D.A. Pospelov. M.: Nauka, 1986. 312 pp.
5. Melikhov A.N., Berstein L.S., Korovin S.Ya. Situational advising systems with fuzzy logic. M.: Nauka, 1990. 272 pp.