

УДК 535.8, 681.3.02, 518.6

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ЭКСПЕРИМЕНТОМ

А. Ю. Быковский, Ю. К. Мороко<sup>1</sup>

*Предлагается методика построения нечеткой системы управления оптическим экспериментом, основанная на схеме нескольких взаимодействующих между собой нечетких контроллеров. Для ее реализации могут быть применены как микроэлектронные нечеткие контроллеры, так и экспериментальные оптоэлектронные разработки нечеткой логики. Предложен метод уменьшения количества нечетких правил для описания системы, основанный на определенном выборе заведомо неполной системы правил.*

Проведение серьезных работ по автоматизации в масштабах лазерной или оптической лаборатории традиционно сдерживается большой сложностью, трудоемкостью и очень высокой стоимостью подобных работ у специализированных фирм. Огромное число параметров, описывающее работу персонала с оборудованием, приводит к исключительной разветвленности алгоритмов и неизбежному росту сложности программ. Однако появление современных разработок в области нечеткой логики (НЛ) [1] и искусственного интеллекта, таких как нечетко-логические робототехнические устройства, имитирующие работу человеческой руки [2], системы управления подвижными роботами [3], модели поведения коллективных робототехнических систем [4], нечеткие контроллеры (т.е. регуляторы) для типовых задач стабилизации и автоподстройки [5], позволяет поставить вопрос о возможности и целесообразности использования методов НЛ для создания перспективных интеллектуальных многопараметрических систем управления оптическим экспериментом.

<sup>1</sup>Московский инженерно-физический институт (Государственный университет).

В данной работе предлагается модель сложной многоконтроллерной системы нечеткого управления, выполняемой на основе хорошо известной схемы нечеткого контроллера [7]. Предлагаемая модель по мнению авторов обладает необходимой универсальностью, и предоставляет возможность:

- выполнять поэтапное наращивание и отладку установки по частям,
- обеспечить новые возможности защиты от нежелательного вмешательства,
- использовать особенности типичных задач оптического эксперимента для компактного формального описания системы,

– воспользоваться формализованным описанием словесных команд и языковых конструкций с помощью аппарата лингвистических переменных [6] уже на стадии общего описания установки, существенно облегчая передачу знаний от экспертов к технической системе.

*Особенности математического аппарата НЛ.* Предлагаемая модель полностью описывается в рамках традиционного математического аппарата НЛ [1, 8], где все входные и выходные переменные описываются с помощью так называемых функций принадлежности, а вместо традиционных операторов булевой (двоичной) логики приходится использовать более общие и мощные операторы. При этом, нечеткое множество  $A$  задается упорядоченными парами:  $A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$ , где  $x$  – порождающий элемент, а  $\mu_A(x)$  – степень принадлежности [1, 6]. Функция  $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$ , т.е.  $\mu_A$  принимает значения на интервале  $[0, 1]$ ,  $\mu_A(x)$  является нормированной на 1 и выпуклой [9], при этом она интерпретируется в рамках теории возможности [10]. В отличие от физических вероятностных моделей, в теории возможности для полного описания  $\mu$  не требуется знания всех возможных исходов события, и  $\sum_i \mu_i \neq 1$ , благодаря чему в процессе отработки модели удобно корректировать конкретный вид функций принадлежности. Их форма в принципе может быть любой, но обычно используются несколько стандартных видов [1, 8].

Лингвистическая переменная  $T$  (или терм-множество), широко применяемая в НЛ [1, 6], задается на области определения  $X$  как множества  $T = \{T^1, T^2, \dots, T^k\}$  и  $\mu(x) = \{\mu^1(x), \mu^2(x), \dots, \mu^k(x)\}$ , где для каждого  $i = 1, \dots, k$   $T^i \rightarrow \mu^i(x)$ . То есть каждое  $T^i$  определяет нечеткое имя и описывается своей функцией принадлежности  $\mu^i(x)$ .

Базовые операции НЛ можно задавать несколькими способами [1, 22], наиболее общими из операторов являются MINIMUM, MAXIMUM, которые сводятся к нахождению наименьшего и наибольшего элементов множества значений, поданных на входы логического вентиля.

Наиболее мощным инструментом НЛ является правило нечеткого логического вывода [1, 9], являющееся расширенным вариантом правила "Если...То...", хорошо известного в теории искусственного интеллекта. Общая схема нечеткого логического вывода для произвольного числа входных и выходных переменных основана на строгом формализме [9], однако в данной работе достаточно использовать упрощенное описание базы нечетких правил "Если...То...", которую можно записать в наглядном виде с помощью набора  $p$  выражений вида:

**Если**  $x_1$  *есть*  $\mu_{A11}, \dots, x_m$  *есть*  $\mu_{A1m}$  **То**  $y_1$  *есть*  $\mu_{B11}, \dots, y_n$  *есть*  $\mu_{B1n}$ , *иначе* (правило 1)  
 ..... (1)

**Если**  $x_1$  *есть*  $\mu_{Ap1}, \dots, x_m$  *есть*  $\mu_{Apm}$  **То**  $y_1$  *есть*  $\mu_{Bp1}, \dots, y_n$  *есть*  $\mu_{Bpn}$  (правило  $p$ ),

где часть **Если** – предпосылка, часть **То** – следствие,  $x_j$  и  $y_k$  – нечеткие переменные,  $\mu_{Aij}$  и  $\mu_{Bik}$  – функции принадлежности нечетких переменных или, в более общем случае, лингвистических переменных.

Схема нечеткого логического вывода (1) является основой для построения нечеткого контроллера [7], под которым понимается устройство управления, реализующее на основе РС, микроконтроллеров или иных аппаратных средств процедуру вычисления набора  $p$  нечетких правил "Если...То...". На основе знаний, содержащихся в контроллере, для набора значений функций принадлежности  $\mu_A(x_j)$  входных сигналов  $x_1, \dots, x_m$ , поступающих с датчиков, проводятся приближенные вычисления набора функций принадлежности  $\mu_B(x_k)$  для выходных сигналов  $y_1, \dots, y_n$ , подаваемых на исполнительные устройства. Изменения, произошедшие в системе, вновь отслеживаются входными датчиками, и в результате реализуется замкнутый контур управления с постоянной обратной связью (in-loop control). С точки зрения методов НЛ, чтобы реализовать схему управления какой-то сложной установкой, необходимо реализовать сложный нечеткий контроллер с достаточно большим набором нечетких правил "Если...То...".

Поскольку НЛ относят к эвристическим подходам [8, 10], выстраиваемым и тестируемым не на каких-либо формальных моделях, а на системе протоколированных знаний экспертов в определенной предметной области, то проектирование нечетких систем проводят с учетом особенностей предметной области, используемых для максимального упрощения способов описания знаний предметной области. При этом авторам было проще использовать более близкую им область оптических исследований.

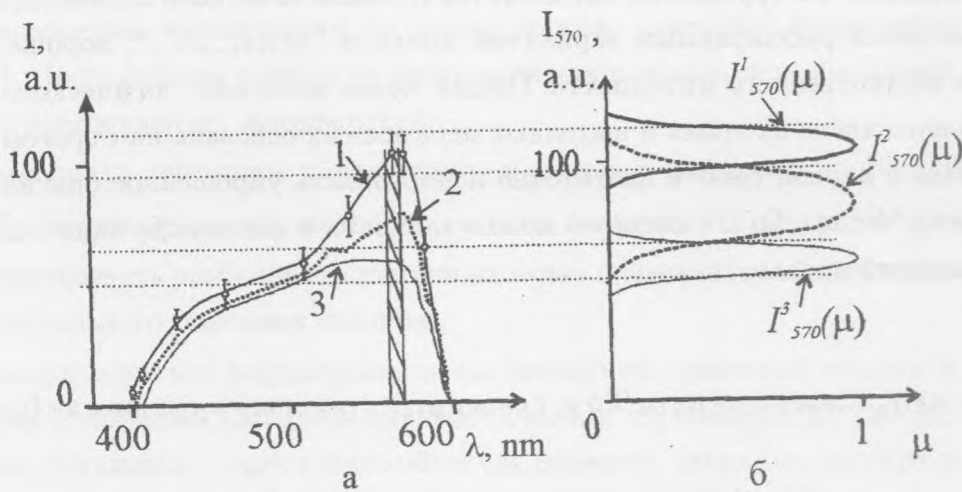


Рис. 1. а) Спектральные кривые 1, 2, 3 используются для описания набора лингвистических переменных  $t_i$ . Для области длин волн вблизи 570 нм задана лингвистическая переменная  $t_{570} \equiv$  "спектральный максимум 570 нм". Кривая 1 описывается значением лингвистической переменной  $t_{570}^1 =$  "ярко выраженный максимум 570 нм". Кривая 2 соответствует значению лингвистической переменной  $t_{570}^2 =$  "средне выраженный максимум 570 нм". Кривая 3 задает значение лингвистической переменной  $t_{570}^3 =$  "слабо выраженный максимум 570 нм". б) Способ построения вспомогательных функций  $I_{570}^1(\mu)$ ,  $I_{570}^2(\mu)$ ,  $I_{570}^3(\mu)$ , являющихся обратными к искомым функциям  $\mu_{570}^1(I)$ ,  $\mu_{570}^2(I)$ ,  $\mu_{570}^3(I)$ .

*Особенности нечеткого описания оптических характеристик.* Специфика оптических экспериментов заключается в широком применении массивов данных с большим числом однородных переменных, прежде всего спектральных, угловых и температурных зависимостей, позволяющих обойтись ограниченным набором нечетких правил из числа всех возможных. Для наглядности рассмотрим особенности предлагаемой методики на простом примере. Допустим, обрабатывается материал или технологический процесс, проявляющийся в наличии максимума оптического спектра в области 570 нм. При фиксированном уровне возбуждения образца (напряжении, токе, освещенности и т.д.), измеряемые спектры классифицируют в основном по трем группам, различающимся степенью выраженности максимума на 570 нм и задаваемыми тремя типичными кривыми 1, 2, 3 на рис. 1а. Образцы, описываемые кривой 3, отбраковываются, образцы с кривой 2 откладываются на хранение, образцы близкие к кривой 1 загружаются в печь, подвергаются дополнительному отжигу, и спектры измеряются повторно.



Определим одним из возможных способов лингвистическую переменную  $t_{570} \equiv$  "область спектра 570 нм". Для измеряемой интенсивности света в области длин волн вблизи 570 нм формально опишем три разных значения лингвистической переменной  $t_{570}$ , характеризуемые функциями принадлежности:  $\mu_{570}^1(I) \equiv$  "ярко выраженный максимум 570 нм",  $\mu_{570}^2(I) \equiv$  "средне выраженный максимум 570 нм",  $\mu_{570}^3(I) \equiv$  "слабо выраженный максимум 570 нм". (Для простоты, опустим общепринятые индексы  $A, B$  у символов  $\mu$ .) В целом, применяемая далее процедура описания спектра в виде нечеткого правила не выходит за рамки известных методов построения функций принадлежности [11]. Чтобы задать конкретный вид этих функций, на рис. 1а можно отложить погрешности измерений и статистическую ошибку, и с помощью кривой 1 на рис. 1а задать вспомогательную кривую  $I_{570}^1(\mu)$ , см. рис. 1б. Значение  $\mu^1 = 1$  на рис. 1б целесообразно выбрать соответствующим точке максимума кривой 1 на рис. 1а, значения  $\mu^1 = 0.5$  могут быть выбраны соответствующими верхней и нижней границам ошибки в точке максимума кривой 1. Значения  $\mu^1 = 0$  можно сопоставить значениям интенсивности, выходящим за пределы ошибки. Соединив точки гладкой непрерывной кривой, получим исходный вид функций принадлежности, который в дальнейшем можно корректировать [11]. Проведя расчеты или набрав определенную статистику спектральных профилей, можно "расширить" или "сузить" зависимость  $I_{570}^1(\mu)$  на рис. 1б. Из полученной кривой можно легко получить искомую обратную ей функцию  $\mu_{570}^1(I)$ , представленную на рис. 2. Аналогично для области спектра 570 нм могут быть получены вспомогательные кривые  $I_{570}^2(\mu)$  и  $I_{570}^3(\mu)$  для лингвистических значений "средне выраженный максимум 570 нм" и "слабо выраженный максимум 570 нм". Обычно два ближайших значения лингвистической переменной задают так, чтобы значения  $\mu$  менее 0.5 лежали в областях пересечения "хвостов" двух соответствующих функций принадлежности, на рис. 1б этому соответствуют области пересечения функций  $I_{570}^1(\mu)$  и  $I_{570}^2(\mu)$ , а также  $I_{570}^2(\mu)$  и  $I_{570}^3(\mu)$ . Это связано с тем, что в рамках НЛ [11] область пересекающихся значений функций принадлежности может быть отнесена к обоим кривым. Далее можно построить кривые  $\mu_{570}^2(I)$ ,  $\mu_{570}^3(I)$ , показанные на рис. 2 и необходимые для дальнейших вычислений.

В итоге, проведя серию аналогичных процедур для различных измеряемых длин волн, задав набор лингвистических переменных вида  $t_i \equiv$  "область спектра ... нм" и ряд их значений, и, кроме того, определив лингвистическую переменную  $v \equiv$  "образец типа  $N$ " = {"хороший образец типа  $N$ "; "удовлетворительный образец типа  $N$ "; "неидентифицированный образец"}, получим формальную запись спектральной кривой

1. Ей соответствует предпосылка **Если** в нечетком правиле (2):

**Если**  $t_{400}$  есть  $\mu_{400}^1(I)$ ,  $t_{420}$  есть  $\mu_{420}^1(I)$ ...,  $t_{570}$  есть  $\mu_{570}^1(I)$ ,  $t_{580}$  есть  $\mu_{580}^1(I)$ ,

**То**  $v$  есть "хороший образец типа  $N$ ", иначе.... (2)

Здесь значение следствия **То** "хороший образец типа  $N$ " также должно быть описано некоторой функцией принадлежности, которая для простоты здесь не обсуждается.

Поскольку спектральные кривые в интервале 400 – 550 нм различаются незначительно, то для каждой из измеряемых длин волн  $i$  в диапазоне 400–550 нм мера принадлежности всех трех кривых 1, 2, 3 на рис. 1а к лингвистическому значению "хороший образец типа  $N$ " может быть описана одной и той же функцией принадлежности  $\mu_i^1$ . Это позволяет сократить общее число используемых функций принадлежности. Следует также особо подчеркнуть, что если для описания системы управления потребуется задать еще и явное описание ситуации, когда измеряемый образец не соответствует кривым 1 и 2 рис. 1, то это также можно легко сделать с помощью функций принадлежности, подобных представленным на рис. 2.

*Проблема "взрыва" числа нечетких правил для многопараметрического контроллера.* Для многопараметрических систем автор [12] показал, что полное число нечетких продукционных правил равно  $m^n$ , где  $n$  – число нечетких переменных в системе и  $m$  – количество лингвистических значений (т.е. различных функций принадлежности), соответствующих каждой лингвистической переменной. Эта теорема справедлива для систем, все нечеткие переменные которой имеют одинаковое число лингвистических значений, в иных случаях теорема позволяет сделать предельные оценки.

Если в системе имеется, например, 6 входных и выходных нечетких переменных, каждая из которых описывается 3 лингвистическими значениями и функциями принадлежности, то полное число возможных правил равно  $3^6 = 729$ . Если же число переменных достигнет, например 50, что вполне может понадобиться при распознавании сложных оптических спектров, то  $m^n = 3^{50} = 7.17 \cdot 10^{23}$ , и даже если бы обработка могла быть осуществлена со скоростью 1 нечеткое правило в 1 нс, время вычислений полного набора нечетких правил оказалось бы более  $2.2 \cdot 10^7$  лет! Таким образом, работа с полной системой нечетких правил в многопараметрической системе становится практически недостижимой, и возникает выбор: либо требуется сокращать размерность управляемой системы, либо приходится разрабатывать методику изначального отбора нечетких правил для работы с неполной системой.

В литературе [13, 14], обсуждался целый ряд способов уменьшения размерности, в том числе разбиение общей системы на конечное число подсистем меньшей размерности, отбор части входных/выходных переменных или объединение части переменных, отбор части продукционных правил из базы правил или их объединение, комбинирование вышеперечисленных методов.

В данной работе рассматривается иной вариант, связанный с целенаправленным выбором правил для заведомо неполной системы правил, основанным на особенностях предметной области. Как было показано в п. 2, типичная экспериментальная задача распознавания спектральной огибающей и ее классификации по нескольким лингвистическим значениям может быть описана в виде компактного нечетко-логического выражения (2), заданного определенным рядом значений лингвистических переменных  $t_i$ . Если, как в рассмотренном примере, имеется один информативный признак для принятия решения, а именно пик на 570 нм, описываемый набором 3 лингвистических значений, а интенсивность каждой из остальных спектральных компонент просто сравнивается с одним шаблоном функции принадлежности, то достаточно лишь одного нечеткого правила для распознавания каждого лингвистического значения и спектральной кривой. Если же для более сложных спектров проводится идентификация одновременно нескольких спектральных линий (например, обусловленных набором примесей или молекулярных групп), необходимое число нечетких правил увеличится.

Например, пусть измеряемый спектр состоит из 25 измеряемых длин волн, т.е. из  $i = 25$  лингвистических переменных вида  $t_i \equiv$  "область спектра  $i$  нм". Основные особенности спектра характеризуются в основном 5 характерными пиками, где каждый из них как и на рис. 1 классифицируется на 3 группы. Для остальных 20 длин волн достаточно задать одно лингвистическое значение, для одной выходной переменной также имеется 3 лингвистических значения. Тогда все существенные в данном случае ситуации будут описаны в 243 нечетких правилах:  $3^5 \times 1^{20} \times 3 = 243$ . Это может считаться весьма приемлемым их количеством, в то время как согласно [13] полное число возможных правил составит  $3^{26} = 2.54 \cdot 10^{12}$ . В результате проблема "взрыва" числа нечетких правил оказывается не столь критической, по крайней мере для алгоритмов распознавания спектров определенного вида, где на каждом из шагов классификации используется небольшое количество лингвистических значений. По мнению авторов, аналогичная особенность нечетко-логического описания обнаруживается для еще целого ряда типичных оптических измерений, в том числе угловых и временных зависимостей.



Поэтому помимо уже известных способов разбиения многопараметрической схемы нечетких вычислений на подсистемы меньшей размерности, можно также выделять на основе эвристических знаний "выгодные" подзадачи типа распознавания и классификации спектров, предполагающие однотипные измерения большого числа переменных. Однако, с учетом специфики режимов использования научных приборов и установок, требующих гибкого переключения режимов их работы, целесообразно подобную подзадачу вообще обособить в отдельном нечетком контроллере, для простоты приписав его к нижнему уровню иерархии управления. Для распознавания большого числа спектральных огибающих, следует организовать его пошаговую работу, где на каждом шаге используется классификация с небольшим числом лингвистических значений. При этом переход к исследованию нового вида образцов сводится к вводу в нечеткий контроллер нового набора нечетких правил "Если...То...".

*Модель нечетких взаимодействующих объектов.* Предлагаемый вариант многопараметрического контроллера позволяет реализовать способ распознавания спектральных кривых, описанный выше. Многопараметрический контроллер, обслуживающий задачу  $Z$ , состоит из небольшого числа  $q$  взаимодействующих между собой аппаратно реализуемых объектов. Каждый объект  $r$  по сути представляет самостоятельный нечеткий контроллер с усложненной структурой, реализующий подзадачу  $Z^r$ , описываемую собственным набором нечетких правил  $\{rules\}^r$  и функций принадлежности  $\{\mu\}^r$ , при этом нечеткие логические вычисления внутри объекта выполняются с помощью автономной логической схемы и устройства памяти объекта. Объекты многопараметрического контроллера считаются "равноправными" и могут работать параллельно друг с другом в асинхронном режиме. При этом обмен информацией между объектами осуществляется не бинарными синхросигналами и потоками двоичных данных, как в локальных компьютерных сетях, а на уровне функций принадлежности и лингвистических переменных, отображающих логические конструкции команд человеческого языка.

Количество объектов  $q$  зависит от конкретной задачи и выбирается на основе экспертных знаний, на рис. 3 показан случай 3-х объектов. Каждый объект имеет внешние и внутренние устройства. Внутренние датчики и внутренние исполнительные устройства предназначены для выполнения собственной подзадачи объекта  $Z^r$ . Внешние датчики и внешние сигнальные устройства используются для обмена данными между объектами многопараметрического контроллера. Для простоты на рис. 3 каждый из 3-х объектов изображен с одним внешним сигнальным устройством  $y^{out}$  (обозначенным



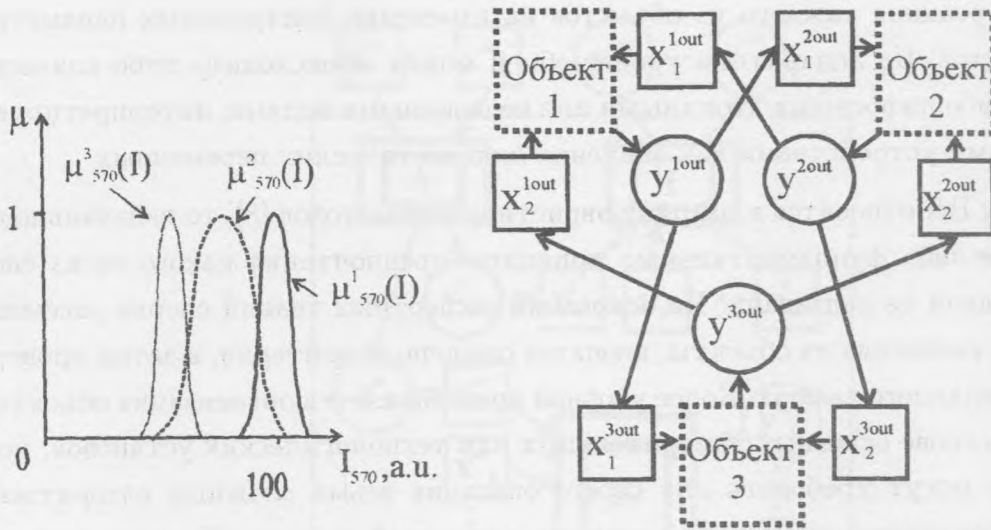


Рис. 2. Окончательный вид функций принадлежности  $\mu_{570}^1(I)$ ,  $\mu_{570}^2(I)$ ,  $\mu_{570}^3(I)$  для значений лингвистической переменной  $t_{570}$ , заданных кривыми 1, 2, 3 на рис. 1а.

Рис. 3. Схема взаимосвязи объектов многопараметрического контроллера для случая 3-х объектов. Внешние устройства объектов включают в себя внешние датчики ( $x_1^{1out}$  и  $x_2^{1out}$  для объекта 1;  $x_1^{2out}$  и  $x_2^{2out}$  для объекта 2;  $x_1^{3out}$  и  $x_2^{3out}$  для объекта 3) и внешние сигнальные устройства объектов ( $y^{1out}$  для объекта 1;  $y^{2out}$  для объекта 2;  $y^{3out}$  для объекта 3).

кружками) и двумя внешними датчиками  $x_1^{out}$ ,  $x_2^{out}$  (обозначенных квадратами). Обмен информацией между объектами осуществляется по принципу "каждый связан с каждым". Физическая удаленность оборудования в пределах объекта или между объектами не является существенным признаком. Количество внешних устройств следует выбирать минимальным, чтобы сократить число описывающих их нечетких правил. Кроме того, при поэтапной отладке системы, когда один объект практически отлажен и уже может эксплуатироваться, а остальные объекты еще не отлажены, малое число управляющих нечетких параметров существенно облегчит установку кодовых узлов, имитирующих разрешающие сигналы внешних объектов на период отладки оставшихся объектов.

Важная функция объекта контроллера заключается в том, что каждый из объектов, например объект 1, постоянно "следит" за всеми остальными объектами, принимая контрольные сигналы  $y^{2out}$  и  $y^{3out}$ , подаваемые внешними сигнальными устройствами

объектов 2 и 3. В наборе нечетких правил каждого объекта должна быть явно описана необходимая реакция каждого из объектов на изменение контрольных параметров от других объектов. На аппаратном уровне обмен может происходить либо аналоговыми сигналами, либо цифровыми двоичными или недвоичными кодами, интерпретируемыми принимающими устройствами как значения лингвистических переменных.

Поскольку НЛ относится к разряду эвристических методов [8], то изначально отсутствуют какие-либо фундаментальные принципы предпочтения какого-то из способов разбиения задачи на подзадачи. На основании экспертных знаний сперва рассматривается вариант разбиения на объекты, вводятся оценочные критерии, и затем проверяется удачность сделанного выбора. Более удобной представляется организация объектов контроллера на основе основных измерительных или технологических установок, которые сами по себе могут требовать для своего описания весьма сложных алгоритмов. Например, многопараметрический контроллер, состоящий из трех объектов, может быть составлен из спектрометра, печи для отжига образцов и управляемого манипулятора для перемещения образцов. При этом описание необходимого взаимодействия объектов между собой, записанное в наборах нечетких правил всех трех объектов, может быть составлено на основе таблиц попарных предпочтений [11], составляемых на основе экспертных знаний.

*Структура объекта контроллера.* Для реализации объекта многопараметрического контроллера, см. рис. 4, требуется использовать достаточно сложную схему, включающую как минимум три традиционных нечетких специализированных контроллера, связанных между собой. Основным элементом объекта является контроллер "исполнитель", обозначенный  $W$  на рис. 4. Он снимает показания датчиков  $x_1^w, \dots, x_m^w$ , и с помощью собственного набора нечетких правил  $\{rules\}^w$  вычисляет значения выходных переменных  $y_1^w, \dots, y_n^w$ , далее поступающих на исполнительные устройства объекта. Задачи распознавания спектров, описанные в п. 3, реализуются именно этим контроллером. Кроме контроллера-исполнителя в составе объекта следует выделить два дополнительных контроллера, специализированных, во-первых, на нечеткой обработке поступающих сигналов от других объектов, и, во-вторых, на диагностических функциях и выдаче сообщений внешним объектам. Такие функции выполняет контроллер "аналитик", и контроллер "информатор", обозначенные соответственно,  $A$  и  $I$  на рис. 4.

Контроллер-"исполнитель"  $W$  выполняет традиционные функции для схем нечеткого регулирования [7, 10]. Периодичность запуска его внутреннего цикла нечетких

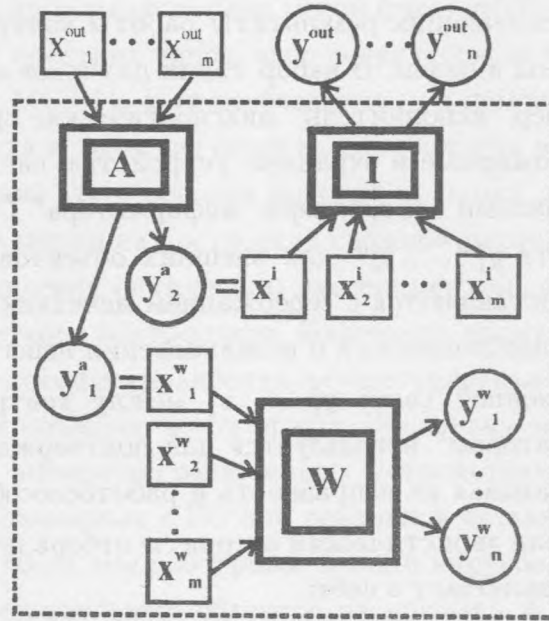


Рис. 4. Внутренняя структура объекта многопараметрического контроллера, состоящего из трех специализированных нечетких контроллеров.  $W$  – основной нечеткий контроллер-”исполнитель”.  $A$  – нечеткий контроллер-”аналитик”.  $I$  – нечеткий контроллер-”информатор”. Информация о текущем состоянии других объектов вводится в данный объект с помощью внешних датчиков  $x_1^{out}, \dots, x_m^{out}$ . Данные о состоянии объекта передаются другим объектам через внешние сигнальные устройства  $y_1^{out}, \dots, y_n^{out}$ .

вычислений предполагается постоянной, но при этом активизация тех или иных исполнительных устройств произойдет, лишь если в наборе входных переменных  $x_1^w, \dots, x_m^w$  на рис. 4 присутствует соответствующее значение нечеткой переменной  $y_1^a$ , поступающее от контроллера -”аналитика”  $A$  и разрешающее все или только определенные виды действий его исполнительных устройств, оговоренные в наборе нечетких правил  $\{rules\}^w$ . При этом текущее значение сигнального устройства  $y_1^a$  поступает на вход  $x_1^w$  контроллера-”исполнителя”  $W$  после того, как контроллер-”аналитик”  $A$  в своем очередном цикле обработает информацию от всех имеющихся объектов в системе и оценит ее как требующую запуска основного контроллера. Входными сигналами контроллера-”аналитика”  $A$  являются только датчиковые сигналы от внешних объектов  $x_1^{out}, \dots, x_m^{out}$ , его второй выходной сигнал  $y_2^a$ , также описывающий текущую ситуацию с другими объектами, подается в контроллер-”информатор”  $I$  на датчик

$x_1^i$ . Входные сигналы  $x_2^i, \dots, x_m^i$  контроллера-"информатора"  $I$  поступают от независимых датчиков, отслеживающих результаты работы контроллера-"исполнителя"  $W$  и состояние всей системы в целом. В набор таких датчиков могут быть включены как встроенные в контроллер-"исполнитель" диагностические средства, так и общие для всей системы противопожарные и охранные устройства, сигнализаторы вредных примесей. Выходными сигналами контроллера-"информатора"  $I$  являются только сигналы индикаторных устройств  $y_1^{out}, \dots, y_n^{out}$  для внешних объектов. Поступающие данные о состоянии объекта сопоставляются с содержанием нечетких правил других объектов, сигнализирующих при необходимости о возникновении нерегламентной ситуации.

Наличие информационной связи  $y_2^a = x_1^i$  между контроллером-"аналитиком" и контроллером-"информатором" используется для подтверждения приема информации от других объектов, указывая на исправность и работоспособность данного объекта.

В обсуждаемой модели эвристический алгоритм отбора нечетких правил в заведомо неполную базу правил включает в себя:

1) разбиение общей задачи  $Z$  на подзадачи  $Z^r$ , описывающие основные экспериментальные процедуры (например, измерение спектров, процедуры отжига образцов в печи, процедуры перемещения образцов между хранилищем образцов, спектрометром, печкой),

2) словесное описание признаков и значений лингвистических переменных, по достижении которых происходит запуск новых действий других объектов (например, получение определенного вида спектра кривой 1 рис. 1а приводит к перемещению образцов от спектрометра к печи),

3) формальное описание лингвистических переменных и функций принадлежности,

4) составление набора нечетких правил.

В целом, построение многопараметрического нечеткого контроллера потребует реализации достаточно сложной аппаратной схемы, однако сами по себе принципы построения нечеткого контроллера, являющегося ее основным элементом, проработаны уже достаточно хорошо [8, 10]. Существенно, что обсуждаемая структура многопараметрического контроллера сама по себе не накладывает ограничений на способ его технической реализации. Предполагается, что для обработки правил с большим числом лингвистических переменных (например, описывающих оптические спектры), могут быть применены нечеткие схемы на основе многовходовых оптоэлектронных логических вентилей MINIMUM MAXIMUM [15, 16], в которые значения лингвистических переменных  $t_i$  можно вводить параллельно. Для вспомогательных контроллеров, обеспечивающих



обмен небольшим числом нечетких переменных между объектами контроллера, вполне могут быть использованы либо выпускаемые рядом фирм небольшие нечеткие контроллеры на базе специальных нечетких чипов, либо регуляторы на базе массовых 8-битных микроконтроллеров, типа MCS-51. При необходимости с помощью специальных внешних кодирующих устройств в качестве объекта контроллера в систему можно ввести даже РС, однако обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной публикации.

*Выводы.* Предлагается методика построения сложной многоконтроллерной нечеткологической системы управления оптическим экспериментом, в основе которой лежит известная концепция нечеткого контроллера. Благодаря этому возможны постепенное наращивание и отладка системы управления, осуществляемые за счет поэтапного добавления в систему новых объектов контроллера. Поскольку знания о работе системы содержатся в нескольких аппаратно-разделенных устройствах памяти отдельных нечетких контроллеров, не связанных с РС или локальной сетью, работа такой системы является защищенной от сбоев компьютерных сетей и вирусов. Система позволяет заранее описать реакцию ее отдельных объектов на поломки и повреждения других ее объектов, что позволяет своевременно принять меры защиты ценного оборудования.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Z a d e h L. A. Inform. and Control., **8**, 338 (1965).
- [2] D e S i l v a C. W. Fuzzy Sets and Systems, **70**, 223 (1995).
- [3] M a r s h a l P., R a u l t G., C o l e w e t C., Q u e l l e c S. Fuzzy Sets and Systems, **99**, 1 (1998).
- [4] R e k l e i t i s I., D u d e k G., M i l i o s E. Annals of Math. and Art. Intelligence, **31**, 7 (2001).
- [5] Y i J., Y u b a z a k i N., H i r o t a K. Fuzzy Sets and Systems, **122**, 139 (2001).
- [6] З а д е Л. Понятие лингвистической переменной, М., Мир, 1976.
- [7] M a m d a n i E. N. Proc IEEE, **121**, 1585 (1974).
- [8] С о х Е. The Fuzzy Systems Handbook, Academic Press, Cambridge, MA, 1994.
- [9] А в е р к и н А. Н., Б а т ы р ш и н И. З., Б л и ш у н А. Ф., С и л о в В. Б., Т а р а с о в В. Б. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта, М., Наука, 1986.
- [10] K a u f m a n n A., G u p t a M. M. Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science, Amsterdam, North-Holland, 1988.

- [11] Борисов А. Н., Крумберг О. А. Принятие решений на основе нечетких моделей, Рига, Зинатне, 1990.
- [12] Jamshidi M. Large scale systems-modelling, control and fuzzy logic, Englewood, NJ., Prentice-Hall publishing Company, 1996.
- [13] Jamshidi M. Soft Computing, **1**, 42 (1997).
- [14] Gegov A. Distributed Fuzzy Control of Multivariable Systems, Dordrecht, Netherlands, Kluwer, 1996.
- [15] Averkin A. N., Bykovsky A. Yu., Melnik A. V. Proc. SPIE, **3733**, 392 (1999).
- [16] Быковский А. Ю. Заявка на патент РФ N 2001105492/09(005931), приоритет 01.03.2001, Москва.

Поступила в редакцию 17 марта 2003 г.