

О. С. Колосов, д-р техн. наук, проф., KolosovOS@mpei.ru,
Д. Н. Анисимов, канд. техн. наук, доц., **Д. В. Хрипков**, аспирант,
 Национальный исследовательский университет "МЭИ"

Формирование структуры и состава многоуровневых нечетких диагностических систем с использованием стохастической модели¹

Проводится анализ эффективности работы многоуровневых диагностических систем без ограничений на размерность (число неисправностей или патологий) и число признаков. Системы базируются на нечетком логическом выводе. Исследования проводятся с применением стохастической модели объекта. Показывается, что многоуровневые диагностические системы во многих практических случаях имеют более высокую эффективность по сравнению с диагностическими системами полной размерности. Предлагается методика формирования структуры и состава многоуровневых диагностических систем.

Ключевые слова: нечеткая логика, многоуровневая диагностическая система, методика построения, диагностическая подсистема нижнего уровня, стохастическая модель диагностируемого объекта

Введение

Появление диагностических систем (ДС) динамических объектов сложной структуры, базирующихся на "мягких вычислениях" [1–4], связано, в первую очередь, с относительно большим числом возможных развивающихся неисправностей (патологий) в этих объектах (далее по тексту будем отождествлять понятия "неисправность" и "патология"). При этом число признаков неисправностей для проведения диагностики часто оказывается ограниченным, а области значений этих признаков для разных патологий оказываются пересекающимися. К таким объектам могут быть отнесены объекты различной природы: технические, химические, биологические и т. д. Весьма распространенной ситуацией для подобных объектов является отсутствие достаточных статистических выборок значений признаков патологий для успешного применения статистических методов диагностики.

Построение ДС на базе "мягких вычислений" обычно реализуется одним из двух возможных способов. Первый ориентируется на построение ДС конкретных патологий [3, 4], а второй нацелен на выявление наиболее возможной патологии из всех возможных [5, 6]. Оба названных подхода не свободны от недостатков. В частности, для ДС, ориентированных на выявление конкретных патологий, отсутствуют подходы по сравнительному анализу эффективности таких систем при их "работе" по одним и тем же признакам, но для других патологий. Для ДС, работающих по всем имеющимся признакам и оценивающим наиболее возможную патологию из всех возможных, характерны плохо различимые диагнозы. Подобная ситуация рассматривается в работе [5] для системы диагностики патологий сетчатки глаза. Названные недостатки ДС, построенных на "мягких вычислениях", удается до некоторой степени нивелировать путем построе-

ния многоуровневых (иерархических) ДС на базе нечеткого логического вывода [6, 7], в которых первый (нижний) уровень системы образуют подсистемы, ориентированные на выявление конкретных патологий, а на верхних уровнях проводится обработка результатов диагностики подсистем нижнего уровня в целях установления наиболее значимого диагноза. Фактически многоуровневые ДС призваны аккумулировать в себе оба названных выше подхода к построению ДС, основанных на "мягких вычислениях". Вместе с тем, в работе [5] не раскрываются как механизмы формирования самих подсистем нижнего уровня, так и логические построения верхних уровней, которые призваны повысить эффективность работы всей многоуровневой ДС.

Постановка задачи

В данной работе обсуждаются вопросы структурного построения и функционального состава многоуровневых ДС, базирующихся на нечетком логическом выводе. При этом не накладываются ограничения на размерность системы (число диагностируемых патологий) и на возможное число используемых признаков для диагностики. В качестве инструмента, обеспечивающего поиск приемлемой структуры ДС и функционального построения отдельных ее уровней, используется стохастическая модель диагностируемого объекта. Модель осуществляет генерирование случайным образом значений признаков с заданными математическими ожиданиями (МО) и среднеквадратическими отклонениями (СКО) для соответствующих видов патологий объекта диагностики. В работе предлагается методика построения многоуровневых ДС в виде последовательности шагов (действий) по построению соответствующих уровней диагностики, начиная с первого. При этом в самом начале на первом шаге решается принципиальный вопрос о целесообразности построения многоуровневой (иерархической) ДС. Ключевую роль здесь играет взаимное сопоставление множеств значений признаков для соответствующих патологий.

¹ Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-01-00054а).

Структура многоуровневой ДС

Структура многоуровневой ДС показана на рис. 1.

Здесь нижний (первый) уровень образуют подсистемы диагностики (Π_j), построенные на основе нечеткого логического вывода с использованием всех возможных сочетаний формализованных признаков патологий из всех, имеющих в наличии. На втором уровне ДС подсистемы нижнего уровня группируются в блоки (C_j), предназначенные на выявление конкретной патологий. Число таких блоков на втором уровне не превышает числа диагностируемых патологий. При этом часть подсистем нижнего уровня могут оказаться малоинформативными и не используются в блоках второго уровня. На верхнем (третьем) уровне ДС проводится сравнительный анализ работы блоков второго уровня диагностики конкретного объекта в целях выработки окончательного диагноза или выстраивания степеней соответствия возможных патологий для принятия окончательного решения.

Подсистемы нижнего уровня ДС

Подсистемы базируются на нечетком логическом выводе. Текущее техническое состояние объекта оценивается совокупностью определенных значений формализованных признаков, например, температуры нагрева, амплитуды вибрации при работе и т. д. Однако числовые значения этих признаков для одной патологии могут иметь различные значения, но в определенном диапазоне. Каждый признак патологии имеет свою область значений, а взаимное распределение этих областей для одного признака может иметь виды, показанные на рис. 2.

Дуги над областями значений параметра на рис. 2 не несут никакой количественной меры, а предназначены только для более наглядного пояснения текстового материала. Вариант, показанный на рис. 2, а, где области значений признака для разных патологий не пересекаются, является тривиальным. Для диагностики такого случая достаточно определить, в какой части находится значение признака. В варианте на рис. 2, б области значений признака пересекаются незначительно, и поэтому можно проводить диагностику аналогично варианту на рис. 2, а, однако в данном случае есть некоторая вероятность ошибочного диагноза. Вариант на рис. 2, в отличается от варианта на рис. 2, б большей областью пересечения, поэтому простейшая диагностика только по одному данному признаку вызывает большое число ошибочных диагнозов. В варианте на рис. 2, г области значений признака для разных патологий совпадают, и такой признак является неинформативным для ДС. В варианте на рис. 2, д одна область перекрывает другую, и здесь можно диагностировать отсутствие патологии N_2 , если значение признака находится не в централь-

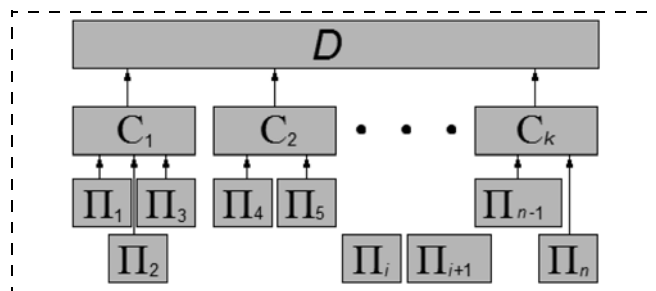


Рис. 1. Структура многоуровневой ДС

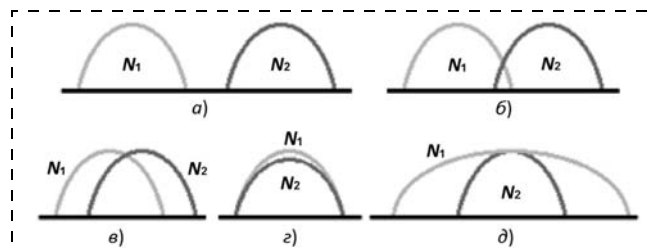


Рис. 2. Варианты взаимного распределения областей значений регистрируемого признака P_A для двух патологий N_1 и N_2

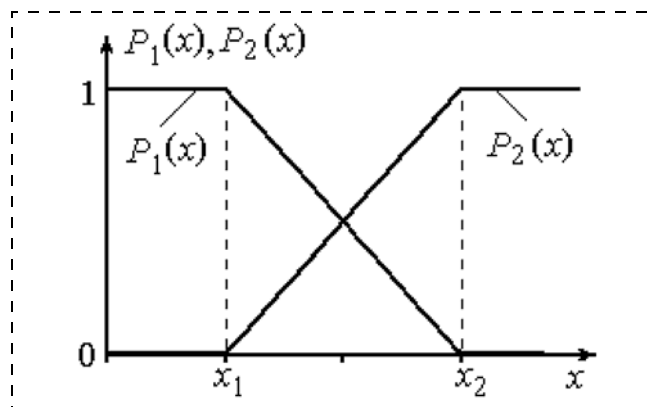


Рис. 3. Вид функции принадлежности с линейными термами

ной части. В противном случае, вариант на рис. 2, д аналогичен варианту на рис. 2, г.

Диагностика сложных динамических объектов во многих случаях связана с областями значений признаков патологий, подобными, показанным на рис. 2, в и рис. 2, д. Поскольку патологии в этих случаях нецелесообразно диагностировать простой логикой, то необходимо привлекать дополнительные признаки и использовать методы "мягких вычислений" для построения ДС. В данном случае наиболее подходящим представляется метод нечеткой логики, где оценивается степень принадлежности каждого признака к определенной патологии. Было показано [1], что наилучшие результаты дают ДС, использующие максиминный базис и линейную форму термов функций принадлежности, показанные на рис. 3. Линейная форма термов как бы подчеркивает равномерное распределение возможных значений признака патологии внутри заданного диапазона.

Линейные термы:

$$\begin{cases}
 P_1(x) = 1, x \leq x_1; \\
 P_1(x) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, x_1 < x < x_2; \\
 P_1(x) = 0, x \geq x_2; \\
 P_2(x) = 0, x \leq x_1; \\
 P_2(x) = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, x_1 < x < x_2; \\
 P_2(x) = 1, x \geq x_2.
 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь x_1 и x_2 — МО значений признака A или B соответственно для патологий N_1 и N_2 ; x — значения признаков A или B .

Максиминный метод (базис) заключается в выборе лучшего результата среди термов, привязанных к патологии. Пусть есть две патологии и два признака, и значения этих признаков распределяются одинаково, как показано на рис. 4.

Для первой патологии используются термы $P_1(A)$ и $P_1(B)$, для второй — $P_2(A)$ и $P_2(B)$. Таким образом, получаем степень принадлежности пато-

логии $P(N_1)$ и $P(N_2)$, и патология с большей степенью принадлежности считается верной.

Ранее данный метод был использован [6] при построении ДС патологий сетчатки глаза. Разрабатываемая ДС призвана диагностировать пять патологий по девяти признакам. Области значений признаков патологий сетчатки глаза показаны на рис. 5, где по оси абсцисс для каждого признака отклады-

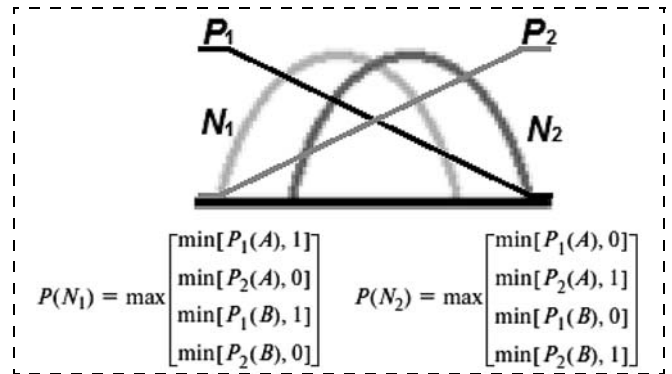


Рис. 4. Пример оценки степени принадлежности с применением максиминного базиса

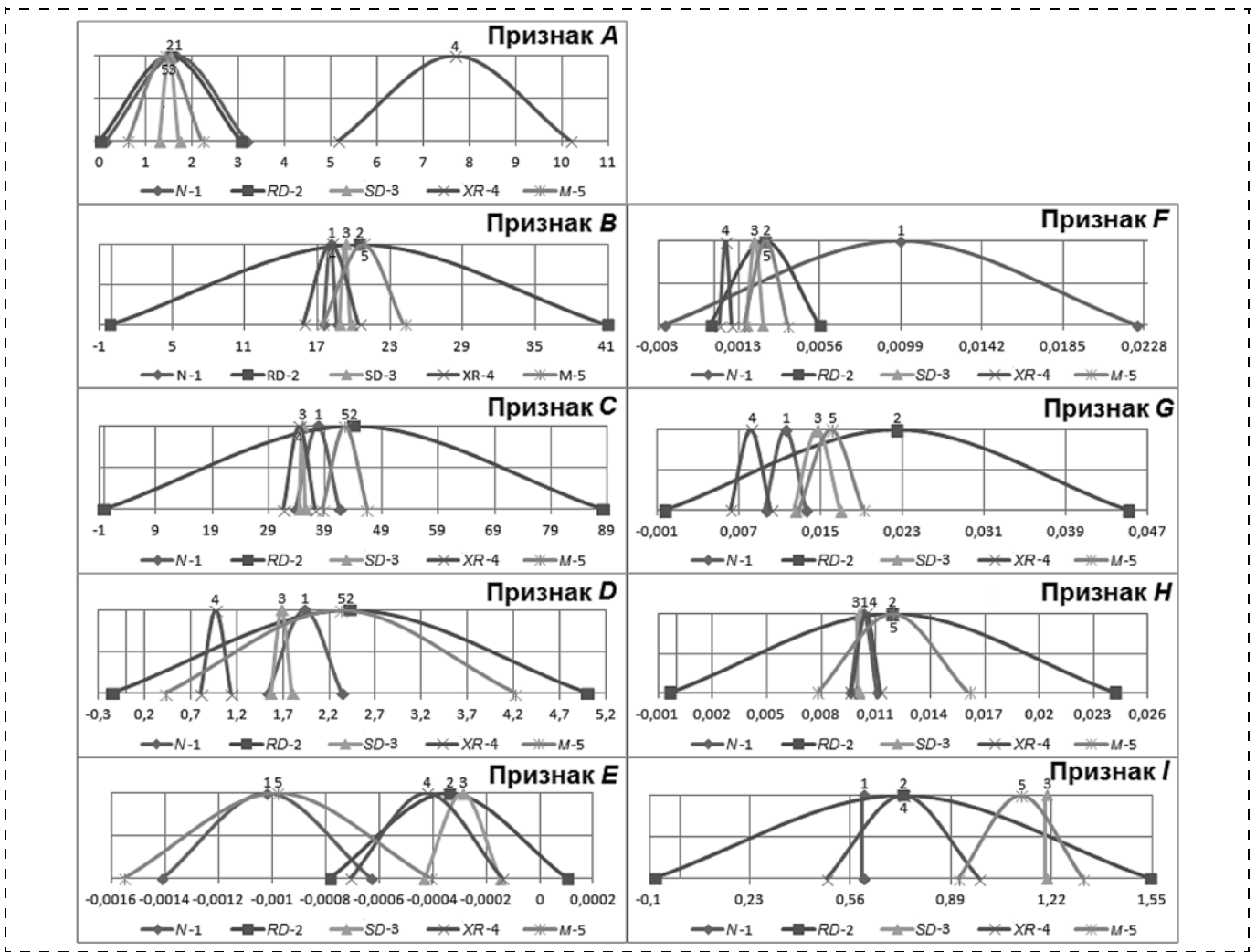


Рис. 5. Области значений признаков патологий сетчатки глаза

ваются области его значений. Оси ординат, как и в рассмотренном выше примере, служат только для обозначения наличия или отсутствия данного признака у соответствующей патологии. Для лучшей различимости области наличия признаков у соответствующих патологий обозначаются дугами, а не прямоугольниками. При этом никакого количест-

Таблица 1

Пациенты с известными диагнозами	Нечеткое множество возможных патологий				
	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>XR</i>	<i>SD</i>	<i>RD</i>
<i>N</i> _{009R}	0,38	0,45	0,34	0,98	1
<i>N</i> _{008L}	0,13	0,30	0,18	1	0,67
<i>RD</i> _{10R}	0,03	0,30	1	0,5	0,81
<i>RD</i> _{003R}	0,29	0	0	0	0
<i>SD</i> _{002L}	0,56	0,45	0,79	1	0,79
<i>SD</i> _{005L}	1	0,23	0,36	0,67	0,91
<i>XR</i> _{R003L}	0	0,45	0,27	0,77	1
<i>XR</i> _{R006L}	0	0,30	0,18	1	0,67

Таблица 2

Пациенты с известными диагнозами	Нечеткое множество возможных патологий				
	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>XR</i>	<i>SD</i>	<i>RD</i>
<i>N</i> _{009R}	1	0,54	0,26	0,55	0,44
<i>N</i> _{008L}	1	0,55	0,27	0,56	0,44
<i>RD</i> _{10R}	0,25	0,46	0,25	0,53	1
<i>RD</i> _{003R}	0,38	1	0,097	0,70	0,72
<i>SD</i> _{002L}	0,64	0,74	0,23	1	0,91
<i>SD</i> _{005L}	0,65	0,60	0,33	1	0,76
<i>XR</i> _{R003L}	0,20	0,017	1	0,23	0,36
<i>XR</i> _{R006L}	0,57	0,32	1	0,70	0,72

Таблица 3

Пациенты с известными диагнозами	Нечеткое множество возможных патологий				
	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>XR</i>	<i>SD</i>	<i>RD</i>
<i>N</i> _{008L}	$X(I=0,6)$	$I: 0,58$	$A: 0,11$	$E: 0,53$	$E: 0,53$
<i>N</i> _{009R}	$E: 0,33$	$E: 0,33$	$A: 0,14$	$I \neq 1,2$	$X(I: 0,58)$
<i>RD</i> _{003R}	$X(I=1,2)$	$I: 0,20$	$A: 0,08$	$E: 0,59$	$E: 0,59$
<i>RD</i> _{10R}	$E: 0,28$	$E: 0,28$	$A: 0,09$	$I \neq 1,2$	$X(I: 0,80)$
<i>SD</i> _{002L}	$E: 0,17$	$E: 0,17$	$A: 0,18$	$X(I=1,2)$ $H=10$	$X(H: 0,57)$
<i>SD</i> _{005L}	$E: 0,31$	$E: 0,31$	$A: 0,17$	$X(I=1,2)$ $H=10$	$X(H: 0,57)$
<i>XR</i> _{003L}	$A: 0,17$	$A: 0,17$	$X(A: 0,82)$	$A: 0,17$	$A: 0,17$
<i>XR</i> _{006L}	$A: 0,37$	$A: 0,37$	$X(A: 0,62)$	$A: 0,37$	$A: 0,37$

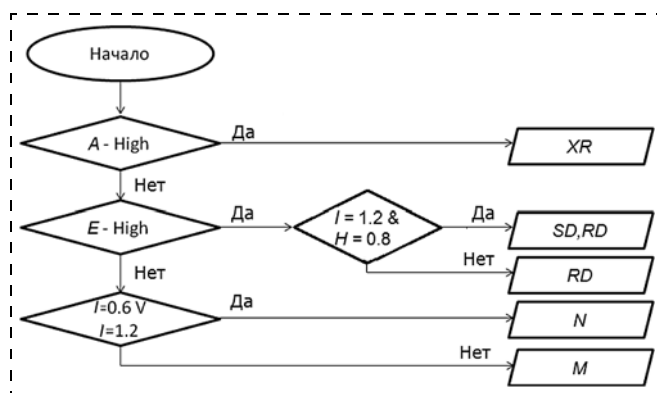


Рис. 6. Блок-схема "Метода отбора"

венного смысла ординаты этих дуг не имеют (кроме "да" или "нет"). Далее в работе эти признаки будут использованы при отработке методики построения многоуровневой ДС.

Не прибегая к расшифровке смысла каждой патологии и не раскрывая механизмов получения числовых значений признаков, отметим, что за исключением признака *A* все остальные признаки в основном подпадают под варианты, показанные на рис. 2, в, д. Признак *A* позволяет, используя простую логику, диагностировать патологию *XR*. В работе [6] было показано, что ДС с малым числом признаков нередко оказывается более эффективной, чем с большим набором признаков. В самом деле, воспользовавшись полным набором признаков, показанных на рис. 5, в данной работе была сформирована ДС на основе нечеткого логического вывода. Результаты работы такой системы показаны в табл. 1 (в таблицах 1—5 и 7 закрашены светло-серым цветом ошибочные диагнозы, а темно-серым — верные). ДС выдает массу ошибочных и плохо различимых диагнозов для конкретных пациентов (первый столбец таблицы) с известными патологиями.

Для повышения качества работы ДС в работе [6] была введена в рассмотрение трехуровневая система по схеме, показанной на рис. 1, в которой во всех подсистемах нижнего уровня использовались по три признака. Таким образом, число подсистем нижнего уровня составило 84. Результаты работы такой ДС показаны в табл. 2. Результаты стали значительно лучше, но все еще появлялись ошибочные результаты. Поэтому требуется более глубокая проработка вопросов, связанных с методикой построения многоуровневых ДС.

Метод отбора

После изучения распределения областей значений признаков для диагнозов реального объекта был составлен простой алгоритм выявления патологий, блок-схема которого показана на рис. 6. Этот алгоритм, названный "Методом отбора", по существу, не может являться альтернативой многоуровневой ДС, а применяется совместно с последней для формирования окончательного результата на верхнем уровне трехуровневой ДС.

Результаты диагностирования тех же пациентов "Методом отбора" сведены в табл. 3, где каждая ячейка указывает причину отвергания или конечного подтверждения (помечены "X") диагноза данной патологии, число после знака ":" означает коэффициент принадлежности указанного параметра, а число после знака "=" означает значение указанного параметра. Применение данного метода также дает ошибочные и плохо различимые результаты.

Формирование подсистем нижнего уровня ДС

В связи с тем, что подборка пациентов для обучения ДС весьма ограничена, для дальнейших ис-

Таблица 4

	<i>ABCI</i>	<i>ABGI</i>	<i>BCDEGHI</i>	...	<i>HI</i>	Среднее
<i>N</i>	0,40	0,40	0,17	...	0,40	0,39
<i>RD</i>	0	0	0	...	0	0
<i>SD</i>	0,57	0,57	0,57	...	0,57	0,57
<i>XR</i>	0,18	0,18	0,40	...	0,40	0,38
<i>M</i>	0,57	0,57	0,17	...	0,57	0,53

Таблица 5

	<i>ABCI</i>	<i>ABGI</i>	<i>BCDEGHI</i>	...	<i>HI</i>	Сумма
<i>N</i>				...		0
<i>RD</i>				...		0
<i>SD</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	...	<i>X</i>	20
<i>XR</i>				...		0
<i>M</i>	<i>X</i>	<i>X</i>		...	<i>X</i>	17

C1 — система для выявления *N*; блок *C2* — система для выявления *RD*; блок *C3* — система для выявления *SD*; блок *C4* — система для выявления *XR*; блок *C5* — система для выявления *M*. Ячейки подкрашены аналогично таблицам на рис. 7.

Все названные блоки образуют второй уровень ДС. В табл. 4 представлены результаты диагностики пациента *SD002L* с патологией "*SD*" блоком *C3*, призванным выявлять указанную патологию.

Необходимо отметить, что проверка данного пациента блоком *C3* на возможные другие патологии, при которых автоматически меняются функции принадлежности по соответствующим признакам, дает меньшее среднее значение степени принадлежности по сравнению с известным диагнозом *SD*. В данном случае верным диагнозом является диагноз, у которого среднее значение по всем подсистемам является наибольшим. Однако подобные блоки второго уровня при диагностировании конкретной патологии часто дают плохо различимые (близкие) результаты с другими патологиями. Для более четкого отделения плохо различимых диагнозов был также рассмотрен метод "5 %-ного коридора". Существо метода состоит в том, что если все имеющиеся средние степени соответствия диагностируемых патологий не превышают 0.95 от максимального среднего значения одной из них, то последняя принимается за истинную. В противном случае имеем плохо различимые диагнозы. В табл. 5 показывается, как метод "5 %-ного коридора" исключает плохо различимый диагноз "*M*" из рассмотрения. В данном случае все 20 подсистем блока *C3* дают диагноз "*RD*" и 17 — диагноз "*M*".

На втором уровне ДС необходимо данные диагностируемого пациента обработать всеми блоками этого уровня и передать на дальнейшую обработку на третий уровень ДС.

Алгоритмы работы ДС на третьем уровне

Этот уровень для выработки окончательного решения может содержать несколько алгоритмов

(включая и "метод отбора"), сочетание которых позволяет наилучшим образом провести диагностику. Рассмотрим такие алгоритмы.

Самым естественным является метод сравнения результатов диагностирования пациента всеми блоками второго уровня ДС. Назовем его "Методом систем 2-го уровня". Результаты такой обработки для рассматриваемого выше пациента показаны в табл. 6, где темно-серым цветом выделены не рассматриваемые результаты, а светло-серым — максимальное значение в диагонали, которое указывает на верный диагноз. Метод "5 %-ного коридора", по приведенным данным в скобках и в последнем столбце, подтверждает единственный верный диагноз. Вместе с тем, обработка других пациентов с известными диагнозами далеко не всегда дает хорошие результаты. Это иллюстрируется табл. 7, где отмечены неверные и плохо различимые результаты. Причиной такого результата может оказаться не совсем удачный подбор подсистем нижнего уровня при формировании некоторых блоков на втором уровне ДС. Если пересмотра структур блоков второго уровня не делать, то можно предложить еще три возможных алгоритма при наличии результатов обработки данных пациента блоками второго уровня в виде табл. 4. Назовем эти алгоритмы "Алгоритмами 3-го уровня".

Эти методы иллюстрируются табл. 8, в которой в отличие от табл. 6 добавлены три столбца: "минимум", "среднее", "максимум". В ячейках этих столбцов заносятся соответственно минимальное, среднее или максимальное значения из соответствующих строк табл. 6. За истинный диагноз берется диагноз той строки, где на пересечении со столбцом оказывается наибольшее из чисел этого столбца.

Таблица 6

Патология	Блоки 2-го уровня ДС					Метод 5 % коридора
	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>	
<i>N</i>	0,18 (0)	0,17 (0)	0,39 (0)	0,61 (13)	0,55 (15)	0
<i>RD</i>	0,18 (2)	0,08 (0)	0 (0)	0,18 (2)	0,09 (0)	0
<i>SD</i>	0,71 (16)	0,70 (19)	0,57 (20)	0,72 (18)	0,64 (20)	20
<i>XR</i>	0,69 (16)	0,53 (14)	0,38 (0)	0,18 (0)	0,62 (18)	0
<i>M</i>	0,63 (17)	0,17 (0)	0,53 (17)	0,61 (16)	0,31 (0)	0

Таблица 7

Пациенты с известными диагнозами	Нечеткое множество возможных патологий				
	<i>N</i>	<i>RD</i>	<i>SD</i>	<i>XR</i>	<i>M</i>
<i>N_008L</i>	0,12	0,09	0	0,10	0,40
<i>N_009R</i>	0,15	0,12	0	0,14	0,33
<i>RD_003R</i>	0,30	0,11	0,54	0,07	0,55
<i>RD_10R</i>	0,18	0,04	0	0,09	0,37
<i>SD_002L</i>	0,18	0,08	0,57	0,18	0,31
<i>SD_005L</i>	0,20	0,09	0,57	0,17	0,34
<i>XR_003L</i>	0,12	0,14	0	0,79	0,21
<i>XR_006L</i>	0,11	0,11	0	0,61	0,17

Патология	Системы 2-го уровня					Методы диагностики			
	C1	C2	C3	C4	C5	Минимум	Среднее	Максимум	Метод 5 % коридора
<i>N</i>	0,18 (0)	0,17 (0)	0,39 (0)	0,61 (13)	0,55 (15)	0,17	0,37	0,61	0
<i>RD</i>	0,18 (2)	0,08 (0)	0 (0)	0,18 (2)	0,09 (0)	0	0,10	0,18	0
<i>SD</i>	0,71 (16)	0,70 (19)	0,57 (20)	0,72 (18)	0,64 (20)	0,56	0,66	0,72	20
<i>XR</i>	0,69 (16)	0,53 (14)	0,38 (0)	0,18 (0)	0,62 (18)	0,18	0,47	0,68	0
<i>M</i>	0,63 (17)	0,17 (0)	0,53 (17)	0,61 (16)	0,31 (0)	0,17	0,44	0,62	0

Пример в табл. 8 иллюстрирует совпадение всех результатов диагностирования рассматриваемого пациента всеми алгоритмами, включая метод "5 %-ного коридора", где темно-серым цветом выделены не рассматриваемые результаты, а светло-серым — максимальное значение, которое указывает на верный диагноз.

Рассмотренный в примерах пациент может быть условно отнесен к хорошо диагностируемому. Для проверки эффективности предлагаемых алгоритмов по каждой патологии было сгенерировано по 1000 "пациентов". Итоги верных, плохо различимых (спорных) и ошибочных диагнозов в процентном соотношении сведены в табл. 9.

Как следует из результатов обработки, для диагностирования *N* лучше всего подходит метод "5 %-ного коридора", для диагностирования *RD* лучше всего себя показал "Метод отбора". При диагностировании *SD* и *XR* все методы показали 100 %-ный результат. Для выявления *M* лучше всего

Таблица 9

Патология	Методы диагностики					
	Метод отбора	Метод систем 2 ур.	Метод системы 3 ур. (мин.)	Метод системы 3 ур. (сред.)	Метод системы 3 ур. (макс.)	Метод 5 % коридора
<i>N</i>	88,8 % 0 % 11,2 %	61,7 % 1,3 % 37 %	80,5 % 0 % 19,5 %	91,1 % 1,7 % 7,2 %	90,6 % 3,9 % 5,5 %	90 % 5,7 % 4,3 %
<i>RD</i>	91,9 % 0 % 8,1 %	46,6 % 2 % 51,4 %	26,9 % 1,4 % 71,7 %	45,5 % 1,8 % 52,7 %	43,7 % 3,7 % 52,6 %	44,2 % 3,8 % 52 %
<i>SD</i>	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	98,6 % 1,4 % 0 %	100 % 0 % 0 %
<i>XR</i>	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %
<i>M</i>	71,7 % 0 % 28,3 %	53,9 % 2,1 % 44 %	54,5 % 14,5 % 31 %	58,3 % 3,4 % 38,3 %	27,9 % 10,5 % 61,6 %	68,8 % 10,2 % 21 %
Итого	90,48 % 0 % 9,52 %	72,44 % 1,08 % 26,48 %	72,38 % 3,18 % 24,44 %	79,14 % 1,38 % 19,64 %	72,16 % 3,9 % 23,94 %	80,6 % 3,94 % 15,46 %

использовать метод "5 %-ного коридора" и "Метод отбора".

Рассмотренная трехуровневая ДС ориентирована на диагностику патологий сетчатки глаза, однако ее состав и функционирование позволяют сформулировать общую методику построения подобных систем диагностики для самых разных объектов.

Помимо описанных методов разрабатывается комбинированный метод, который использует результаты описанных выше методов. В данной системе белым цветом выделены системы с числом верных диагнозов до 80 %, светло-серым — от 80 до 90 %, темно-серым — от 90 %.

Методика построения многоуровневой диагностической системы

Эта методика состоит из следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Тщательное изучение и сопоставление областей значений всех имеющихся формализованных числовых признаков патологий.

Шаг 2. С использованием признаков с непересекающимися областями значений для определенных патологий (если таковые обнаружены) уменьшение числа диагностируемых патологий за счет использования в ДС простых логических построений.

Шаг 3. Создание статистической модели патологий объекта диагностирования с использованием областей значений всех имеющихся формализованных числовых признаков патологий.

Шаг 4. Формирование и исследование эффективности подсистем диагностики нижнего уровня на основе нечеткого логического вывода со всеми возможными сочетаниями признаков с использованием статистической модели объекта диагностирования.

Шаг 4. Отбор подсистем нижнего уровня для формирования блоков второго уровня диагностической системы.

Шаг 5. С использованием на третьем уровне ДС алгоритма сопоставления результатов работы нижнего и второго уровней с применением статистической модели объекта, проверка эффективности всей диагностической системы.

Шаг 6. В случае необходимости повышение эффективности работы ДС дальнейшие действия могут идти в двух направлениях: 1) применение иных

алгоритмов или их комбинаций на третьем уровне системы; 2) изменение состава подсистем в блоках второго уровня.

Заключение

Представленные в работе результаты показывают эффективность многоуровневых диагностических систем на базе нечеткого логического вывода.

Использование статистической модели объекта диагностирования позволяет достаточно быстро проводить обучение, настройку и проверку работоспособности диагностической системы.

При построении многоуровневых диагностических систем желательно иметь как можно больше формализуемых диагностических признаков. Для этой цели хорошо использовать коэффициенты модели для динамических объектов, частотные и временные характеристики переходных процессов и т. д.

Также для повышения эффективности результатов диагностирования необходимо использовать многотермовый вид функции принадлежности, число термов которой зависит от распределения областей значений соответствующего признака.

Список литературы

1. Мелихов А. Н., Бернштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
2. Прикладные нечеткие системы / Асаи К., Ватада Д., Иваи С. Пер. с япон. / Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с.
3. Zadeh L. A. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing // Communications of the ACM. 1994. Vol. 37, N. 3. P. 77–84.
4. Аверкин А. Н., Батыршин И. З. Мягкие вычисления // Новости искусственного интеллекта. 1996. № 3. С. 161–164.
5. Ежов А., Четчин А. Нейронные сети в медицине // Открытые системы. 2007. № 4. С. 34–37.

6. Еремеев А. П., Хазиев Р. Р., Зуева М. В., Цапенко И. В. Прототип диагностической системы поддержки принятия решений на основе интеграции байесовских сетей доверия и метода Демпстера—Шефера // Программные продукты и системы. 2013. № 1. С. 11–16.

7. Eremeev A. P., Vagin V. N. Methods and tools for modeling reasoning on diagnostic systems // ICEIS 2009 — 11th International Conference on Enterprise Information Systems. Milan, 2009. P. 271–276.

8. Анисимов Д. Н., Вершинин Д. В., Колосов О. С., Хрипков А. В., Зуева М. В., Цапенко И. В. Использование подстраиваемой динамической модели сетчатки глаза в компонентном анализе для диагностики патологий методами искусственного интеллекта // Вестник МЭИ. 2008. № 5. С. 70–74.

9. Анисимов Д. Н., Вершинин Д. В., Колосов О. С., Зуева М. В., Цапенко И. В. Диагностика текущего состояния динамических объектов и систем сложной структуры методами нечеткой логики с использованием имитационных моделей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 3. С. 39–50.

10. Колосов О. С., Анисимов Д. Н., Хрипков Д. В. Исследование многоуровневых нечетких диагностических систем с использованием стохастической модели. // Мехатроника, автоматизация, управление. Т. 16. 2015. № 4. С. 254–261.

11. Анисимов Д. Н. Формализация процедуры исключения транзитивно замыкающих дуг при организации иерархической структуры на множестве нечетких ситуаций // Вестник МЭИ. 2011. № 4. С. 34–40.

12. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.

13. Анисимов Д. Н., Астахова Ю. Ю., Вершинин Д. В., Колосов О. С., Зуева М. В., Цапенко И. В. Дифференциация патологий сетчатки глаза на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 2. С. 56–61.

14. Норвич А. М., Турскен И. Б. Построение функций принадлежности // Нечеткие множества и теория возможностей. М.: Радио и связь, 1986. С. 64–71.

15. Zimmermann H. J., Zysno P. Quantifying vagueness in decision models // European Journal of Operational Research. 1985. N. 22. P. 148–158.

16. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006.

17. Pedrycz W. Fuzzy Control and Fuzzy Systems. New York: John Wiley and Sons, 1993.

18. Анисимов Д. Н. Использование нечеткой логики в системах автоматического управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 8. С. 39–42.

The Formation of Multi-Level Fuzzy Diagnosing Systems Structure Using Stochastic Models

O. S. Kolosov, KolosovOS@mpei.ru✉, D. N. Anisimov, D. V. Khripkov,

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 11250, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Kolosov Oleg S., KolosovOS@mpei.ru,
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 11250, Moscow, Russian Federation

Received on February 05, 2016

Accepted on February 17, 2016

An appearance of diagnostic systems of complex structure dynamic objects, based on "soft computing" is connected, primarily, with a relatively large number of possible developing faults (abnormalities) in these objects. The number of symptoms for diagnosis is often limited, and the field of values of these characteristics for different pathologies are intersecting. The claimed genus can include objects of different nature: technical, chemical, biological, etc. A very common situation for such objects is the lack of sufficient statistical samples of values of signs of pathology for the successful application of statistical methods for diagnosis. This work discusses the problems of structural construction and functional multi-level diagnosing systems based on fuzzy logic reasoning. While not subject to the restrictions on the dimensionality of the system (the number of diagnostically pathologies) and the possible number of signs used for diagnosis. As a tool, providing an acceptable and functional structure of the diagnosing systems and its individual levels, is used stochastic model of the diagnosed object. The model implements the generation of random values of features with preset mathematical expectation and standard deviation values for the respective

pathologies of the diagnostic object. This article paper proposes a method of constructing a multi-level diagnosing system in a sequence of steps (actions) to build appropriate levels of diagnostics. First of all it is solving the fundamental question of the expediency of constructing a multi-level (hierarchical) diagnosing system.

Keywords: fuzzy logic, multi-level diagnostic system, method of construction, the diagnostic subsystem of the lower level, a stochastic model of the diagnosed object

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project № 16-01-00054a)

For citation:

Kolosov O. S., Anisimov D. N., Khripkov D. V. The Formation of Multi-Level Fuzzy Diagnosing Systems Structure Using Stochastic Models, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 375—383.

DOI: 10.17587/mau.17.375-383

References

1. **Melihov A. N., Bernshtein L. S., Korovin S. Ya.** *Situatsionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoi logikoi* (Situation advising system with fuzzy logic), Moscow, Nauka, 1990, 272 p. (in Russian).
2. **Asai K., Vatada D., Iwai S.** *Prikladnye nechetkie sistemy* (Applied fuzzy systems), Moscow, Mir, 1993, pp. 368 (in Russian).
3. **Zadeh L. A.** Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing, *Communications of the ACM*, 1994, vol. 37, no. 3, pp. 77—84.
4. **Averkin A. N., Batyrshin I. Z.** *Myagkie vychisleniya* (News Artificial Intelligence), *Novosti Iskusstvennogo Intellekta*, 1996, no. 3, pp. 161—164 (in Russian).
5. **Yezhov A., Chechetkin A.** *Neironnye seti v medicine* (Neural networks in medicine), *Open Systems*, 2007, no. 4, pp. 34—37 (in Russian).
6. **Eremeev A. P., Khaziev R. R., Zueva M. V., Tsapenko I. V.** *Prototip diagnosticheskoi sistemy podderzki priniatiya reshenij na osnove integracii bajesovskih setej doveria I metoda Dempstera-Shefera* (A prototype of the diagnostic decision support system based on integration of trust networks and Bayesian method, Dempster-Shafer), *Software Products and Systems*, 2013, no. 1, pp. 11—16 (in Russian).
7. **Eremeev A. P., Vagin V. N.** Methods and tools for modeling reasoning on diagnostic systems, *ICEIS 2009 — 11th International Conference on Enterprise Information Systems*, Milan, 2009, pp. 271—276.
8. **Anisimov D. N., Vershinin D. V., Kolosov O. S., Khripkov A. V., Zueva M. V., Tsapenko I. V.** *Ispolzovanie podstraivaemoy dinamicheskoy modeli setchatki glaza v komponentnom analize dlja diagnostiki patologij metodami iskusstvennogo intellekta* (Using the adjustable dynamic model of the retina in the component analysis for the diagnosis of pathologies of artificial intelligence methods), *Messenger MPEI*, 2008, no. 5, pp. 70—74 (in Russian).
9. **Anisimov D. N., Vershinin D. V., Kolosov O. S., Zueva M. V., Tsapenko I. V.** *Diagnostika tekushchego sostoyaniya dinamicheskikh*

ob'ektov i sistem slozhnoi struktury metodami nechetkoi logiki s ispol'zovaniem imitatsionnykh modelei (Diagnosis of the current state of dynamic objects systems and the complex structure of fuzzy logic techniques using simulation models), *Iskusstvennyi Intellekt i Prinyatie Reshenii*, 2012, no. 3, pp. 39—50 (in Russian).

10. **Kolosov O. S., Anisimov D. N., Khripkov D. V.** *Issledovanie mnogourovnevnykh sistem s ispolzovaniem stohasticheskoi modeli* (Research multilevel fuzzy diagnostic system using stochastic models), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, vol. 16, 2015, no. 4, pp. 254—261 (in Russian).

11. **Anisimov D. N.** *Formalizatsiya protsedury isklyucheniya tranzitivno zamykayushchikh dug pri organizatsii ierarchicheskoi struktury na mnozhestve nechetkikh situatsii* (The formalization of procedures exclude transitive envelopes of arcs in the organization of the hierarchical structure on the set of fuzzy situations), *Vestnik MEI*, 2011, no. 4, pp. 34—40 (in Russian).

12. **Zadeh L. A.** *Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenii* (The concept of linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions.), Moscow, Mir, 1976, 165 p. (in Russian).

13. **Anisimov D. N., Astakhov Y. Y., Vershinin D. V., Kolosov O. S., Zueva M. V., Tsapenko I. V.** *Differenciatsiya patologij setchatki glaza na osnove nechetkoi logiki* (Differentiation of retinal pathologies, based on fuzzy logic), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 2, pp. 56—61 (in Russian).

14. **Norvich A. M., Tursken I. B.** *Postroeniye funktsii prinadlezhnosti* (Construction of membership functions), *Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostei*, Moscow, Radio i Svyaz', 1986, pp. 64—71 (in Russian).

15. **Zimmermann H. J., Zysno P.** Quantifying vagueness in decision models, *European Journal of Operational Research*, 1985, no. 22, pp. 148—158 (in Russian).

16. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P.** *Iskusstvennyi intellekt I intellektualnye sistemy upravleniya* (Artificial Intelligence and Intelligent Systems upravleniya), Moscow, Nauka, 2006 (in Russian).

17. **Pedrycz W.** *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, New York, John Wiley and Sons, 1993.

18. **Anisimov D. N.** *Ispol'zovanie nechetkoi logiki v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya* (The use of fuzzy logic in automatic control systems), *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2001, no. 8, pp. 39—42 (in Russian).

24—25 ноября 2016 г. в Санкт-Петербурге состоится 27-я конференция "Экстремальная робототехника (ЭР-2016)", и в этом году ее проведение приурочено к юбилею основателя ЦНИИ РТК и бесценного председателя программного комитета конференции — Е. И. Юревича.



Каждый год более двадцати пяти лет конференция "Экстремальная робототехника" собирает на своей площадке ведущих российских специалистов, молодых ученых в области робототехники, аспирантов, студентов крупнейших технических университетов. Вот уже несколько лет подряд конференция проходит в формате международного мероприятия, что позволяет в "открытом поединке" максимально оценить национальные составляющие мирового научно-исследовательского потенциала в области создания средств технической кибернетики и робототехники космического, воздушного, наземного и морского базирования.

В рамках конференции, как всегда, планируется рассмотреть широкий круг вопросов: от концептуальных проблем создания до практического применения уже существующих робототехнических комплексов. Тематика конференции посвящена актуальным вопросам, связанным с созданием робототехнических систем нового поколения для работы в экстремальных условиях и чрезвычайных ситуациях, включая борьбу с терроризмом, пожаротушение, решение оборонных задач, а также с задачами освоения космоса и глубин Мирового океана, медицины, атомной энергетики и опасных производств.

Работа конференции традиционно запланирована в формате пленарных и секционных заседаний, дискуссий, круглых столов, посвященных актуальным проблемам и задачам в сфере робототехнических систем и средств безопасности.

Международная конференция "ЭР-2016" открыта для всех желающих, а их организатор — ЦНИИ робототехники и технической кибернетики — всегда рад новым участникам и гостям.

Подробная информация о конференции на сайте: <http://er.rtc.ru>.