

process the cumulative multi-sensor array signal. Like in case with a biological analogy, the analysis of the gas mixture is carried out not due to its decomposition into components, as it is done in the traditional spectrometers, but due to an odor "image" recognition complex. For measuring of the resistance of each segment of the multi-sensor array chip, an electric field (potential difference) is applied. The transient response of the measuring current, as it was shown in our previous studies, depends on the kind of a gas and the concentration of its constituent components. Here we employ a chemiresistor array based on the SnO_2 :Pt thin film segmented by multiple electrodes into a chip. The authors describe the charging processes in such structures experimentally observed at the operating temperatures of about 300 °C. The longitudinal electrical field applied along the metal oxide film is distorted. This electric potential distortion depends on the gas and may serve as an "image" (or a vector signal) of the gas. We process this "image" with the use of a linear discriminant analysis. The results obtained demonstrate feasibility of this method for a selective identification of the gas of interest and development of new gas-detection instruments based on this principle.

Keywords: "electronic nose", gas sensor, multisensor microsystem, gas analysis, pattern recognition

Acknowledgements: The authors are grateful for the cooperation of groups of employees Dr. M. Sommer and Dr. M. Bruns (Karlsruhe Institute of Technology, Germany), as well as partial support for the work of the Russian Ministry of Education (contract no. 8.236.2014 / K).

For citation:

Musatov V. Yu., Kiselev I. V., Varegnikov A. S., Bolshakov A. A., Sysoev V. V. Analysis of Possible Applications in the Gas Analytical Instruments of the "Electronic Nose" Based on the Single-Chip Transient Electrical Processes in the Sensory Segments under Effect of Different Gases, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 250–254.

DOI: 10.17587/mau.16.250-254

References

1. **Gardner J. W., Bartlett P. N.** A brief history of electronic noses, *Sensors & Actuators B*, 1994, vol. 18, no. 1–3, pp. 211–221.
2. **Musatov V. Yu., Sysoev V. V.** Gazoanaliticheskie pribory vida "elektronnyy nos": primenyeniya dlya razlichnykh zadach (Gas analysis instruments "electronic nose": application examples for different tasks), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2011, no. 9, pp. 47–52 (in Russian).
3. **Shepherd G. M.** Smell images and the flavour system in the human brain, *Nature*, 2006, vol. 444, pp. 316–321.
4. **Myasnikov I. A., Sukharev V. Ya., Kupriyanov L. Yu., Zav'yalov S. A.** Poluprovodnikovye senzory v fiziko-khimicheskikh issle-

dovaniyakh (Semiconductor sensors in the physico-chemical studies), Moscow, Nauka, 1991, 327 p. (in Russian).

5. **Sysoev V. V., Kiselev I., Frietsch M., Goschnick J.** The temperature gradient effect on gas discrimination power of metal-oxide thin-film sensor microarray, *Sensors*, 2004, vol. 4, pp. 37–46.

6. **Sysoev V. V., Kucherenko N. I., Kisin V. V.** Teksturovannye plenki oksida olova dlya mikrosistem raspoznavaniya gazov (Textured film tin oxide gas detection for microsystems), *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 2004, vol. 30, iss. 18, pp. 14–20 (in Russian).

7. **Kiselev I., Sommer M.** Evolution of potential distributions during the charging of nano-structured metal oxide films in air as response to sudden voltage application, *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518., pp. 4533–4536.

8. **URL:** <http://ddbonline.ddbst.de/AntoineCalculation/AntoineCalculationCGI.exe>.

9. **Bol'shakov A. A., Karimov R. N.** Metody obrabotki mnogomernykh dannykh i vremennykh ryadov (Multidimensional data and time series processing methods), Moscow, Goryachaya liniya — Telekom, 2007, 522 p. (in Russian).

10. **Bol'shakov A. A., Karimov R. N.** Metody szhatiya informatsii (Data compression methods), Saratov, published by Saratov Polytechnic Institute, 1991. 88s. (in Russian).

Corresponding author:

V. Yu. Musatov, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation, e-mail: vmusatov@mail.ru

УДК 681.511.46

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"

Исследование многоуровневых нечетких диагностических систем с использованием стохастической модели¹

Проводится анализ эффективности работы диагностических систем малых размерностей (2...3 неисправности) при малом числе признаков (1...3). Системы базируются на нечетком логическом выводе. Исследования проводятся с применением стохастической модели объекта. Показывается, что диагностические системы полной размерности во многих случаях не обеспечивают однозначное и качественное решение задачи диагностики.

Ключевые слова: стохастическая модель, нечеткая логика, многоуровневая система

Введение

Диагностика постепенно развивающихся отклонений от штатного режима при функционировании сложных динамических объектов и систем является хорошо известной проблемой. К сложным динамическим объектам могут быть отнесены объ-

екты различной природы (в том числе технические, химические, биологические и т. д.). Сложные динамические объекты характеризуются ограниченным числом контролируемых параметров, высокой размерностью, разветвленной структурой, нелинейными характеристиками, отсутствием адекватного математического описания. Существует целый ряд принципов построения систем диагностики для таких объектов [1, 2]. Все они обладают определен-

¹ Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-01-00082а).

ными достоинствами и недостатками применительно к конкретному диагностируемому объекту и условиям его функционирования. Одним из эффективных направлений построения диагностических систем является использование "мягких вычислений" [3, 4] и, в частности, применение нечеткого логического вывода. В работе [5] на примере построения системы диагностики патологий сетчатки глаза с использованием нечеткого логического вывода показывается целесообразность построения многоуровневых диагностических систем. Особенностью сетчатки глаза как диагностируемого динамического объекта является большое число возможных патологий (для технического объекта — неисправностей), недостаточное число контролируемых признаков и большие области пересечений для разных патологий по самим признакам. Именно эти условия делают диагностическую систему, в которой используются одновременно все признаки, менее эффективной по сравнению с многоуровневой иерархической системой [6]. На нижнем уровне таких диагностических систем формируется целый ряд подсистем малой размерности для диагностики конкретных патологий (неисправностей). Вместе с тем, в работе [5] не раскрывается механизм формирования самих подсистем нижнего уровня, который призван повысить эффективность работы всей многоуровневой диагностической системы.

Постановка задачи

В данной работе проводится анализ эффективности работы диагностических систем малых размерностей (2...3 неисправности) при малом числе признаков (1...3). Системы базируются на нечетком логическом выводе. Исследования проводятся с применением стохастической модели объекта, что подразумевает генерирование случайным образом значений признаков с заданными математическими ожиданиями (МО) и значениями среднеквадратического отклонения (СКО) для соответствующих видов неисправностей (патологий). При этом исследуются различные варианты формируемых функций принадлежности (ФП), виды распределений генерируемых признаков, их МО и СКО. Использование стохастической модели объекта весьма полезно при исследованиях, так как позволяет оценивать эффективность работы системы диагностики при малых объемах обучающих выборок. Понятие "эффективность" в данной работе связывается с преобладающим значением степени соответствия правильного диагноза неисправности по сравнению со степенями соответствия неверных диагнозов.

Диагностика двух видов неисправностей по одному признаку

Рассмотрим вопросы, возникающие при построении простейшей диагностической системы с двумя видами неисправностей N_1 и N_2 и одним регистрируемым признаком A . На рис. 1 показаны воз-

можные схемы взаимного распределения областей значений регистрируемого признака P_A на числовой оси для каждой из неисправностей N_1 и N_2 . Отметим, что на этом и последующих рисунках показаны только области равномерно распределенных значений параметров для соответствующих неисправностей, а дуги над ними даны для наглядности, и никакой количественной меры они не несут.

Для диагностики в случае рис. 1, а достаточно разделить область признака P_A на две части. Если при диагностике очередного объекта признак P_A лежит в левой части, то это — неисправность N_1 , иначе — N_2 .

Для случая рис. 1, б диагностика происходит аналогично случаю рис. 1, а. Однако в малой области пересечения есть вероятность ошибочного диагноза.

В случае рис. 1, в вероятность ошибочного диагноза становится большой и простейший подход к диагностированию становится затруднительным.

В случае рис. 1, г диагностика по числовым значениям P_A данного признака A невозможна, поскольку любое значение признака одинаково подходит для обеих неисправностей.

В случае рис. 1, д есть возможность исключить неисправность N_2 , если области значений признака P_A для неисправности N_1 оказываются вне диапазона значений признака P_A для неисправности N_2 . Однако в общей зоне значений признаков этот вариант совпадает со случаями рис. 1, в и г.

Таким образом, для эффективного диагностирования в случаях рис. 1, в, г и д необходимо иметь больше информации, а именно дополнительные признаки.

При увеличении числа неисправностей N число возможных вариантов взаимных пересечений множеств значений P_A единственного признака A для этих неисправностей также растет. Так, при трех видах неисправностей, помимо описанных ранее случаев, добавляется множество значений признака для третьей неисправности, которое может также пересекать другие два или одно множество значений или не пересекать их вовсе. В ряде случаев три неисправности можно разбить на две группы, состоящие из одной и двух неисправностей, и рассматривать эти группы как систему 1×2 (1 признак и 2 неисправности) с последующим отдельным анализом группы из двух неисправностей согласно системе 1×2 . В системе растет число вариантов,

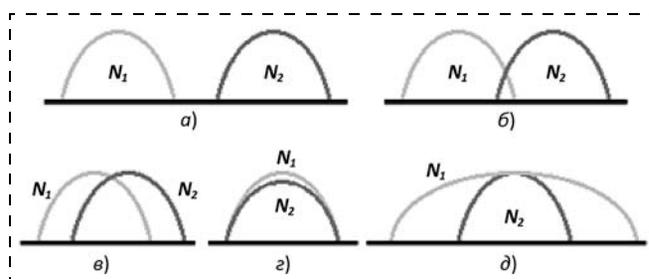


Рис. 1. Варианты взаимного распределения областей значений регистрируемого признака P_A для двух неисправностей N_1 и N_2

когда для повышения эффективности диагностики требуется больше информации в виде новых признаков P .

Для диагностики двух неисправностей дополнительные признаки требуются только в том случае, если имеющийся признак "не работает", как в случаях рис. 1, *в* и *д* (кроме варианта, когда можно исключить неисправность N_2). При добавлении второго признака необходимо исследовать оба их одновременно.

Диагностика трех видов неисправностей по двум признакам

Для подобной системы можно предложить три возможных варианта распределений множеств значений признаков по неисправностям.

Первый, тривиальный вариант, когда множества значений признаков соответствующих неисправностей взаимно не пересекаются, рассматривать не будем.

Рассмотрим второй вариант, показанный на рис. 2, когда по каждому признаку возможно с очевидностью диагностировать одну неисправность.

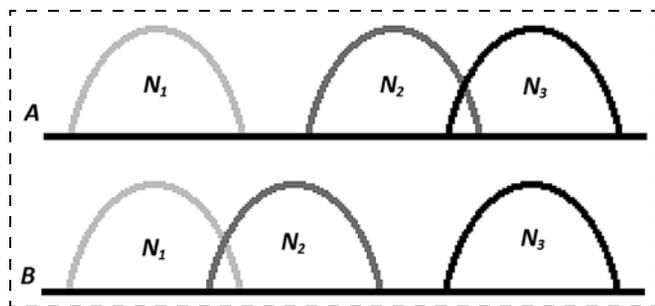


Рис. 2. Вариант распределения множества значений признаков трех неисправностей по двум признакам P_A и P_B

Таблица 1

Соответствие признаков и групп неисправностей

P_A	P_B	Неисправность
N_1	\bar{N}_3	N_1
\bar{N}_1	\bar{N}_3	N_2
\bar{N}_1	N_3	N_3

В данном случае неисправность N_1 выделяется своим очевидным множеством значений по признаку P_A . Однако другие две пересекающиеся неисправности N_2 и N_3 приводят к одному из вариантов, описанных в системе 1×2 . Поскольку рассматриваемая система имеет два признака, то достаточно рассмотреть эти две неисправности как одну группу "не- N_1 " (\bar{N}_1), а неисправность N_1 — как группу неисправностей N_1 . Аналогично разделяются неисправности и по признаку P_B на "не- N_3 " (\bar{N}_3) и N_3 . Далее анализируются значения признаков и определяется, под какие неисправности они попадают. Диагностика неисправности согласуется с табл. 1.

В более сложном, третьем случае, когда группы неисправностей разделяются одинаково для обоих признаков, однозначно можно определить или отвергнуть лишь одну неисправность. Фактически оба признака дублируют друг друга.

Под данный случай подпадают такие неисправности, множество значений признаков которых не позволяет однозначно определить ни одну из неисправностей объекта. Для того чтобы диагностировать неисправность, необходимо оценить степень ее принадлежности именно к этому виду неисправности объекта. Решить данную задачу возможно, используя аппарат нечеткой логики.

Для примера рассмотрим системы 2×2 и 2×3 . Для составления базы неисправностей (обучающей выборки) и для проверки работы метода используется стохастическая модель объекта. В данном случае была разработана процедура генерации случайных "неисправностей". "Неисправности" создаются за счет случайного отклонения от условного МО и в пределах указанного СКО, при этом используется равномерный закон распределения. Для неисправностей N_1 и N_2 в системе 2×2 выбираются две пары МО признаков (P_{1A}, P_{1B} и P_{2A}, P_{2B} соответственно). Далее подключается процедура оценивания полученных значений параметров методом нечеткой логики. При этом рассматриваются три варианта формирования видов термов функций принадлежности (рис. 3) — линейный, синусоидальный и корневой.

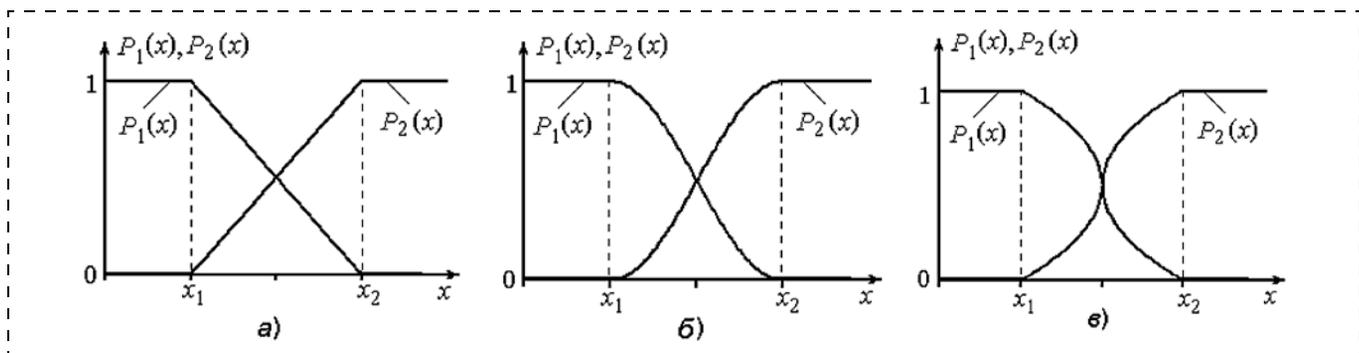


Рис. 3. Виды функций принадлежности (а — линейный, б — синусоидальный, в — корневой)

Линейные термы:

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

Синусоидальные термы:

$$\begin{cases} P_1(x) = 1, x \leq x_1; \\ P_1(x) = 0,5 + \frac{\cos\left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \pi\right)}{2}, x_1 < x < x_2; \\ P_1(x) = 0, x \geq x_2; \\ P_2(x) = 0, x \leq x_1; \\ P_2(x) = 0,5 - \frac{\cos\left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \pi\right)}{2}, x_1 < x < x_2; \\ P_2(x) = 1, x \geq x_2. \end{cases} \quad (2)$$

Корневые термы:

$$\begin{cases} P_1(x) = 1, x \leq x_1; \\ P_1(x) = 0,5 + \sqrt{\frac{2x - x_2 - x_1}{x_2 - x_1}}, x_1 < x \leq \frac{x_2 + x_1}{2}; \\ P_1(x) = 0,5 - \sqrt{\frac{2x - x_2 - x_1}{x_2 - x_1}}, \frac{x_2 + x_1}{2} < x < x_2; \\ P_1(x) = 0, x \geq x_2; \\ P_2(x) = 0, x \leq x_1; \\ P_2(x) = 0,5 - \sqrt{\frac{2x - x_2 - x_1}{x_2 - x_1}}, x_1 < x \leq \frac{x_2 + x_1}{2}; \\ P_2(x) = 0,5 + \sqrt{\frac{2x - x_2 - x_1}{x_2 - x_1}}, \frac{x_2 + x_1}{2} < x < x_2; \\ P_2(x) = 1, x \geq x_2. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь x_1 и x_2 — МО параметра A или B для неисправностей N_1 и N_2 соответственно, x — генерируемые значения параметров A или B .

Для определения того факта, к какой неисправности должен относиться данный параметр, необходимо сформировать нечеткое соответствие между множествами параметров и неисправностей [7–9]. В данном случае это соответствие будет иметь вид, представленный в табл. 2.

Для определения степени принадлежности неисправности используется максиминная композиция:

$$P(N_1) = \max \begin{bmatrix} \min[P_1(A), 1] \\ \min[P_2(A), 0] \\ \min[P_1(B), 1] \\ \min[P_2(B), 0] \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$P(N_2) = \max \begin{bmatrix} \min[P_1(A), 0] \\ \min[P_2(A), 1] \\ \min[P_1(B), 0] \\ \min[P_2(B), 1] \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Так как функции принадлежности лежат в диапазоне $[0; 1]$, то $\min[P, 0] = 0$, $\min[P, 1] = P$, и соотношения для определения степеней принадлежности (4) и (5) в данном случае принимают следующий вид:

$$P(N_1) = \max[P_1(A), P_1(B)]; \quad (6)$$

$$P(N_2) = \max[P_2(A), P_2(B)]. \quad (7)$$

Для системы 2×3 алгоритм отличается только наличием признака C , для которого выполняются те же самые вычисления. Но, помимо системы диагностики $A-B-C$, где рассматриваются все признаки в совокупности, одновременно рассмотрены системы из двух параметров, а именно $A-B$, $B-C$, $A-C$. Затем эти системы были использованы для второго уровня диагностики в двухуровневой системе $AB-BC-AC$, где рассчитывалось среднее значение степеней принадлежности по всем системам первого уровня. Во всех вариантах выбирается неисправность с максимальным значением степени принадлежности.

Для сравнения эффективности этих систем и видов ФП были исследованы 600 неисправностей. Результаты представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, эффективность двухуровневой системы $AB-BC-AC$ зависит от вида ФП, что

Таблица 2

Нечеткое соответствие между множествами параметров и неисправностей

Признак	N_1	N_2
P_{1A}	1	0
P_{2A}	0	1
P_{1B}	1	0
P_{2B}	0	1

Таблица 3

Сравнение числа ошибочных диагностик, полученных разными системами и разными видами ФП

Системы параметров	Линейный вид ФП	Синусоидальный вид ФП	Корневой вид ФП
$A-B$	26	26	26
$B-C$	30	31	30
$A-C$	24	25 + 1 неопределенный	24 + 1 неопределенный
$A-B-C$	12	12	12
$AB-BC-AC$	12	17	18

не противоречит известным положениям [10—14] о предпочтительности использования линейных форм ФП. Отметим так же, что линейная форма ФП не выдала неопределенных диагностик, т. е. не было ситуации, в которой две неисправности получили одинаковые значения степени принадлежности.

Вместе с тем, в реальных условиях ограниченность обучающей выборки не позволяет точно определить значение МО. В связи с этим целесообразно границы изменения ФП определять максимальными и минимальными значениями из множества значений признака неисправности:

$$P_1(x) = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}; \quad (8)$$

$$P_2(x) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (9)$$

где x_{\max} и x_{\min} — максимальное и минимальное значения параметра A или B .

В качестве эксперимента были сгенерированы 600 "объектов" с СКО признаков, равным 75 % относительно МО соседних признаков. В результате эксперимента число ошибочных результатов диагностирования не превысило 5 %. Данная погрешность связана с недостатком данных, большим пересечением множеств признаков неисправностей и равномерным законом распределения параметров признаков неисправностей внутри этих множеств.

Диагностика трех видов неисправностей по трем признакам

Рассмотрим систему 3×3 , показанную на рис. 4.

В данном случае таблица соответствия "неисправность — признак" может составляться для признаков A и C аналогично варианту, рассмотренному выше на рис. 2. Однако очевидно, что для признака B целесообразно увеличить число термов до трех. ФП в этом случае будет оцениваться системой

$$P_1(x) = \begin{cases} \frac{x_{\max} - 2x}{x_{\max} - x_{\min}}, & x < \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}; \\ 0, & x \geq \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}; \end{cases}$$

$$P_2(x) = \begin{cases} \frac{x_{\max} + 2x}{x_{\max} - x_{\min}}, & x < \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}; \\ 1 - \frac{2x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x \geq \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}; \end{cases}$$

$$P_3(x) = \begin{cases} 0, & x < \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}; \\ \frac{2x - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x \geq \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}. \end{cases}$$

и будет иметь вид, показанный на рис. 5.

Для данной системы таблица соответствия будет иметь вид, представленный в табл. 4.

Далее все вычисления аналогичны вычислениям для системы 3×3 . Соответственно, при росте числа неисправностей есть смысл повышать число термов у некоторых признаков. При этом желательно, чтобы каждому терму соответствовала хотя бы одна неисправность.

Рассмотренные примеры показывают возможность создания одноуровневой диагностической системы, которая позволяет удовлетворительно диагностировать одновременно все неисправности объекта с одновременным использованием всех имеющихся признаков.

Рассмотрим далее более сложные случаи, когда одноуровневые системы диагностики оказываются менее эффективными по сравнению с двухуровневыми системами.

Одним из распространенных и характерных примеров является случай, когда по одному или более признакам множество значений признаков одной неисправности перекрывает все остальные. На первый взгляд подобные признаки являются

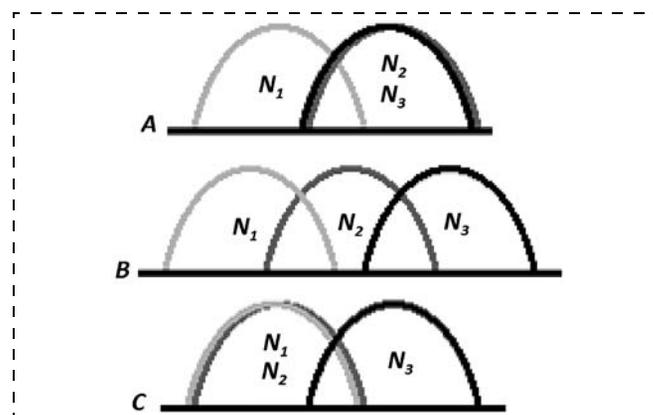


Рис. 4. Распределение множеств значений трех признаков для трех неисправностей

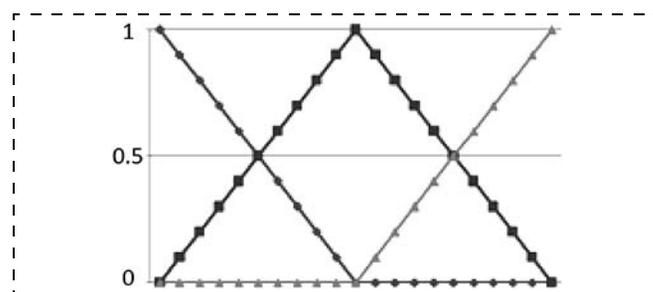


Рис. 5. Вид ФП с тремя термами

Таблица 4

Таблица соответствия системы 3×3

Признак	N_1	N_2	N_3
P_{1A}	1	1	0
P_{2A}	0	0	1
P_{1B}	1	0	0
P_{2B}	0	1	0
P_{3B}	0	0	1
P_{1C}	1	0	0
P_{2C}	0	1	1

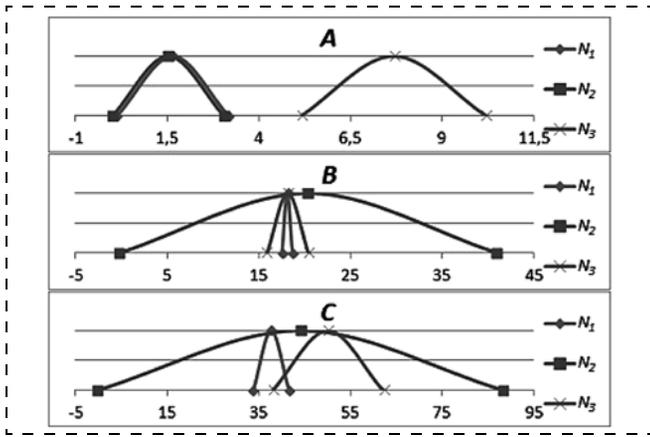


Рис. 6. Области множеств значений признаков неисправностей N_1 , N_2 , N_3 по параметрам A , B , C

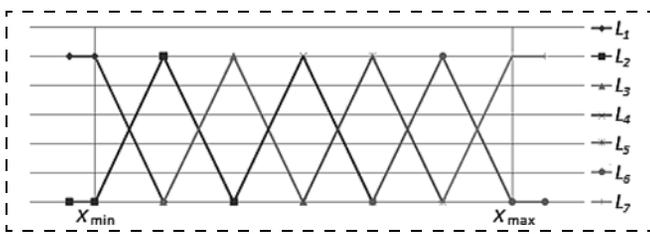


Рис. 7. Вид функции принадлежности: L_1 — L_7 — термы 1—7, x_{\min} , x_{\max} — минимальное и максимальное значения параметра соответственно

малоинформативными. Однако это далеко не так. На рис. 6 представлен пример распределения множеств значений признаков трех неисправностей. В реализации такой системы была использована программа, описанная ранее, и данные реальных объектов. При проведении исследований были сгенерированы 600 объектов в системе 3×3 согласно распределениям множеств значений признаков трех неисправностей, показанным на рис. 6.

Для повышения качества диагностирования объекта в рассматриваемом варианте целесообразно увеличивать число термов ФП в целях "усиления" значимости областей значений признаков неисправностей, которые оказываются перекрытыми одной общей неисправностью (признаки B и C на рис. 6).

Для данного случая предлагается функция принадлежности (рис. 7), которая содержит ряд одинаковых треугольных термов, охватывающих интервалы одинаковой длины от минимального значения данного параметра до максимального. Ширина одного терма определяется минимальной зоной, которую может занимать одно из множеств значений определенной неисправности по данному параметру. Такое представление ФП удобно при программировании. В данном числовом примере таких термов получилось семь.

Далее была составлена таблица соответствия из учета, какие термы пересекают распределение параметра данной неисправности (табл. 5).

Далее при генерации случайного состояния объекта вычисляется вектор принадлежности и пере-

множается с таблицей соответствия соответствующего параметра, в результате чего получается вектор соответствия "параметр—неисправность", определяющий результаты работы систем нижнего уровня. При этом не обязательно, чтобы системы нижнего уровня работали только по одному параметру. Переход в диагностировании на более высокий уровень (A — B — C) выполняется за счет вычисления средних значений по всем полученным на нижнем уровне соответствиям "параметр—неисправность" относительно каждой неисправности. При этом неисправность, получившая максимальное значение, признается истинной (в случае, если таких неисправностей несколько, признается возможность наличия обеих неисправностей, но для уточнения результата необходима дополнительная информация).

В результате такого алгоритма при генерации 600 случайных состояний все неисправности были выявлены, однако 216 выявлены неявно, т. е. помимо нее выявлена еще одна неисправность. Это обусловлено тем, что *неисправность 3* во всех трех параметрах полностью перекрывается *неисправностью 1*, поэтому если истинная неисправность — *неисправность 1*, то определяется возможность *неисправности 3*. Однако если по какому-то параметру состояние не подпадает под *неисправность 1* или *2*, то однозначно признается *неисправность 3*. *Неисправность 2* имеет ярко выраженное отличие от *неисправностей 1* и *3* в параметре A , поэтому также достоверно может быть выявлена по признаку A .

В табл. 6 приведены результаты диагностики 600 объектов четырьмя системами: три системы одноуровневые (A , B и C) и одна система двухуров-

Таблица 5

Таблицы соответствия неисправностей, параметров и функции принадлежности

Параметр	Неисправность	Термы						
		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
A	N_1	1	1	1	0	0	0	0
	N_2	0	0	0	1	1	1	1
	N_3	1	1	1	0	0	0	0
B	N_1	1	1	1	1	1	1	1
	N_2	0	0	1	1	0	0	0
	N_3	0	0	1	1	0	0	0
C	N_1	1	1	1	1	1	1	1
	N_2	0	0	1	1	0	0	0
	N_3	0	0	1	1	0	0	0

Таблица 6

Таблица результатов исследования

Система	Верно	Однозначно верно	Неверно	Однозначно неверно	Спорно
A	600	203	397	0	397
B	600	203	764	0	299
C	600	186	828	0	459
A - B - C	600	384	216	0	216

невая ($A-B-C$). Все системы распознали истинную неисправность в каждом объекте (столбец "Верно"), однако в некоторых объектах также были диагностированы и неверные неисправности (столбец "Неверно"). По результатам диагностирования с выявлением только верной неисправности (столбец "Однозначно верно") видно, что двухуровневая система является более эффективной, в отличие от одноуровневых систем. В некоторых случаях на один объект приходилось, помимо верного выявления диагноза, два неверных, в связи с этим число неверных диагнозов (столбец "Неверно") может превышать число объектов, и по этим результатам также видно, что двухуровневая система является более эффективной. Случаев, когда не была выяв-

лена верная неисправность (столбец "Однозначно неверно"), не было. Оценка результатов, когда были выявлены как верные, так и неверные неисправности (столбец "Спорно"), лишь подтверждает вышеописанные результаты.

Другим характерным примером является случай системы 3×3 , когда один параметр является неинформативным (параметр P_A , см. рис. 8, табл. 7, 8).

В данном эксперименте объекты были исследованы одноуровневыми системами A, B, C , а также двухуровневыми системами $A-B, B-C, A-C$ и $A-B-C$. Как видно из табл. 8, наилучшее распознавание неисправностей осуществили системы $C, B-C, A-B-C$ (столбец "Верно"), однако больше всего однозначно верные результаты (без иных вариантов неисправностей) выдавали системы $B-C$ и $A-B-C$. Система A не выявила ни одного однозначного результата, поскольку параметры всех трех неисправностей почти одинаково распределены на данном признаке. Этим же объясняется и тот факт, что система $A-B-C$ показала несколько хуже результат, чем система $B-C$ из-за наличия малоинформативного признака A .

Результат работы двухуровневой системы $A-B-C$ показывает, что для формирования двухуровневой диагностической системы следует использовать информативные признаки для диагностики данного вида неисправности. При этом число признаков в системе может уменьшиться, но качество диагностирования при этом улучшится.

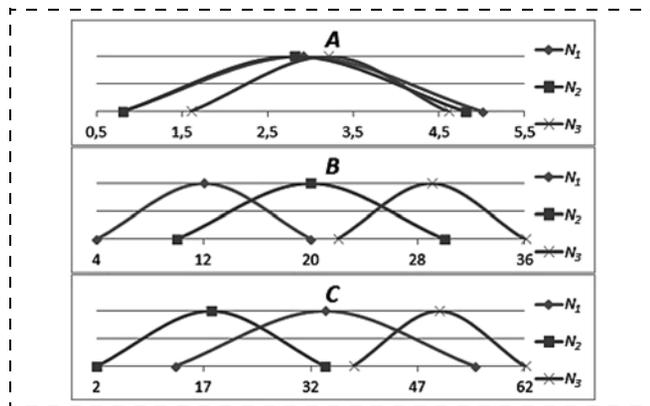


Рис. 8. Распределение множеств значений признаков неисправностей N_1, N_2, N_3 по параметрам A, B, C

Таблица 7

Таблицы соответствия неисправностей, параметров и функции принадлежности

Параметр	Неисправность	Термы						
		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
A	N_1	1	1	1	1	1	1	1
	N_2	1	1	1	1	1	1	1
	N_3	0	1	1	1	1	1	0
B	N_1	1	1	1	1	0	0	0
	N_2	0	1	1	1	1	1	0
	N_3	0	0	0	0	1	1	1
C	N_1	0	1	1	1	1	1	0
	N_2	1	1	1	1	0	0	0
	N_3	0	0	0	0	1	1	1

Таблица 8

Таблица результатов исследования

Система	Верно	Однозначно верно	Неверно	Однозначно неверно	Спорно
A	600	0	1172	0	600
B	583	137	463	17	446
C	591	183	417	9	408
$A-B$	584	127	473	16	457
$B-C$	600	429	171	0	171
$A-C$	595	169	431	5	326
$A-B-C$	600	416	184	0	184

признаков имеет смысл повышать число термов. При этом желательно, чтобы каждому терму соответствовала хотя бы одна неисправность.

Список литературы

1. Мелихов А. Н., Бернштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
2. Асаи К., Ватада Д., Иваи С. и др. Прикладные нечеткие системы: 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. V. 37, N. 3. P. 77–84.
4. Аверкин А. Н., Батыршин И. З. Мягкие вычисления // Новости искусственного интеллекта. 1996. № 3. С. 161–164.
5. 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.

6. Анисимов Д. Н. Формализация процедуры исключения транзитивно замыкающих дуг при организации иерархической структуры на множестве нечетких ситуаций // Вестник МЭИ. 2011. № 4. С. 34–40.
7. Pedrycz W. Fuzzy Control and Fuzzy Systems. New York: John Wiley and Sons, 1993.
8. Анисимов Д. Н. Использование нечеткой логики в системах автоматического управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 8. С. 39–42.
9. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
10. Норвич А. М., Турскен И. Б. Построение функций принадлежности // Нечеткие множества и теория возможностей. М.: Радио и связь, 1986. С. 64–71.
11. Zimmermann H. J., Zysno P. Quantifying vagueness in decision models // European Journal of Operational Research. 1985. N. 22. P. 148–158.
12. Анисимов Д. Н., Дроздова Е. Д., Новиков В. Н. Исследование свойств нечеткого аппроксимирующего ПД-регулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. С. 6–12.

Research of the Multilevel Fuzzy Diagnostic Systems with the Use of Stochastic Models

O. S. Kolosov, KolosovOS@mpei.ru, D. N. Anisimov, D. V. Khripkov
National Research University of MPEI, Moscow, 111250, Russian Federation

Received on October 08, 2014

The article analyzes effectiveness of the diagnostic systems of small dimensions (2–3 faults) with a small number of features (1–3). The systems are based on a fuzzy inference. Research is conducted using a stochastic model of an object, which implies generation of random characteristic values with given expectation (MO) and values of the standard deviation (SD) for the respective types of faults (pathologies). Herewith, various options are generated, membership functions, the types of distributions generated by the signs, their MO and SD are explored. A stochastic model of the object allows us to measure the performance of the diagnostic system with small volumes of training samples. It is shown that in many cases the diagnostic system of full dimension does not provide an unambiguous and quality solution to the problem of diagnostics. It is advisable to start construction of a multi-level diagnostic system using fuzzy logic with a mutual comparison of the sets of attribute values for the relevant problems in order to determine the feasibility of construction of the first, low-level diagnostics. At this level an obvious fault can be determined, or groups of faults can be selected. At the next level, using the additional features, we can diagnose specific faults in the pre-selected lower level group by the methods of fuzzy logic. In the developed system the fuzzy logic diagnostic method is most efficient when used as a part of the terms of triangular membership functions. With the increasing number of faults, and depending on the location of the sets of attribute values it makes sense to increase the number of the terms. In this case, it would be expedient to ensure that each term corresponds to at least one fault.

Keywords: stochastic models, fuzzy logic, multilevel system

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects no. 13-01-00082a.

For citation:

Kolosov O. S., Anisimov D. N., Khripkov D. V. Research of the Multilevel Fuzzy Diagnostic Systems with the Use of Stochastic Models, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 254–261.

DOI: 10.17587/mau.16.254-261

References

1. Melikhov 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., Vataada D., Ivai S. i dr. Prikladnye nechetkie sistemy (Applied fuzzy systems), Moscow, Mir, 1993. 368 p. (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. Averkina A. N., Baturshin I. Z. Myagkie vychisleniya (News Artificial Intelligence), *Novosti iskusstvennogo intellekta*, 1996, no. 3, pp. 161–164 (in Russian).
5. 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 objecting 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).

6. Anisimov D. N. Formalizatsiya protsedury isklyucheniya tranzitivno zamykayushchikh dug pri organizatsii ierarkhicheskoi 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).
7. Pedrycz W. Fuzzy Control and Fuzzy Systems, New York, John Wiley and Sons, 1993.
8. 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).
9. 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).
10. Norvich A. M., Turksen I. B. Postroenie funktsii prinadlezhnosti (Construction of membership functions), *Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostei*, Moscow, Radio i Svyaz', 1986, pp. 64–71 (in Russian).
11. Zimmermann H. J., Zysno P. Quantifying vagueness in decision models, *European Journal of Operational Research*, 1985, no. 22, pp. 148–158.
12. Anisimov D. N., Drozdova E. D., Novikov V. N. Issledovanie svoystv nechetkogo approksimiruyushchego PD-regulyatora (Investigation of the properties of the approximating fuzzy PD controller), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 9, pp. 6–12 (in Russian).

Corresponding author:

Kolosov Oleg S., Professor, Dr. Su. Tech, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 111250, Moscow, Russian Federation, e-mail: KolosovOS@mpei.ru