

УДК 004.8

ББК 22.18

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА В УСЛОВИЯХ НЕСОГЛАСОВАННЫХ МНЕНИЙ ЭКСПЕРТОВ

Сорокин А. А.¹

*(Астраханский государственный технический
университет, Астрахань)*

Рассматриваются вопросы формирования базы знаний системы нечеткого вывода в условиях несогласованности мнений экспертов. Вводится понятие спорного правила. Предлагается метод определения уровня значимости правила. Демонстрируется реализация системы нечеткого вывода, которая использует спорные правила на примере алгоритма Mamdani.

Ключевые слова: система нечеткого вывода, база знаний, продукционное правило, противоречивые высказывания экспертов, алгоритм Mamdani.

1. Введение

Как показывает анализ работ [2, 5-7, 9 14-16] Одной из сложностей формирования систем нечеткого вывода (СНВ) является обобщение экспертной информации в виде базы знаний (БЗ) при условии, что эксперты формируют правила с различными выходами при одинаковых входных значениях. Использование согласования мнения экспертов основанного на принципах метода Дельфи фактически приводит к определенному «навязыванию» мнения экспертного сообщества определенному эксперту, либо предложение группе экспертов мнения авторитетного коллеги [10]. Использование подобных принципов может негативно сказаться на объективности формируемых экс-

¹ Александр Александрович Сорокин, кандидат технических наук, доцент (alsorokin.astu@mail.ru).

пертами решений и привести к потере информации отражающей изменение развития проблемной области. С другой стороны, сформированная подобным образом БЗ фактически является статичной, что негативно сказывается на ее актуальности в процессе изменения условий внешней среды, в которой работает система управления, основанная на применении СНВ.

Цель работы: предложение метода формирования базы знаний системы нечеткого вывода в условиях несогласованности экспертных мнений.

2. Описание формирования базы знаний системы нечеткого вывода в условиях несогласованности мнений экспертов

Как описывается в работах [1-3, 8, 16] основными этапами нечеткого вывода является:

- фазификация – обработка значения входной переменной (ВхП) при помощи функции принадлежности (ФП) ВхП;
- агрегирование подусловий – обобщение результата взаимодействия ВхП при помощи продукционного правила;
- активация правила – обобщение результата взаимодействия ВхП с учетом уровня значимости правила (УЗП);
- аккумуляирование – обобщение результатов правил БЗ;
- дефазификация – представления нечеткого значения выходной переменной (ВыхП) в виде четкого числа;

В рамках работы для выполнения перечисленных операций использовался алгоритм Mamdani [8, 13, 16]. В качестве правил нечеткого вывода использовано правило вида [2, 13] :

$$r \# \pi \quad \text{if} \quad (\chi_1 = \tau_{\chi_1}^{\zeta_1}) \wedge (\chi_2 = \tau_{\chi_2}^{\zeta_2}) \wedge (\chi_\eta = \tau_{\chi_\eta}^{\zeta_\eta}) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = \tau_\theta^\Psi) \quad (1)$$

где $\chi_1, \chi_2, \chi_\eta$ – перечень ВхП, η – количество ВхП, $\tau_{\chi_1}^{\zeta_1}, \tau_{\chi_2}^{\zeta_2}, \tau_{\chi_\eta}^{\zeta_\eta}$ – значения термов из терммножеств, используемых для описания соответствующих ВхП, $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_\eta$ – номера термов в соответствующих терммножествах, ψ^{fuzz} – ВыхП в нечеткой

форме, τ_{ϑ}^{ψ} – значение терма ВыхП, ϑ – номер терма в термножестве.

Совокупность правил (1) образует БЗ вида [2, 16]:

$$БЗ = \bigcup_{\pi=1}^P \left[\bigcap_{i=1}^{\eta} (\chi_{\eta} = t_{\chi_{\eta}}^{\zeta_{\eta}}) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = \tau_{\vartheta}^{\psi}) \right] \quad (2)$$

где P – общее число правил. Правила формируются экспертами. В число относительно сложных вопросов входит определение количества правил с учетом количества переменных и термов, при помощи которых происходит описание переменных, и согласование правил, если их формирует группа экспертов. Например, если правила, предложенные различными экспертами, при одинаковом наборе значений ВхП имеют разные выходные значения.

Для дальнейшего пояснения, с использованием работ [2, 6, 8, 16] нечеткий вывод рассматривается более подробно.

Переход от четкого значения ВхП к нечеткой форме при помощи ФП $\mu_{\tau_{\chi_1}^{\zeta_1}}(x_{\eta})$ заданного терма имеет вид:

$$\chi_{\eta} = \mu_{\tau_{\chi_1}^{\zeta_1}}(x_{\eta}) \quad (3)$$

где x_{η} – четкое значение ВхП. При помощи правил вида (1) агрегируются подусловия. Если в правилах используется операция \wedge , то агрегирование описывается операцией \min [8, 13]:

$$\psi_{\pi}^{fuzz} = \min(\chi_1, \chi_1, \dots, \chi_{\eta}). \quad (4)$$

С учетом УЗП – « κ » выполняется активация правила, которая записывается в виде [8, 13]:

$$y_{\pi}^{fuzz} = \min(\psi_{\pi}^{fuzz}, \kappa_{\pi} \cdot \psi_{\pi}^{fuzz}) : \kappa_{\pi} \in (0, 1]. \quad (5)$$

Объединение значений ФП выходных переменных описывается соотношением [8, 13]:

$$\mu(y^{fuzz}) = \mu(y_1^{fuzz}) \cup \mu(y_2^{fuzz}) \cup \dots \cup \mu(y_{\pi}^{fuzz}) = \bigcup_{\pi=1}^P \mu(y_{\pi}^{fuzz}) \quad (6)$$

Получение четкого значения ВыхП из нечеткого (6) на практике может быть реализовано методом центра тяжести [8].

Для описания метода построения БЗ СНВ предлагается ввести понятие «спорное правило». Под «спорными» понимаются правила, находящиеся в БЗ и при одинаковом значении ВхП и операций над ними имеют разные выходные значения. Разницу между значениями правил предлагается определить как расстояние спора d_{π}^{cnop} . Таким образом, в БЗ могут находиться:

- правила дубликаты – правила, имеющие одинаковые левые и правые части $d_{\pi}^{cnop} = 0$;
- спорные правила – правила, которые имеют одинаковые левые, но разные правые части, $d_{\pi}^{cnop} \in (0, d_{\pi, \max}^{cnop}]$, если $d_{\pi}^{cnop} = d_{\pi, \max}^{cnop}$, то правило считается противоречивым.

Величина d_{π}^{cnop} определяется исходя из мощности термножества $T_{\Psi} = \{\tau_{\vartheta}^{\Psi}\}$ ВыхП Ψ^{fuzz} . Например, если $\chi_1, \chi_2 \Psi^{fuzz}$ описываются набором термов «низкий» NB , «средний» Z , «высокий» PB , то для правил вида:

$$\begin{aligned} r\# \pi_1 \quad \text{if} \quad (\chi_1 = NB) \wedge (\chi_2 = NB) &\Rightarrow (\Psi^{fuzz} = NB) \\ r\# \pi_2 \quad \text{if} \quad (\chi_1 = NB) \wedge (\chi_2 = NB) &\Rightarrow (\Psi^{fuzz} = Z) \\ r\# \pi_3 \quad \text{if} \quad (\chi_1 = NB) \wedge (\chi_2 = NB) &\Rightarrow (\Psi^{fuzz} = PB) \\ r\# \pi_4 \quad \text{if} \quad (\chi_1 = NB) \wedge (\chi_2 = NB) &\Rightarrow (\Psi^{fuzz} = NB) \end{aligned},$$

$d_{\pi, 1-4}^{cnop} = 0$ означает, что правила под номерами π_1 и π_4 – дубликаты, $d_{\pi, 1-2}^{cnop} = 1$ и $d_{\pi, 1-3}^{cnop} = 2$ означает, что правила под номерами π_1, π_2 и π_3 – спорные, при этом правила под номерами π_1 и π_3 – противоречивые.

В рамках метода построения БЗ СНВ предлагается сформировать три БЗ:

- экспертную БЗ (ЭБЗ) – KBE , используется для агрегирования анкет экспертов, в которых составлены правила для заданного набора значений ВхП;
- динамическую БЗ (ДБЗ) – KBD , содержит полный набор правил с учетом их УЗП $\kappa_{\pi} \in (0, 1]$, а $KBD \subset KBE$;

- рабочую БЗ (РБЗ) – KBW используется в работе СНВ, при этом $KBW \subset KBD$.

В ЭБЗ добавляются все правила полученные от экспертов. В ЭБЗ могут содержаться: правила дубликаты, спорные и противоречивые правила. Общее количество правил в ЭБЗ – Π^{KBE} определяется произведением количества экспертных анкет $n_{\text{Анкет}}^{\text{Эксп.}}$ на количество правил в анкете $n_{\text{Анкет}}^{\text{Правил}}$, при условии, что в каждой экспертной анкете одинаковое количество правил:

$$\Pi^{KBE} = n_{\text{Анкет}}^{\text{Эксп.}} \cdot n_{\text{Анкет}}^{\text{Правил}} \quad (7)$$

После формирования ЭБЗ в ней производится операция группировки правил. Условием включения правила в группу $\Gamma_{n^i}^{KBE}$, где n^i номер группы, является равенство частей, в которых находятся ВхП. Т.е. перечень ВхП и их значения должны быть одинаковыми внутри группы. Внутри группы выделяют подгруппы:

- правил дубликатов – $\Pi_{\Gamma}^{\text{дубл.}}$, для которых $d_{\pi}^{\text{спор}} = 0$, их количество внутри подгруппы обозначается как $n_{\text{подгр.}g}^{\text{дубл.}}$, где g – номер подгруппы внутри группы;
- единичные правила, которые в подгруппе встречаются только один раз, т.е. $d_{\pi}^{\text{спор}} \neq 0$ с любым другим правилом группы, их количество обозначается как $n_{\text{подгр.}}^{\text{единич.}}$.

Общее число правил в группе $\Gamma_{n^i}^{KBE}$ будет равно:

$$n_{\Gamma}^{\text{экс.}} = n_{\text{подгр.}}^{\text{единич.}} + \sum_{g=1}^{g_{\max}} n_{\text{подгр.}g}^{\text{дубл.}} \quad (8)$$

Далее происходит формирование ДБЗ, она содержит полный набор правил с учетом всех комбинаций термов входных и выходной переменной, при условии, что конструкция правила аналогична (1). В ДБЗ все правила встречаются в одном экземпляре. Начальный УЗП $\kappa_{\pi}^{\text{нач.}}$, включенных в ДБЗ равен нулю:

$$\forall \pi_{KBD} \subset KBD \quad \exists \quad \kappa_{\pi}^{\text{нач.}} = 0 \quad (9)$$

С использованием ЭБЗ после обобщения экспертных анкет и группировки правил определяются новые значения УЗП с уче-

том соотношения (8). Значение нового УЗП целесообразно называть – уровнем значимости после обучения (УЗПО) $\kappa_{\pi}^{обуч.}$. Если правило встречается в ЭБЗ в составе подгруппы некоторой группы $\Pi_{\Gamma}^{дубл.}$, то его УЗПО определяется соотношением:

$$\kappa_{\pi.дубл.}^{обуч.} = n_{подгр.г}^{дубл.} / n_{\Gamma}^{экс.}, \quad (10)$$

если правило встречается в единичном экземпляре в составе некоторой группы $\Pi_{\Gamma}^{сол.}$, то его УЗПО определяется:

$$\kappa_{\pi.единич.}^{обуч.} = 1 / n_{\Gamma}^{экс.}, \quad (11)$$

После правилам присваиваются соответствующие УЗПО. Если в ЭБЗ правило входило в состав дубликатов, то его вид в ДБЗ:

$$\begin{aligned} r \# \pi \text{ if } (\chi_1 = \tau_{\chi_1}^{\zeta_1}) \wedge (\chi_2 = \tau_{\chi_2}^{\zeta_2}) \wedge (\chi_{\eta} = \tau_{\chi_{\eta}}^{\zeta_{\eta}}) \Rightarrow \\ \Rightarrow (\psi^{fuzz} = \tau_{\vartheta}^{\Psi}), \quad \kappa_{\pi.дубл.}^{обуч.} \end{aligned} \quad (12)$$

а если правило входило в состав единичных, то примет вид:

$$\begin{aligned} r \# \pi \text{ if } (\chi_1 = \tau_{\chi_1}^{\zeta_1}) \wedge (\chi_2 = \tau_{\chi_2}^{\zeta_2}) \wedge (\chi_{\eta} = \tau_{\chi_{\eta}}^{\zeta_{\eta}}) \Rightarrow \\ \Rightarrow (\psi^{fuzz} = \tau_{\vartheta}^{\Psi}), \quad \kappa_{\pi.единич.}^{обуч.} \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом (10) – (11) для ДБЗ справедливо, что для любого правила УЗПО примет значение от 0 (правило не предложено ни одним из экспертов) до 1 (правило предложили все эксперты):

$$\forall \pi \subset KBD \exists (\kappa_{\pi.дубл.}^{обуч.} \in [0,1]) \wedge (\kappa_{\pi.единич.}^{обуч.} \in [0,1]) = 1. \quad (14)$$

С учетом (12)-(14) ДБЗ в сокращенной форме имеет вид:

$$KBD = \bigcup_{\pi=1}^P \left[\bigcap_{i=1}^{\eta} (\chi_i = \tau_{\chi_i}^{\zeta_i}) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = \tau_{\vartheta}^{\Psi}), \right. \\ \left. \kappa_{\pi} \in [0,1] \right] \quad (15)$$

где κ_{π} – уровень значимости определенного правила.

После этого из ДБЗ удаляются правила для которых $\kappa_{\pi} = 0$ (в общем случае удаляются правила у которых $\kappa_{\pi} \leq \kappa_{\pi.min}^- \approx 0$). В результате получается рабочая база знаний (РБЗ), которая используется СНВ:

$$KBW = \bigcup_{\pi=1}^{P_W} \left[\bigcap_{i=1}^{\eta} (\chi_{\eta} = t_{\chi_{\eta}}^{\zeta_{\eta}}) \Rightarrow (\Psi^{fuzz} = \tau_{\vartheta}^{\Psi}), \right. \\ \left. \kappa_{\pi} \in [\kappa_{\pi.min}^+, 1] \right] \quad (16)$$

где $\kappa_{\pi.min}^+$ – минимально допустимый УЗП, P_W – количество правил в РБЗ. Функционал, описывающий преобразования ЭБЗ в ДБЗ, а затем в РБЗ с учетом (7)-(16) можно показать в виде:

$$KBW = F_{KBW}[KBD] = F_{KBW}[F_{KBD}[KBE]] \quad (17)$$

где F_{KBW} – оператор преобразования KBD в KBW , сущность оператора – удаление правил с УЗП меньше значения $\kappa_{\pi.min}^-$, F_{KBD} – оператор преобразования KBE в KBD , сущность оператора – группировка правил полученных от экспертов, с последующим определением их УЗП $\kappa_{\pi.дубл.}^{обуч.}$ и $\kappa_{\pi.единич.}^{обуч.}$.

3. Пример использования предложенных положений

Проверка работоспособности предлагаемых положений реализована в СНВ для оценивания параметра $R_{проект}$ – рисков эксплуатации оборудования телекоммуникаций. С учетом [7] в упрощенном виде оценку риска можно представить в виде зависимости от переменных: «Оценка технических рисков» – $R_{техн.}$ и «Оценка социально-экономических рисков» – $R_{соц.эконом.}$. Функционал для получения общей оценки имеет вид:

$$R_{проект} = F_{R_{проект}}[R_{техн.}, R_{соц.эконом.}] \quad (18)$$

Для описания переменных $R_{проект}$, $R_{техн.}$, $R_{соц.эконом.}$ использованы термножества из пяти термов $\{NB, NM, Z, PM, PB\}$. Аналогично [8] значения термов: NB – «Низкий»; NM – «Скорее низкий»; Z – «Средний»; PM – «Скорее высокий»; PB – «Высокий». Экспертам предлагалось определить значение термина ВыхП и при заданной паре термов ВхП. Экспертами были специалисты в области проектирования и эксплуатации систем связи, в рамках исследования опрошено четыре эксперта. Эксперты работали при отсутствии возможности проводить взаимное со-

гласование мнений, что позволило исключить влияние мнений экспертов друг на друга, а также коллективного мнения группы на определенного эксперта. Результаты опроса обобщены в таблице 1, которая предоставляет собой ЭБЗ.

Таблица 1. Результаты опроса экспертной группы

№ правила	Значение термина $R_{техн.}$	Значение термина $R_{соц.эконом.}$	Значение термина $R_{проект}$			
			Эксп. 1	Эксп. 2	Эксп. 3	Эксп. 4
1	NB	NB	NB	NB	NB	NB
2	NB	NM	NB	NM	NM	NB
3	NB	Z	Z	Z	Z	Z
4	NB	PM	PM	PM	PM	Z
5	NB	PB	PB	PB	PB	Z
6	NM	NB	NB	NM	NB	NB
7	NM	NM	NM	NM	NM	NB
8	NM	Z	Z	Z	Z	Z
9	NM	PM	PM	PM	PM	Z
10	NM	PB	PM	PB	PB	Z
11	Z	NB	Z	Z	NB	Z
12	Z	NM	Z	Z	NM	Z
13	Z	Z	PM	Z	Z	Z
14	Z	PM	PB	PM	PM	PM
15	Z	PB	PM	PB	PB	Z
16	PM	NB	PM	PM	NB	Z
17	PM	NM	PM	PM	NM	Z
18	PM	Z	PB	PM	Z	Z
19	PM	PM	PB	PM	PM	PB
20	PM	PB	PM	PB	PB	PB
21	PB	NB	PM	PB	NB	Z
22	PB	NM	PM	PB	NM	Z
23	PB	Z	PB	PB	Z	Z
24	PB	PM	PB	PB	PM	PB
25	PB	PB	PB	PB	PB	PB

С учетом (7)-(13) составляется ДБЗ, показанная в таблице 2.

Таблица 2. Динамическая база знаний

№ пра- вила	Значение терма $R_{техн.}$	Значение терма $R_{соц.эконом.}$	Уровень значимости правила				
			NB	NM	Z	PM	PB
1	NB	NB	1	0	0	0	0
2	NB	NM	0,5	0,5	0	0	0
3	NB	Z	0	0	1	0	0
4	NB	PM	0	0	0,25	0,75	0
5	NB	PB	0	0	0,25	0	0,75
6	NM	NB	0,75	0,25	0	0	0
7	NM	NM	0,25	0,75	0	0	0
8	NM	Z	0	0	0	0	0
9	NM	PM	0	0	0,25	0,75	0
10	NM	PB	0	0	0,25	0,25	0,5
11	Z	NB	0,25	0	0,75	0	0
12	Z	NM	0	0,25	0,75	0	0
13	Z	Z	0	0	0,75	0,25	
14	Z	PM	0	0	0	0,75	0,25
15	Z	PB	0	0	0,25	0,25	0,5
16	PM	NB	0,25	0	0,25	0,5	0
17	PM	NM	0	0,25	0,25	0,5	0
18	PM	Z	0	0	0,5	0,25	0,25
19	PM	PM	0	0	0	0,5	0,5
20	PM	PB	0	0	0	0,25	0,75
21	PB	NB	0,25	0	0,25	0,25	0,25
22	PB	NM	0	0,25	0,25	0,25	0,25
23	PB	Z	0	0	0,5	0	0,5
24	PB	PM	0	0	0	0,25	0,75
25	PB	PB	0	0	0	0	1

Из ДБЗ, представленной в таблице 2 с учетом (17) формируется РБЗ, которая используется СНВ. В основе функционирования СНВ заложен алгоритм Mamdani [8, 16]. Техническая

реализация СНВ возможна при помощи модуля программного пакета MATLAB – FuzzyLogic Toolbox. В процессе прогона СНВ через диапазон испытательных оценок проводится проверка выхода на монотонность в пределах группы правил. Если монотонность нарушается, то производится корректировка РБЗ с учетом принципа восстановления пропущенных данных описанных в работе [11]. Принцип заключается в получении пропущенной переменной с учетом значений соседних переменных. Пример корректировки имеет вид:

- пусть имеется последовательность правил вида:

$$\begin{aligned} r\#\pi_{i-1} \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = Z) : \kappa_{i-1} = 0.25 \\ r\#\pi_i \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = PM) : \kappa_i = 0.25 \quad , (19) \\ r\#\pi_{i+1} \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = PB) : \kappa_{i+1} = 0.5 \end{aligned}$$

в этом случае один шаг уровня значимости передается ближайшему правилу и (19) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} r\#\pi_{i-1} \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = Z) : \kappa_{i-1} = 0 \\ r\#\pi_i \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = PM) : \kappa_i = 0.5 \quad , (20) \\ r\#\pi_{i+1} \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = PB) : \kappa_{i+1} = 0.5 \end{aligned}$$

- а если имеется последовательность правил вида:

$$\begin{aligned} r\#\pi_i \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = Z) : \kappa_{i-1} = 0.25 \\ r\#\pi_{i+1} \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = PB) : \kappa_{i+1} = 0.75 \end{aligned} \quad , (21)$$

то формируется дополнительное «промежуточное» правило и один шаг уровня значимости от правила i передается новому правилу и (21) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} r\#\pi_{i-1} \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = Z) : \kappa_{i-1} = 0 \\ r\#\pi_i \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = PM) : \kappa_i = 0.25 \quad . (22) \\ r\#\pi_{i+1} \quad & \text{if } (\chi_1 = Z) \wedge (\chi_2 = PB) \Rightarrow (\psi^{fuzz} = PB) : \kappa_{i+1} = 0.75 \end{aligned}$$

Результаты работы СНВ, обобщающей опрос четырех экспертов, с учетом проверки на монотонность и корректировки в случае необходимости приведены в таблице 3. Кроме этого в таблице 3 приводятся значения оценок, полученных от экспертов в числовой форме, далее эти оценки использованы для проверки адекватности результатов, выдаваемых СНВ.

Таблица 3. Динамическая база знаний

I	II	III	IV	V	VI
№ пра- вила	Значение терма $R_{техн.}$	Значение терма $R_{соц.эконом.}$	Выход СНВ, $x_{out}^{СНВ}$	Эксп. 1 $x_{out}^{эксп.1}$	Эксп. 2 $x_{out}^{эксп.2}$
1	10	10	9,09	10	10
2	10	30	22,8	25	30
3	10	50	51,8	50	50
4	10	70	67,3	70	70
5	10	90	68,7	90	90
6	30	10	17,8	18	30
7	30	30	28	40	33
8	30	50	52,2	55	53
9	30	70	67,4	75	73
10	30	90	69,3	90	93
11	50	10	42,2	40	50
12	50	30	47,6	55	53
13	50	50	57,6	65	56
14	50	70	75,1	80	76
15	50	90	81,7	90	96
16	70	10	57,5	45	70
17	70	30	58,3	55	73
18	70	50	62,3	65	76
19	70	70	76,9	90	79
20	70	90	85,6	95	99
21	90	10	51,4	60	90
22	90	30	57,9	70	93
23	90	50	61,1	80	96
24	90	70	80,8	90	99
25	90	90	95,8	100	100

Завершающим этапом исследования является проверка на адекватность результатов, выдаваемых СНВ с результатами, которые сформировали эксперты при аналогичной обработке численных значений входных переменных.

4. Проверка работоспособности предложенных положений

В рамках проводимых исследований для проверки на адекватность используется метод критерия Фишера. Перед использованием критерия Фишера, необходимо сделать проверку на нормальность распределения исследуемых выборок. Для этого с использованием метода спрямленных диаграмм производится построение графиков. Исходные для проверки нормальности берутся из колонки IV таблицы 3. Для обработки используются следующие соотношения [4]:

- уравнение для построения прямой вблизи которой должны находиться значения выходов СНВ с учетом величины их квантилей:

$$u(x) = (x_{out_j}^{CHB} - x_{out.cp.}^{CHB}) / \sigma_e^{CHB} \quad (23)$$

$$\text{где } x_{out.cp.}^{CHB} = \sum_{j=1}^{j_{\max}} x_{out_j}^{CHB} / j_{\max}, \quad \sigma_e^{CHB} = \sqrt{\sum_{j=1}^{j_{\max}} (x_{out_j}^{CHB} - x_{out.cp.}^{CHB})^2 / j_{\max}},$$

j – номер правила, а $j_{\max} = 25$ – количество правил в таблице 3;

- величины относительной накопленной частоты:

$$F(x_j) = \left(\left(\sum_{r=1}^{j_{\max}} n_r - 0,5 \right) / j_{\max} \right) \cdot 100\%, \quad (24)$$

где n_r – частота появления одинаковых величин в выборке

Квантили u_i^p определяются при помощи таблицы «Квантилей нормального распределения», приведенных в справочниках, например в [4]. Обобщение результатов расчета показано в таблице 4. Для наглядности данные колонок I и II и колонок III и VI таблицы 4 представлены в виде графиков, показанных на рис. 1 а. Аналогично выполнены расчеты для столбцов V и VI таблицы 3, которые обобщены в виде графиков на рис. 1 б. и 1 в. Анализ рис. 1 а. – 1 в. позволяет установить, что значения выборок лежат вблизи прямых, построенных при помощи соотношений аналогичных (23) для каждой из выборок, что говорит

об отсутствии оснований отвергать гипотезу о том, что распределение выборок подчинены нормальному закону.

Таблица 4. Результаты расчета квантилей нормального распределения величины $x_{out_i}^{CHB}$

I	II	III	IV	V	VI
Выход CHB,	Результат расчета по (23)	Упорядоченный выход CHB,	Час- тоты	Результат расчета по (24)	Квантили нор- мального рас- пределения u_i^p
9,09	-2,32575	9,09	1	2	-2,054
22,8	-1,67178	17,8	1	6	-1,55
51,8	-0,28847	22,8	1	10	-1,282
67,3	0,450881	28	1	14	-1,08
68,7	0,517662	42,2	1	18	-0,915
17,8	-1,91028	47,6	1	22	-0,772
28	-1,42374	51,4	1	26	-0,643
52,2	-0,26939	51,8	1	30	-0,524
67,4	0,455651	52,2	1	34	-0,305
69,3	0,546282	57,5	1	38	-0,305
42,2	-0,74639	57,6	1	42	-0,202
47,6	-0,48881	57,9	1	46	-0,1
57,6	-0,01181	58,3	1	50	0
75,1	0,822943	61,1	1	54	0,1
81,7	1,137764	62,3	1	58	0,202
57,5	-0,01658	67,3	1	62	0,305
58,3	0,02158	67,4	1	66	0,412
62,3	0,21238	68,7	1	70	0,228
76,9	0,908803	69,3	1	74	0,643
85,6	1,323795	75,1	1	78	0,772
51,4	-0,30755	76,9	1	82	0,915
57,9	0,002499	80,8	1	86	1,08
61,1	0,15514	81,7	1	90	1,282
80,8	1,094834	85,6	1	94	1,55
95,8	1,810337	95,8	1	98	2,054

Следующим этапом является проверка адекватности выборки, сформированной СНВ, которая использует БЗ со спорными правилами, относительно выборок численных оценок, которые проставили эксперты. Для проверки адекватности используется метод Фишера. В таблице 3 приведено значение выборок полученных в ходе работы системы нечеткого вывода (колонка IV) и численные оценки, поставленные экспертами (колонки V и VI). Для проверки использовались выборки с 24 и 22 степенями свободы, 24 степени свободы у выборки – выхода СНВ и 22 степени свободы у выборки с выходом от экспертов.

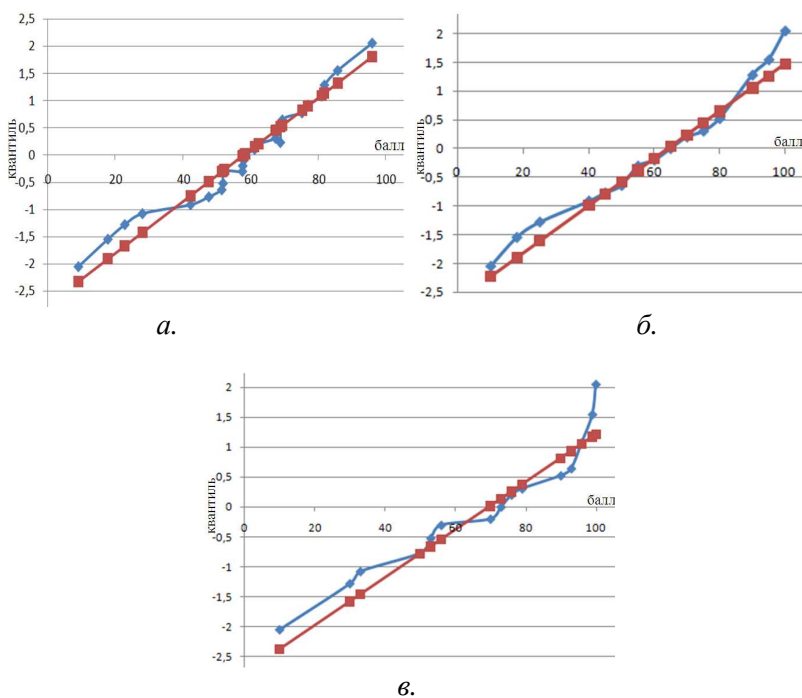


Рис. 1. Результаты проверки нормальности распределения выборок оценок выданных СНВ и экспертами

Использование критерия Фишера заключается в проверке условия: $F_{набл.} < F_{кр.}$, где $F_{набл.} = S_B / S_M$. $F_{кр.}$ берется из табли-

цы распределения Фишера – Снедекора [4, 12]. S_B и S_M – большие и меньшие исправленные выборочные дисперсии определяются выражением вида [4]:

$$S = [\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n] / (n - 1) \quad (25)$$

где x_i – значение элемента выборки, i – номер элемента в выборке, n – объем выборки. Применительно к данным таблицы 3 получаем следующие результаты:

$$S_{CHB}^{24} = [\sum x_{CHB_i}^2 - (\sum x_{CHB_i})^2 / n_1] / (n_1 - 1) = 412,48$$

$$S_{экс.1}^{22} = [\sum x_{экс.1_i}^2 - (\sum x_{экс.1_i})^2 / n_2] / (n_2 - 1) = 558$$

$$S_{экс.2}^{22} = [\sum x_{экс.2_i}^2 - (\sum x_{экс.2_i})^2 / n_3] / (n_3 - 1) = 612$$

$$\text{Соответственно, } S_M = S_{CHB}^{24}, S_{Б.1} = S_{экс.1}^{22}, S_{Б.2} = S_{экс.2}^{22}$$

Таким образом, с использованием соотношения $F_{набл.} = S_B / S_M$ [4], получены следующие результаты:

$$F_{экс.1}^{CHB} = S_{Б.1} / S_M = S_{экс.1}^{22} / S_{CHB}^{24} = 1,353$$

$$F_{экс.2}^{CHB} = S_{Б.1} / S_M = S_{экс.2}^{22} / S_{CHB}^{24} = 1,485$$

С использованием таблицы распределения Фишера – Снедекора [4, 12] определено значение $F_{кр.}$ для $k_1 = n_1 - 1 = 25 - 1 = 24$ и $k_2 = k_3 = n_2 - 1 = 23 - 1 = 22$ степеней свободы, соответственно:

$$F_{кр. \alpha=0,1}^{24 \times 22} = 1,76 \text{ при уровне значимости } \alpha = 0,1,$$

$$F_{кр. \alpha=0,05}^{24 \times 22} = 2,03 \text{ при уровне значимости } \alpha = 0,05,$$

Таким образом, для всех уровней значимости справедливы следующие утверждения:

$$(F_{экс.1}^{CHB} < F_{кр. \alpha=0,1}^{24 \times 22}) \wedge (F_{экс.2}^{CHB} < F_{кр. \alpha=0,1}^{24 \times 22}) = 1 \quad (26)$$

$$(F_{экс.1}^{CHB} < F_{кр. \alpha=0,05}^{24 \times 22}) \wedge (F_{экс.2}^{CHB} < F_{кр. \alpha=0,05}^{24 \times 22}) = 1 \quad (27)$$

Анализ (26) – (27) показывает, что выходы предложенной СНВ адекватны, мнениям, которые сформировали эксперты.

5. Заключение

В результате исследования предложен метод формирования базы знаний для систем нечеткого вывода. Метод основан на поэтапном формировании трех видов баз знаний: экспертной, динамической и рабочей. Экспертная база знаний формируется на основе обобщения информации, полученной из анкет, которые заполняли эксперты. Анкеты содержат перечень входных частей правил взаимодействия входных переменных, эксперты предлагают значения выходной части правил. Значение выбирается из элементов термножества значений выходной переменной. После формирования экспертной базы знаний полученные правила группируются. Количество правил внутри группы определяется количеством полученных анкет от экспертов и мощностью термножества выходной переменной. Внутри групп выявляются правила-дубликаты и правила встречающихся в единственном экземпляре. После определяется уровень значимости каждого из правил с учетом общего количества правил и количества правил-дубликатов внутри каждой из групп. После этого все правила остаются в единственном экземпляре, лишние дубликаты и правила с нулевым уровнем значимости удаляются. Оставшиеся правила, с учетом их уровня значимости используются для формирования рабочей базы знаний, которая обрабатывается системой нечеткого вывода. После формирования системы нечеткого вывода проводится прогон тестовых данных с целью формирования ряда выходных значений для проверки результатов на монотонность, нормальность распределения, адекватности относительно экспертных мнений.

В завершении методом спрямленных диаграмм проверена нормальность распределения выходных значений системы нечеткого вывода. Проверка показала отсутствие оснований отвергать гипотезу о нормальности распределения выходных значений. Проверка адекватности результатов системы относительно адекватности оценок, которые формируют эксперты показала, что отсутствуют основания отвергать гипотезу о близости разброса дисперсий выходных значений.

Предложенные положения позволяют формировать базу знаний для систем нечеткого вывода в условиях противоречивости высказываний экспертов при описании продукционных правил. Мониторинг изменений экспертной и динамической баз знаний позволяет выявлять тенденции изменения познания экспертов об объекте описания, что фактически обучает систему нечеткого вывода в процессе ее эксплуатации. Результаты исследований открывают возможности создания обучаемых систем поддержки при принятии решений, которые для обработки информации используют методы нечеткого вывода.

Литература

1. АМОСОВ О.С., АМОСОВА Л.Н., ИВАНОВ С.Н. *Синтез оптимальных систем управления электромеханическим теплогенерирующим комплексом с использованием нечетких систем* // Информатика и системы управления. – 2009. – № 1 (19). – С. 73-83.
2. АНТОНОВ А.Н., АРШАНСКИЙ М.М. *Нечеткая модель системы принятия решений по выбору параметров дозирования пипетирующей станции EVO FREEDOM 75* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 3. – С. 33-38.
3. БЕРЁЗА А.Н., ЕРШОВА Е.А. *Поддержка принятия решения при планировании набора абитуриентов в вузе на основе нечетких моделей* // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 7 (120). – С. 131-136.
4. ГМУРМАН В.Е. *Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике учеб. пособие*. 11-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2011. – 404 с.
5. ДОЛГОВА Т.А. *Проектирование базы знаний экспертной системы при изучении технологии полиграфического производства* // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 8. Учебно-методическая работа. – 2009. – № 8. – С. 70-72.
6. ЕГОРОВА И.Е., КОСТИКОВА А.В. *Формализация процесса экспертного оценивания при динамическом нечетком*

- моделировании социально-экономических показателей региона и их взаимосвязей* // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11 (11). – С. 2476-2480.
7. ЕХЛАКОВ Ю.П., ПЕРМЯКОВА Н.В. *Нечеткая модель оценки рисков продвижения программных продуктов* // Бизнес-информатика. – 2014. – № 3 (29). – С. 69-78.
 8. ЛЕОНЕНКОВ А.В. *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTech.* – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
 9. НУРМАТОВА Е.В., ЗУБАРЕВА И.В., СУЩЕНКО Е.В. *Менеджмент знаний в управлении современным предприятием* // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: Социально-экономические науки. – 2011. – № 33. – С. 182-189.
 10. ОРЛОВ А.И. *Организационно-экономическое моделирование: теория принятия решений: учебник.* – М.: КНОРУС, 2010. – 568 с.
 11. ПАКЛИН Н., ОРЕШКОВ В. *Бизнес-аналитика. От данных к знаниям.* – СПб.: Питер, 2010. – 704 с.
 12. Распределение Фишера (F-распределение). – URL: <https://math.semestr.ru/corel/table-fisher.php> (дата обращения: 16.02.2018)
 13. РОГОЗИН О.В., МАТВЕЕВА Е.А. *Анализ алгоритмов нечеткого вывода при решении задачи подбора программного обеспечения в сфере образования* // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2009. – № 12. – С. 110-123.
 14. ТУЗОВСКИЙ А.Ф. *Разработка систем управления знаниями на основе единой онтологической базы знаний* // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – № 2 (Т. 310). – С. 182-185.
 15. ШЕВЧЕНКО И.В. *Построение нечеткой базы знаний для поддержки принятия решений при формировании ценовой политики номерного фонда предприятия гостиничной индустрии* // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2011. – №49. – С. 221 – 227.
 16. ШТОВБА С.Д. *Проектирование нечетких систем средствами MATLAB.* – М. Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.

DEVELOPMENT OF KNOWLEDGE BASE FOR A FUZZY INFERENCE SYSTEM IN THE CONTEXT OF CONTRADICTIONARY EXPERTS OPINIONS

Alexandr Sorokin, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Cand.Sc., associate professor (alsorokin.astu@mail.ru).

Abstract: The article proposes a method of forming a knowledge base for fuzzy inference systems. The method is based on the phased formation of three knowledge bases: expert, dynamic and operational. Expert knowledge base is formed on the basis of information received from questionnaires, which were filled by experts. After the formation of the expert knowledge base, the rules within the knowledge base are grouped. Inside the groups, there are duplicate rules and rules in a single instance. Then, the level of significance of each rule is determined, taking into account the total number of rules and the number of duplicate rules within each group. After that, all the rules remain in a single copy with different levels of significance. Superfluous duplicates are deleted. So it turns out a dynamic knowledge base. Then, rules with zero significance level are deleted. The remaining rules are used to form the working knowledge base. The working knowledge base is used in the fuzzy inference system.

Keywords: fuzzy inference system, knowledge base, production rule, contradictory experts opinions , Mamdani algorithm.

Статья представлена к публикации

членом редакционной коллегии ...

Поступила в редакцию ...

Опубликована ...