МОДЕЛИ ОЦЕНКИ РИСКОВ В НЕЧЕТКОЙ СРЕДЕ НА НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВАХ ВТОРОГО ПОРЯДКА

М.И. Гвоздик, кандидат технических наук, профессор;
Ф.А. Абдулалиев, кандидат технических наук;
А.Г. Шилов.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Рассмотрены основы и специфика применения теории нечетких множеств второго порядка и поэтапное сравнение используемых методов вывода на нечетких множествах второго порядка. Представлено поэтапное описание алгоритма нечеткого вывода с адаптацией операций над нечеткими множествами в интересах процесса построения нечетких когнитивных карт.

Ключевые слова: нечеткие множества второго порядка, алгоритм нечеткого вывода, нечеткая продукционная модель, когнитивные карты

THE RISK ASSESSMENT MODEL IN FUZZY ENVIRONMENT ON FUZZY SETS OF THE SECOND ORDER

M.I. Gvozdik; F.A. Abdulaliev; A.G. Shilov.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Covers the basics and specifics of application of fuzzy set theory to second order and the phase-out comparison of currently used methods for inference on fuzzy sets of the second order. Presents a description of the fuzzy logic algorithm with the adaptation of the fuzzy set operations for the process of construction of fuzzy cognitive maps.

Keywords: fuzzy sets of the second order, algorithm of fuzzy inference, fuzzy production model, cognitive maps

Как отмечалось ранее [1], риск, определяемый в любой сфере деятельности, является сложным многомерным, многопараметрическим понятием, включающим множество взаимосвязанных переменных, содержащих, в том числе, различные виды неопределенностей [2]. Оценка риска в нечеткой среде требует создания математического аппарата и формализмов, позволяющих интегрировать в модели риска НЕ-факторы. В указанной работе [1] проведен анализ особенностей построения моделей оценки рисков с использованием вывода на нечетких множествах (НМ) первого порядка.

Анализ методов вывода на НМ первого порядка показывает, что они не всегда обеспечивают получение удовлетворительных решений ввиду недостаточно обоснованного выбора параметров моделирования, а поиск эффективных решений сопровождается необходимостью выполнения многократных реализаций используемых моделей с целью выбора оптимальных параметров.

В свою очередь, НМ первого порядка не всегда позволяют описать имеющуюся вероятностную, интервальную, временную неопределенности.

Средством решения указанных проблем могут выступить нечеткие множества второго порядка и построенный на них логический вывод, которые подробно рассмотрены ниже.

НМ второго порядка

НМ второго порядка являются обобщением НМ первого порядка и разрабатывались для приближения нечетких моделей к словесной (лингвистической). В первую очередь это касается оценок в лингвистической форме: больше, меньше, немного выше, почти одинаковы и т.д. [3]. Анализ функции принадлежности (ФП) НМ первого порядка показывает, что эта функция фактически не содержит никакой неопределенности и не соответствует слову «нечеткий», то есть – «содержащий много неопределенности». Для фактического описания нечеткости предложено использование более сложного вида НМ, – «НМ второго порядка», в которых степень принадлежности – это НМ первого типа.

На начальном этапе описание НМ второго порядка осуществлялось с помощью нижней и верхней ФП. Интервал между этими двумя функциями представляет собой отпечаток неопределенности (footprint of uncertainly, FOU), который и является главной характеристикойНМ второго порядка [4].

Аналогично определяются нечеткие множества n-го порядка. Если неопределенность имеет сравнительно низкий уровень, то НМ n-го порядка можно свести к НМ n-1-го порядка.

В табл. 1 сведен перечень основных понятий НМ второго порядка (НМ-2).

Таблица 1. **Перечень основных понятий НМ-2**

Термин	Термин в англ. написании	Описание
Первичная переменная	Primary variable – $x \in X$	Главная переменная, задающая значения критерия
Значение первичной ФП	Primary membership – J_x	Каждому значению первичной переменной соответствует интервал значений ФП
Вторичная переменная	Secondary variable – $u \in J_x$	Элемент первичной ФП
Вторичная степень принадлежности	Secondary grade – $f_x(u)$	Вес, назначенный вторичной переменной
Второй тип НМ	Type-2 FS – $\tilde{A}$	Трехэлементная ФП, описывающаяся первичной и вторичной переменными, а также их значением принадлежности
Вторичная ФП по *x*	Secondary MF at *x*	НМ-1, характеризующее вертикальный срез по *x*
Отпечаток (след) неопределенности	Footprint of Uncertainty of $\tilde{A}$ - $FOU(\tilde{A})$	Объединение всех вложенных ФП, область между $LMF(\tilde{A})$ и $UMF(\tilde{A})$
Нижняя ФП НМ А	Lower MF of A – $LMF(\tilde{A})$ or $\underline{\mu_{\tilde{A}}}(x)$	Нижняя граница отпечатка неопределенности
Верхняя ФП НМ А	Upper MF of A – $UMF(\tilde{A})$ or $\overline{\mu_{\tilde{A}}}(x)$	Верхняя граница отпечатка неопределенности
Интервал НМ-2	Interval T2 FS	Вторичная ФП, имеющая значение 1 в рамках всего отпечатка неопределенности
Вложенная ФП-1	Embedded Tl FS – $A_e(x)$	Любая ФП-1, заключенная в $\tilde{A}$
Вложенная ФП-2	Embedded T2 FS – $\tilde{A}_e(x)$	Вложенная ФП-1, имеющая различные значения степени принадлежности
Первичная ФП	Primary MF	Учитывается ФП-1, по крайней мере, с одним параметром, который имеет диапазон значений

Исходя из общего вида НМ-1, представленного в следующем виде:

$$\tilde{A} = (B, f), \text{где } f \to B : X; f \in [0,1], X = \emptyset$$,

где B – базис; X – универсальное множество; f – отображение базиса на универсальное множество, можно вывести формулу для определения НМ n-порядка:

$$\widetilde{A_n} = \{f(x) | \forall x \in B, f(x) = \widetilde{A_{n-1}}\},$$

из которого получаем определение НМ-2:

$$\widetilde{A_2} = \{f(x) | \forall x \in B, f(x) = f, f \to B: X, f(x) \in X; \ f(x) \times [0,1] \to [0,1]\},$$

при этом

$$\mu = B \times [0,1] \to [0,1].$$

Уже в последующей работе [5] Мендель и Джохан предложили более удобное для практического применения определение, которое имеет следующий вид:

$$A = \{((x,u), \mu_A(x,u)) | \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1],$$

где X – универсальное множество; а $\mu_A(x,u)$ – множество ФП $\mu_A(x)$, характеризующих степень принадлежности элементов x и u (третье измерение, характеризующее вторичную ФП) множеству A.

ФП общего НМ-2 представлена в трехмерной модели (рис. 1), где третьим измерением ФП в каждой точке двухмерной области является так называемый след или отпечаток неопределенности (FOU).

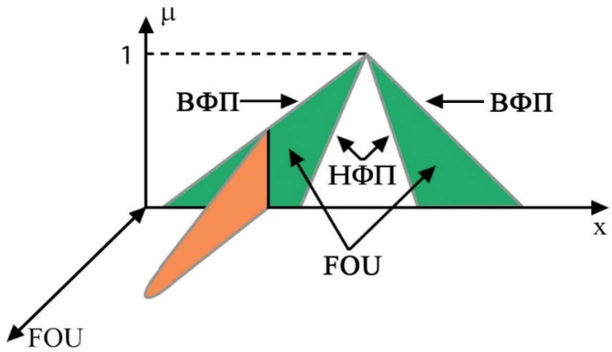


Рис. 1. **След неопределенности НМ-2**

След неопределенности – это размывание ФП первого порядка, который полностью описывается двумя ее ограничивающими функциями (рис. 1): нижняя ФП (НФП или англ. UMF) и верхней ФП (ВФП или англ. LMF), каждая из которых представляет собой НМ первого порядка [6].

Следовательно, можно использовать нечеткую математику, характерную для первого порядка при работе с НМ-2, с особенностями которой можно ознакомиться в статье Менделя и Карника [7].

Формализация НМ второго порядка

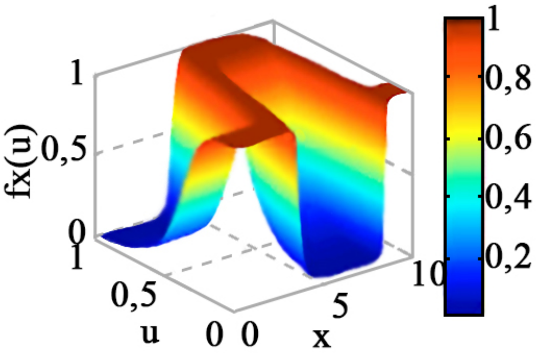
НМ-2 можно выразить посредством степени истинности неопределенности, которая отображает расплывчатость и неточность принадлежности элемента к данному множеству.

НМ-2 обозначаются через $\tilde{\tilde{A}}$ и характеризуются ФП второго типа (порядка) $\mu_{\tilde{\tilde{A}}}(\mathrm{x,u})$, где $\mathrm{x} \in \mathrm{X}, \mathrm{u} \in J_x^u \subseteq [0,1]$ и $0 \leq \mu_{\tilde{\tilde{A}}}(\mathrm{x,u}) \leq 1$ и выражается в уравнении:

$$\tilde{\tilde{A}} = \left\{\left(x, \mu_{\tilde{\tilde{A}}}(\mathrm{x})\right) \middle| \mathrm{x} \in \mathrm{X}\right\}$$

$$\tilde{\tilde{A}} = \left\{\left(x, u, \mu_{\tilde{\tilde{A}}}(\mathrm{x,u})\right) \middle| \forall \mathrm{x} \in X, \forall \mathrm{u} \in J_x^u \subseteq [0,1]\right\}. \tag{1}$$

Графическая интерпретация ФП второго типа и отпечатка неопределенности представлено на рис. 2 (а, б).



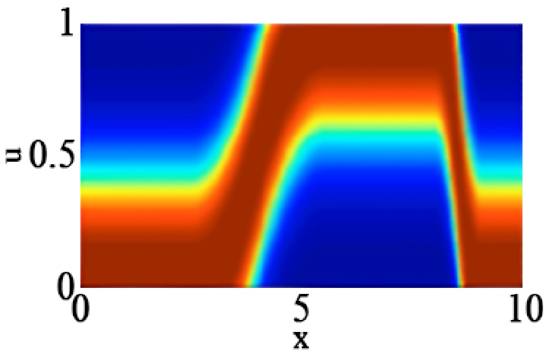


Рис. 2. **ФП типа-2**

а) ФП-2 **б) отпечаток неопределенности для ФП-2**

Если $\tilde{\tilde{A}}$ непрерывно, то его можно представить следующим уравнением:

$$\tilde{\tilde{A}} = \left\{\int_{x \in \mathrm{X}} \frac{\left[\int_{\mathrm{u} \in J_x^u \subseteq [0,1]} \frac{f_x(\mathrm{u})}{u}\right]}{x}\right\},$$

где $\iint$ обозначает объединение x и u. Если же $\tilde{\tilde{A}}$ дискретно, то для представления используется формула:

$$\tilde{\tilde{A}} = \left\{\sum_{x \in \mathrm{X}} \frac{\mu_{\tilde{\tilde{A}}}(\mathrm{x})}{x}\right\} = \left\{\sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\sum_{k=1}^{M_i} \frac{f_{x_i}(u_{ik})}{u_{ik}}}{x_i}\right]\right\},$$

где $\sum\sum$ обозначает объединение x и u.

Если $f_x(\mathrm{u}) = 1, \forall \mathrm{u} \in [\underline{J}_x^u, \bar{J}_x^u] \subseteq [0,1]$, то ФП второго типа $\mu_{\tilde{\tilde{A}}}(\mathrm{x,u})$ выражена нижней ФП первого типа $\underline{J}_x^u \equiv \underline{\mu}_{\mathrm{A}}(\mathrm{x})$ и верхней ФП первого типа $\bar{J}_x^u \equiv \bar{\mu}_{\mathrm{A}}(\mathrm{x})$ (рис. 3), тогда это является интервальным НМ второго порядка (ИНМТ-2) и представляется уравнениями:

$$\tilde{\tilde{A}} = \begin{cases} (x, u, 1) | \forall \mathrm{x} \in X, \\ \forall \mathrm{u} \in [\underline{\mu}_{\mathrm{A}}(\mathrm{x}), \overline{\mu}_{\mathrm{A}}(\mathrm{x})] \subseteq [0,1] \end{cases}$$

или

$$\tilde{\tilde{A}} = \left\{ \int_{x \in \mathrm{X}} \left[\int_{\mathrm{u} \in [\underline{J}_x^u, \overline{J}_x^u] \subseteq [0,1]} \frac{1}{u} \right] / x \right\} = \left\{ \int_{x \in \mathrm{X}} \left[\int_{\mathrm{u} \in [\underline{\mu}_A(x), \overline{\mu}_A(x)] \subseteq [0,1]} \frac{1}{u} \right] / x \right\}.$$

Если $\tilde{\tilde{A}}$ единична (одиночна), то ФП выражается уравнением:

$$\mu_{\tilde{\tilde{A}}}(\mathrm{x}) = \begin{cases} \frac{1}{1} & si \;\; x = x` \\ \frac{1}{0} & si \;\; x \neq x` \end{cases}.$$

Нечеткий вывод для НМ второго порядка

Нечеткие системы логического вывода, основанные на правилах, состоят из четырех основных компонентов:

– фаззификатора;
– правил;
– механизма логического вывода;
– процессора вывода.

Взаимосвязь этих компонентов продемонстрирована на рис. 3. Как только правила были установлены, нечеткая логическая система может считаться чередой звеньев от четкого входа до четкого вывода. Данная схема часто используется в различных технических системах и иногда называется нечетким логическим контроллером [1].

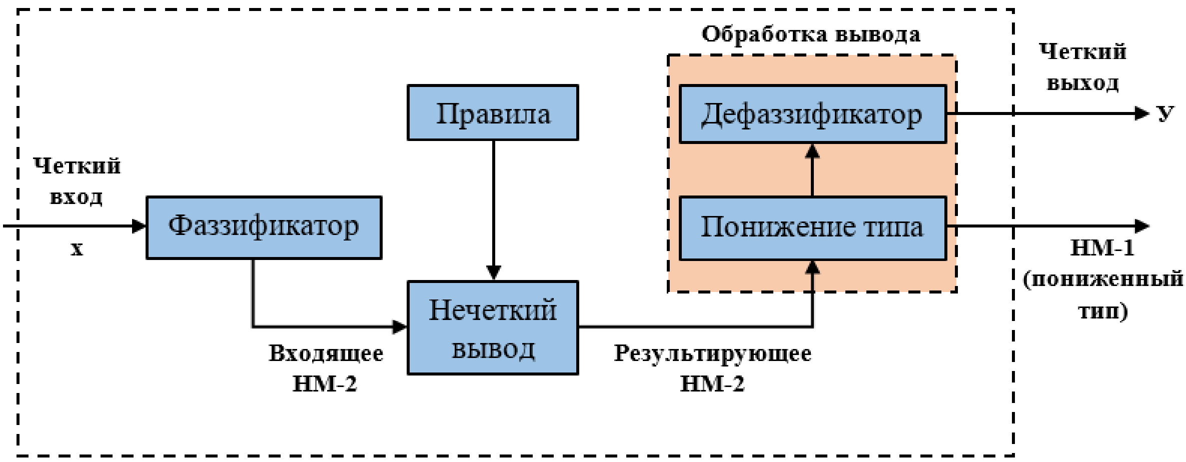


Рис. 3. **Система нечеткого логического вывода типа – 2**

В данной схеме не изменяются правила, необходимо только модифицировать нечеткие модели на входе и выходе. Меняется обработка вывода: база правил применяется к данным, представленным при помощи ФП-2, добавляется этап для сокращения порядка НМ, который представлен на рис. 4, и уже к типу-1 применяется дефаззификация.

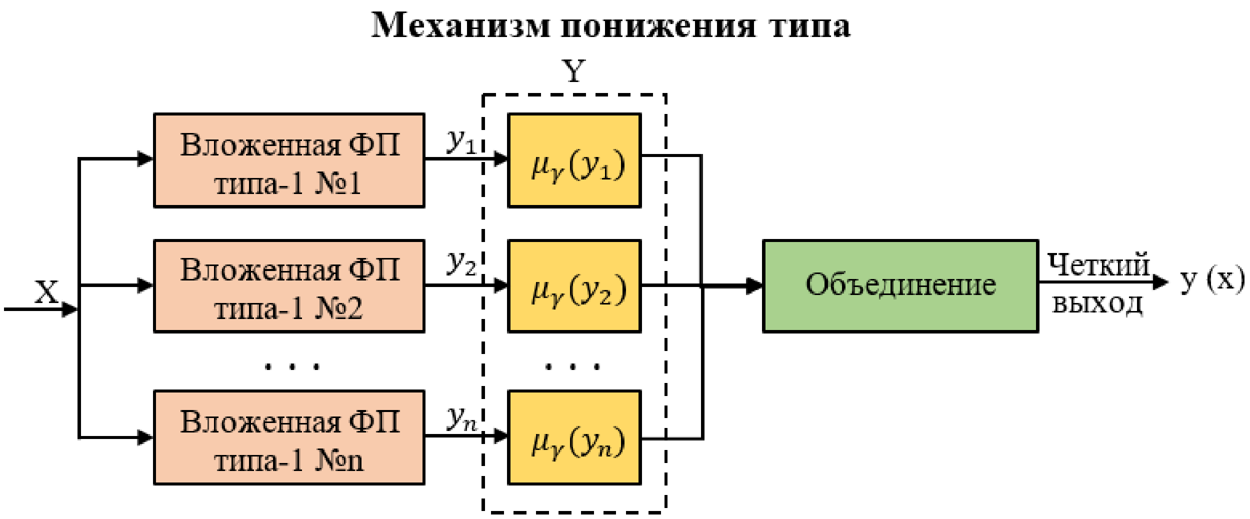


Рис. 4. **Организация нечеткого вывода через вложенные ФП**

ФП второго типа представлена в системе условного вывода как совокупность вложенных ФП-1. Благодаря этому, имеется возможность использовать математику условного вывода для типа-1 (рис. 5).

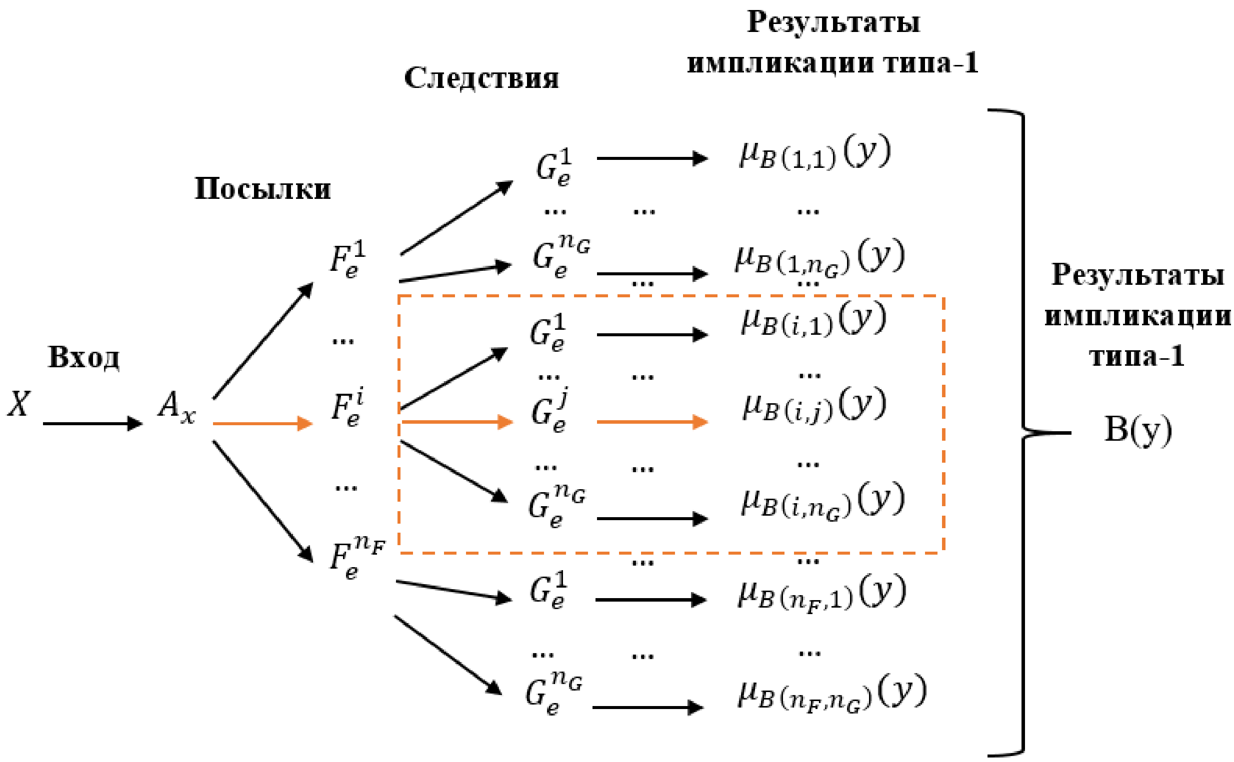


Рис. 5. **Организация нечеткого вывода через вложенные ФП**

Нечеткий вывод для одного правила представлен на рис. 6. Сохраняется общая логика вывода для первого порядка, только операции проводятся для пар верхних и нижних ФП. Результатом такого нечеткого вывода является ИНМТ-2 [2].

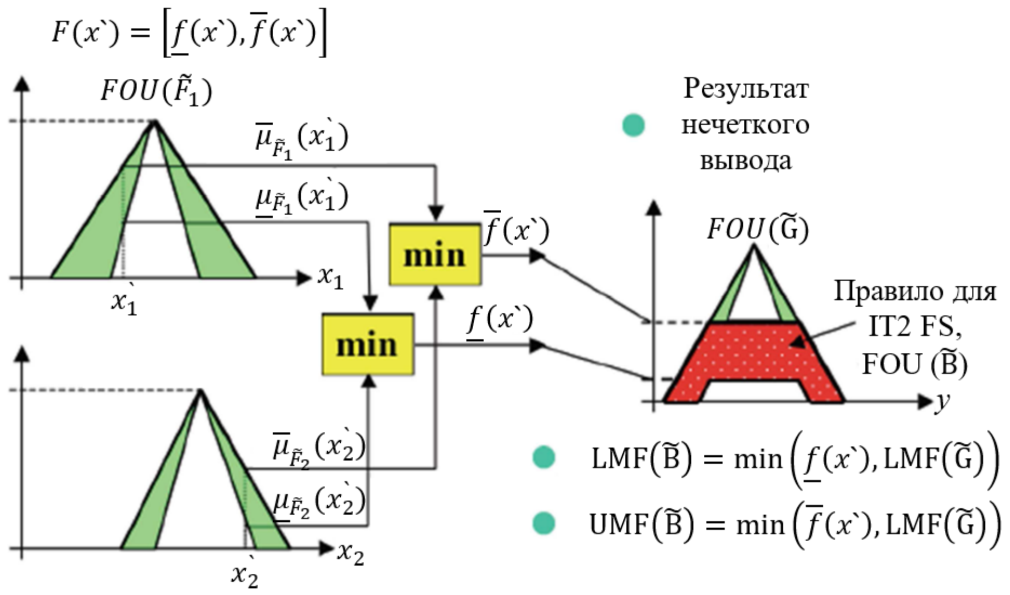


Рис. 6. **Свертка правил для НМ-2**

При использовании нескольких правил вывод производится по схеме, представленной на рис. 7.

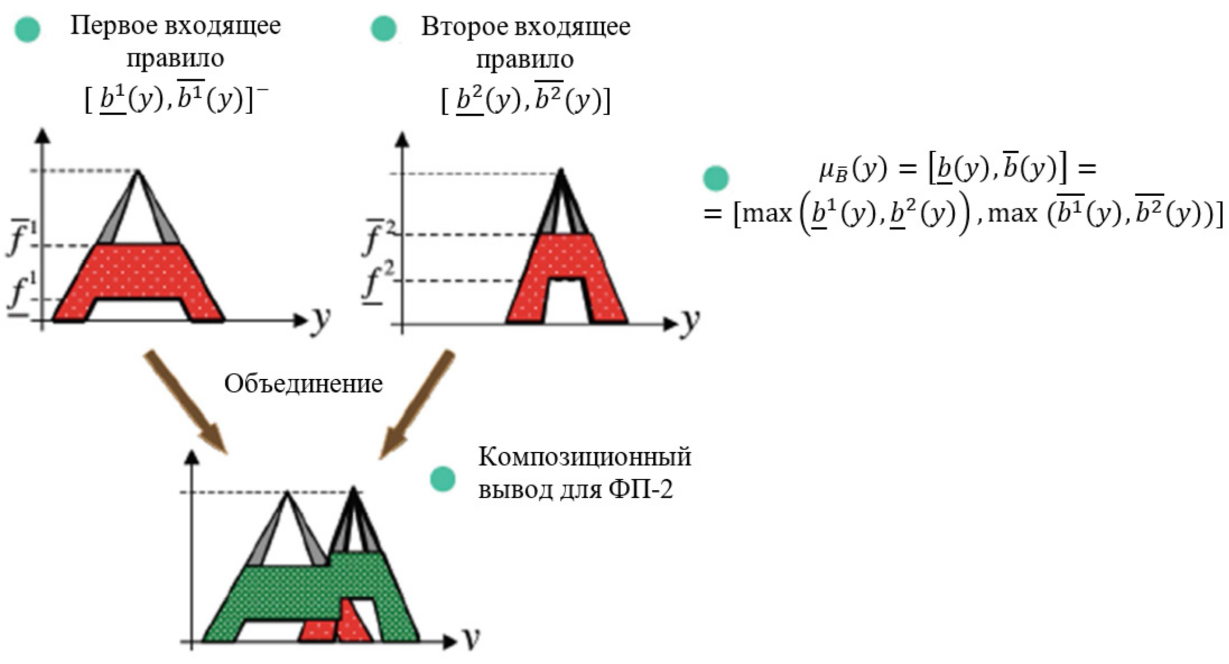


Рис. 7. **Композиционный вывод для НМ-2**

Для получения интерпретируемого результата необходимо провести процедуры понижения порядка и дефаззификации [2]. Понижение типа может быть достаточно трудоемкой операцией с вычислительной точки зрения, так как обычно НМ второго типа содержит большое число вложенных множеств первого типа. Однако для интервального НМ второго типа возможно применить широко используемый итерационный алгоритм Карника-Менделя, обеспечивающий поиск минимального и максимального центроидов вложенных НМ первого типа, которые в дальнейшем могут быть использованы при выполнении операции понижения типа (центроид НМ второго типа равен их среднему арифметическому).

Кроме того, используя принцип расширения, можно использовать геометрическую интерпретацию центроида. Одна из причин использования такой интерпретации состоит в том, что невозможно выполнить понижение типа для геометрического множества, если внутри него содержится бесконечное число вложенных множеств. Используя геометрию, возможно вычислить центр площади геометрического НМ первого типа, эквивалентный центру площади дефаззификации. Эту же операцию можно расширить и на интервальные НМ второго типа [8].

Алгоритм нечеткого вывода с адаптацией операций над НМ

Построение нечетких моделей риска предполагает наличие широкого спектра вариантов агрегирования потенциального риска возникновения чрезвычайной ситуации и соответствующего ущерба. Среди возможных вариантов обобщения для подобной модели риска особое место занимает вывод на основе нечеткой продукционной модели с адаптацией операций над НМ. Это связано с широкими возможностями нечетких когнитивных карт для моделирования причинных взаимосвязей, выявленных между концептами некоторой области, возможностью наглядного представления анализируемой системы и легкостью интерпретации причинно-следственных связей между концептами. При этом процесс построения когнитивной карты практически не поддается формализации, а полученная модель сложно верифицируется. Для решения данных проблем разработаны алгоритмы вывода на основе нечеткой продукционной модели с адаптацией операций над НМ.

В данном алгоритме нечеткого вывода база нечетких правил формируется на основе правил типа (1), в заключениях которых операции над нечеткими высказываниями выбираются в зависимости, например, от степени согласованности (значимости) нечетких высказываний в предпосылках [9].

Правила, основанные на НМ с адаптацией операций над ними, где операции над нечеткими высказываниями в заключениях правил выбираются (адаптируются) в зависимости, например, от степени согласованности (значимости) нечетких высказываний в предпосылках [10]:

$$\Pi_i\text{: } \textbf{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } A_{11} \textbf{ И } \ldots \textbf{ И } x_m \text{ есть } A_{m1},$$

$$\textbf{ТО } \; y = \left(A_{11}\theta_1^i A_{12}\right)\vartheta_l^i, \ldots, \vartheta_l^i\left(A_{(m-1)1}\theta_q^i A_{m1}\right),\; i = 1,\ldots,n \;,$$

где $\theta_1^1, \ldots, \theta_q^1, \ldots, \theta_1^n, \ldots, \theta_q^n$ – операции свертки НМ, выбираемые в зависимости от уровня совместимости пары соответствующих нечетких высказываний в предпосылке; ϑ_l^i – операция комбинирования результатов парных сверток НМ этих высказываний в предпосылке в i правиле (i=1, …, n), выбираемая из соответствующей совокупности операций парных сверток $\theta_1^i, \ldots, \theta_q^i$ и характеризующая, например, нижний уровень их согласования.

Правила данного типа предназначены для построения оценочных моделей (моделей предпочтения лица, принимающего решения) в многоцелевых системах поддержки принятия решений [9].

Описание данного алгоритма можно привести при помощи построения модели оценки достижимости общей цели системы с учетом ее согласования со многими неравнозначными частными целями этой системы.

Приведем пример. Пусть в результате анализа сложной системы определена совокупность нечетких целей. Тогда общая цель $G_{об}$ выражается совокупностью частных целей G_i, i=1 ... q. Каждая частная цель связана с частным критерием, описываемым НМ, определенным на X_i, причем для $\forall x_i \in X_i$ величина $\mu_{G_i}(x)$ характеризует степень ее достижимости. Общая целевая функция задается НМ, определенным на базовом множестве $X_1 \ldots X_q$.

Рассмотрим основные этапы данного алгоритма нечеткого вывода.

Этап 1. Для каждой из частных целей, а также для общей цели формируется лингвистическая переменная (с одноименным названием), множество лингвистических значений (терм-множество состояний) которой характеризует степени ее достижимости.

Рассмотрим в качестве примера одни и те же значения для всех терм-множеств {L – низкая, M – средняя, H – высокая}.

Этап 2. Каждая частная цель определяется совокупностью нечетких продукционных правил относительно входных переменных. Не будем здесь останавливаться на задаче нечеткого вывода по каждой частной цели, так как эту задачу можно решить известными способами, например, с использованием рассматриваемого ранее алгоритма нечеткого вывода Мамдани.

Этап 3. Определяются число, вид и лингвистические оценки степеней парных согласований общей цели с каждой частной целью. Например, множество лингвистических значений, характеризующих степени согласования общей $G_{об}$ и i частной G_i (i=1, ..., q) целей можно сформировать следующим образом: {полная совместимость; большая совместимость; средняя совместимость; малая совместимость; несовместимость} (рис. 8).

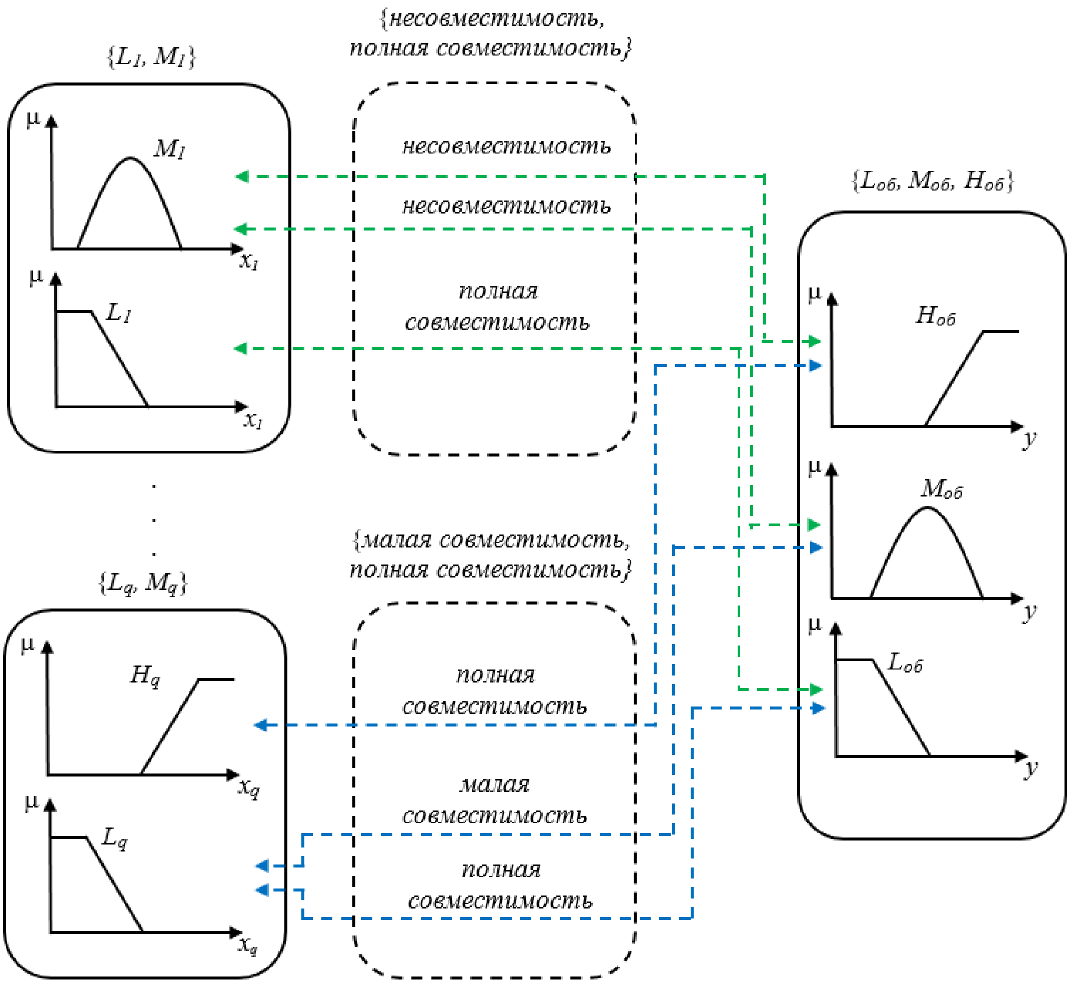


Рис. 8. **Пример согласованности значений терм-множеств целей**

Этап 4. Идентифицируются возможные операции свертки общей ценной функции (для всех значений из терм-множества) с частными в зависимости от степени их согласованности, например:

– max ($G_{об}$, G_j) – полная совместимость целей $G_{об}$ и G_j;
– ($G_{об}$ + G_j)/2 – большая совместимость;
– med ($G_{об}$, G_j) – средняя совместимость;
– $(G_{об} \times G_j)^{1/2}$ – малая совместимость;
– min ($G_{об}$, G_j) – несовместимость [10].

Для свертки, учитывающей степень согласованности общей и *j* частной целей, целесообразно также использовать параметризированное семейство операций в виде:

$$\mathrm{I}(G_{об}, G_i)^{\gamma} \cdot U(G_{об}, G_i)^{(1-\gamma)}, \gamma \in [0,1],$$

где I, U – некоторые операции пересечения и объединения соответственно; y – показатель, характеризующий степень согласованности целей $G_{об}$ и G_j [11].

Этап 5. Формируется совокупность нечетких правил, каждое из которых определяет стратегию достижения отдельного значения из терм-множества, характеризующего общую целевую функцию $H_{об}$, $M_{об}$, $L_{об}$ (в общем случае число этих правил может быть больше).

Формирование каждого правила включает в себя процедуру идентификации операций свертки для заданного значения общей целевой функции с частными, а также операцию комбинирования результатов этих сверток, характеризующую нижний уровень их согласования:

П$_1$: **ЕСЛИ** x_1 есть H_1 **И** … **И** x_q есть H_q,

ТО y есть $(H_1\theta_1^1 H_{об})\vartheta_l^1, \dots, \vartheta_l^1(H_q\theta_q^1 H_{об})$,

П$_2$: **ЕСЛИ** x_1 есть H_1 **И** … **И** x_q есть M_q,

ТО y есть $(H_1\theta_1^2 H_{об})\vartheta_l^2, \dots, \vartheta_l^2(M_q\theta_q^2 H_{об})$,

…

П$_i$: **ЕСЛИ** x_1 есть M_1 **И** … **И** x_q есть M_q,

ТО y есть $(M_1\theta_1^i M_{об})\vartheta_l^i, \dots, \vartheta_l^i(L_q\theta_q^i M_{об})$,

…

П$_n$: **ЕСЛИ** x_1 есть L_1 **И** … **И** x_q есть L_q,

ТО y есть $(L_1\theta_1^n L_{об})\vartheta_l^n, \dots, \vartheta_l^n(L_q\theta_q^n L_{об})$,

где x_1, …, x_q – входные переменные; y – выходная переменная; {L_j, M_j, H_j} – ФП, характеризующие степень достижимости *j* частной цели G_j, *j*=1, ..., *q*; {$L_{об}$, $M_{об}$, $H_{об}$} – ФП, характеризующие степень достижимости общей цели $G_{об}$; $\theta_1^1, \dots, \theta_q^1, \dots, \theta_1^n, \dots, \theta_q^n$ – операции свертки общей целевой функции с частными, выбираемые в зависимости от уровня их совместимости; ϑ_l^i – операция комбинирования результатов сверток общей цели с частными в *i* правиле (*i*=1, ..., n), выбираемая из соответствующей совокупности операций парных сверток общей цели с частными $\theta_1^i, \dots, \theta_q^i$ и характеризующая нижний уровень их согласования.

Этап 6. Для каждого из правил П$_i$ осуществляется парная свертка значений общей и частных целевых функций на основе идентифицированных операций $\theta_1^i, \dots, \theta_q^i$, выбранных в соответствии с уровнем их совместимости, и формируются «модифицированные» ФП:

$$\alpha_{i1} = \left(M_1, \theta_1^i, M_{\text{об}}\right),$$

$$\dots$$

$$\alpha_{iq} = \left(L_q, \theta_q^i, M_{\text{об}}\right).$$

Этап 7. Находятся степени достижимости всех частных целей, то есть уровни отсечения для всех предпосылок каждого правила: $L_1(x_1)$, $M_1(x_1)$, $H_1(x_1)$, …, $L_q(x_q)$, $M_q(x_q)$, $H_q(x_q)$.

Этап 8. Для каждого правила П формируются «усеченные» функции принадлежности предпосылок каждой парной свертки каждого из правил:

$$\alpha_{i1}(x_1) = \left(M_1(x_1)\ \theta_1^i\ M_{\text{об}}\right),$$

$$\dots$$

$$\alpha_{iq}(x_q) = \left(L_q(x_q)\ \theta_q^i\ M_{\text{об}}\right).$$

Этап 9. Формируются частные заключения по каждому из правил на основе выбранной операции комбинирования результатов сверток общей целевой функции с частными:

$$\beta_1 = \alpha_{11}(x_1)\vartheta_l^1 \dots \vartheta_l^1 \alpha_{1q}(x_q),$$

$$\dots$$

$$\beta_i = \alpha_{i1}(x_1)\vartheta_l^i \dots \vartheta_l^i \alpha_{iq}(x_q),$$

$$\dots$$

$$\beta_n = \alpha_{n1}(x_1)\vartheta_l^n \dots \vartheta_l^n \alpha_{nq}(x_1).$$

Этап 10. Осуществляется объединение (композиция) частных заключений правил. При подобном объединении обычно используется операция максимума или суммирования. Для задания наиболее точной оценочной модели (с учетом рассмотренного механизма согласования целей) в качестве такой операции объединения целесообразно использовать операцию из множества ϑ_l^i (i=1, ..., n), характеризующую наибольшую степень согласования целей по всем правилам.

В результате получается комбинированное нечеткое подмножество, описываемое обобщенной ФП, и соответствующее степени достижимости общей цели системы.

Этап 11. При необходимости находится четкое значение выходной переменной с использованием одного из методов (например центроидного) приведения к четкости.

На рис. 9 приведена иллюстрация рассмотренного алгоритма нечеткого вывода для построения оценочной модели достижимости общей цели в соответствии с данным примером.

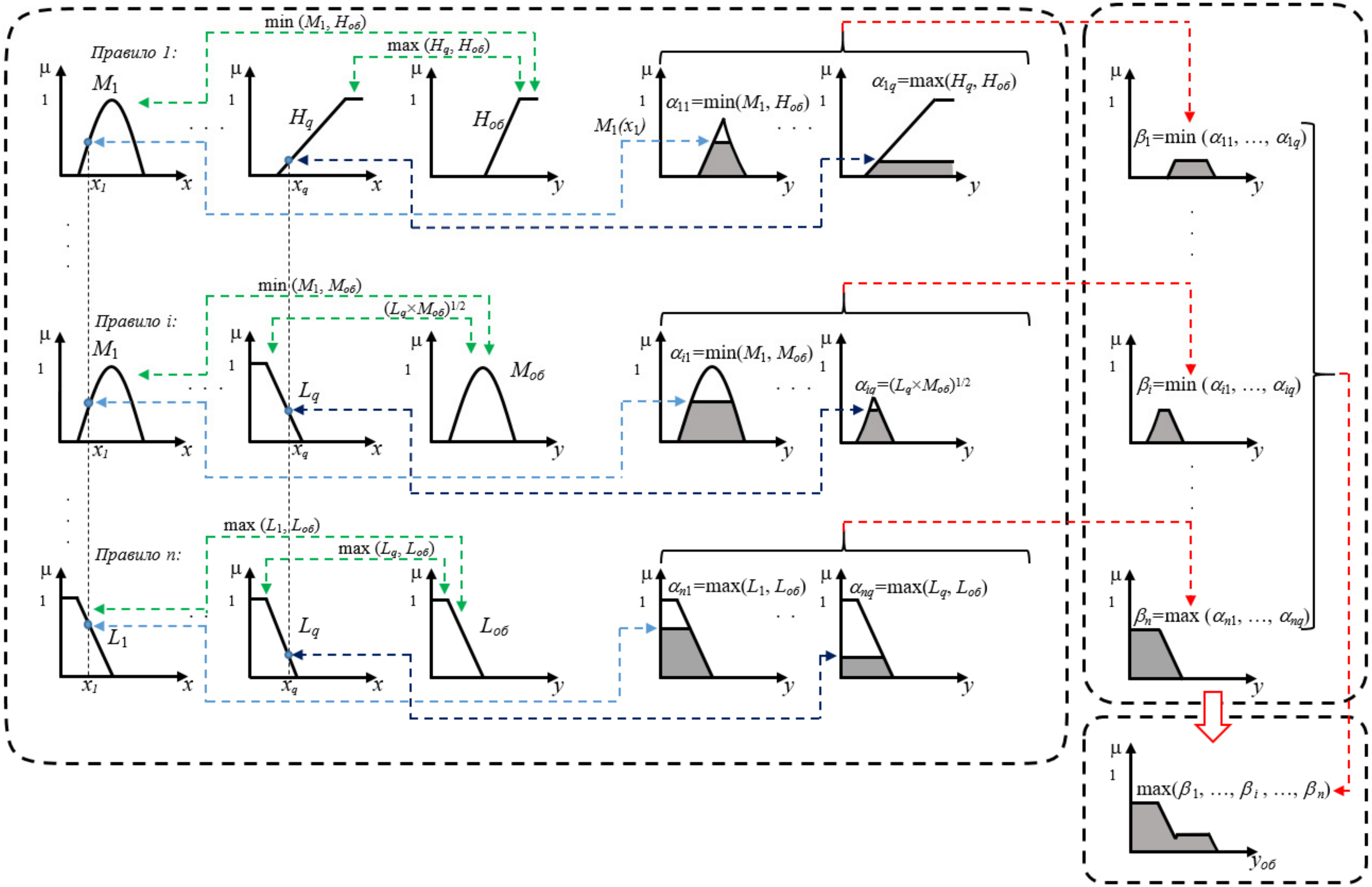


Рис. 9. **Иллюстрация алгоритма нечеткого вывода с адаптацией операций над НМ**

Одним из формализмов для описания НЕ-факторов при построении моделей оценки рисков в нечеткой среде являются НМ второго порядка. Анализ моделей оценки рисков с использованием вывода на НМ второго порядка, показывает широкие перспективы данного подхода в виду больших возможностей описания неопределенности.

Широкие возможности нечетких когнитивных карт для создания моделей оценки рисков в нечеткой среде требует создания специальных алгоритмов, позволяющих формализовать процесс создания карты и верифицировать полученную модель. Такими алгоритмами и являются алгоритмы вывода на основе нечеткой продукционной модели с адаптацией операций над НМ.

Литература

1. Гвоздик М.И., Абдулалиев Ф.А., Шилов А.Г. Модели оценки рисков в нечеткой среде с использованием логического вывода на нечетких множествах первого порядка // Науч.- аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2017. № 2. С. 107–120.

2. Буйневич М.В., Владыко А.Г., Радова Е.В. Выбор рациональной системы экономических механизмов управления рисками в интересах обеспечения техногенной безопасности отрасли (региона) // Проблемы управления рисками в техносфере. 2012. № 4 (24). С. 77–83.

3. Mendel J. Introduction to Type-2 Fuzzy Sets and Systems // IEEE COMPUTANIONAL INTELLIGENCE MAGAZINE. 2007. № 2.

4. Simon Coupland . Type-2 Fuzzy Control of a Mobile Robot. United Kingdom. 30 с.

5. Mendel Jerry M., John Robert I. Bob Type-2 Fuzzy Sets Made Simple // IEEE Transactions on fuzzy systems. 2002. Vol. 10. № 2. April.

6. Ремезова Е.М. Нечеткие множества второго порядка: понятие, анализ и особенности применения. Современные проблемы науки и образования. Пенза: Изд. дом «Академия Естествознания». 2013. № 5. 435 с.

7. Mendel Jerry M., Karnik Nilesh N. Operations on type-2 fuzzy sets // Fuzzy Sets and Systems. 2001. 122. pp. 327–348.

8. Демидова Л.А. Развитие методов теории нечётких множеств и генетических алгоритмов для задач поддержки принятия решений в условиях неопределённости: Теоретико-методологическое исследование: автореф. дис. … д-ра техн. наук. Рязань, 2009. 39 с.

9. Борисов В.В., Федулов А.С. Нечеткие оценочные модели сложных систем с учетом согласования неравнозначных целей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2003. № 5. С. 3–12.

10. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. М.: Радио и связь, 1990.

11. Zimmermann H.J., Zysno P. Latent Connectives in Human Decision Making // Fuzzy Sets and Systems. 1980. V. 4. № 1. P. 37–51

Reference

1. Gvozdik M.I., Abdullaev F.A., Shilov A.G. Risk assessment Model in fuzzy environment using logical inference on fuzzy sets of the first order // Nauch.- analit. Sib. «Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2017. No. 2.

2. Buinewicz M.V., Vladikov A.G., Radova E.V. Choice of rational system of economic mechanisms of risk management to ensure technological security of the sector (region) // Problems of risk management in technosphere. 2012. No. 4 (24). P. 77–83.

3. Mendel J. Introduction to Type-2 Fuzzy Sets and Systems // COMPUTANIONAL IEEE INTELLIGENCE MAGAZINE. 2007. № 2.

4. Simon Coupland . Type-2 Fuzzy Control of a Mobile Robot. United Kingdom. 30 c.

5. Jerry M. Mendel, Robert I. Bob John, Type-2 Fuzzy Sets Made Simple // IEEE Transactions on fuzzy systems. 2002. Vol. 10. № 2. April.

6. Remezov E.M. Fuzzy sets of the second order: the concept, analysis and application features. Modern problems of science and education. Penza: Izd. house «Academy of natural Sciences». 2013. № 5. 435 c.

7. Mendel Jerry M., Karnik Nilesh N. Operations on type-2 fuzzy sets // Fuzzy Sets and Systems. 2001. 122. pp. 327–348.

8. Demidova L.A. Development of methods of fuzzy sets theory and genetic algorithms for problems of decision support under uncertainty: Theoretical and methodological analysis: abstract. dis. … on competition of a scientific degree Ph. Ryazan, 2009. 39 c.

9. Borisov V.V., Fedulov A.S. Fuzzy evaluation model of the complex system subject to the approval of unequal purposes // Neurocomputers: development, application. 2003. № 5. S. 3–12.

10. Dubois D., Prad A. Theory of possibilities. Application to knowledge representation in computer science. M.: Radio and communication, 1990.

11. Zimmermann N.J., Zysno R. Latent Connectives in Human Decision Making // Fuzzy Sets and Systems. 1980. V. 4. No. 1. P. 37–51.