

УДК 004.8

А.Н. Власенко, Е.И. Кучеренко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ИЕРАРХИЧЕСКАЯ НЕЧЕТКО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ

В статье рассмотрена проблема анализа неполной, неточной и противоречивой информации в задачах управления рисками с использованием нечеткой логики и вероятностного подхода к рассуждениям. Предложена модификация иерархической знаниеориентированной системы нечеткого логического вывода Такаги-Сугено с нечетко-вероятностными локальными подмоделями.

**Ключевые слова:** управление рисками, нечеткая логика, иерархические системы, нечетко-вероятностные правила.

### Введение

Риск представляет собой предполагаемое событие либо фактор, способный принести кому-либо ущерб или убыток. Риск можно представить как структуру вида [1]:

$$R = \{ \langle s_i, p_i, x_i \rangle \}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где  $s_i$  – описание риска,  $p_i$  – вероятность рискового события,  $x_i$  – последствия или оценка ущерба.

Управление рисками – это формальные процессы, связанные с идентификацией, анализом рисков и принятием решений, которые включают максимизацию положительных и минимизацию отрицательных последствий наступления рисков событий [2]. Построение формальных моделей, ориентированных на знания в задачах управления рисками сталкивается с проблемами неточности, неполноты и противоречивости данных предметной области.

Долгое время в задачах управления рисками доминировали количественные подходы, в основном основанные на вероятностном моделировании. Не смотря на успешный опыт применения подобных моделей, вероятностные модели обладают существенными недостатками – они не способны эффективно оперировать субъективными и неточными знаниями о предметной области [3]. Также подобные модели сильно зависят от исходного набора статистических данных, который далеко не всегда полон и достаточен для построения надежных моделей сложных систем.

Использование альтернативных качественных подходов к моделированию сложных систем в задачах управления рисками, в частности нечеткой логики, как вместо количественных подходов, так и совместно с ними представляет собой актуальную научную и практическую задачу. Это обусловлено тем, что они предоставляют мощные механизмы для работы с неточностью и неопределенностью, а также позволяют получить приемлемые решения там,

где количественные методы не всегда дают адекватные ответы. Нечеткие модели представляют особый интерес и актуальны для исследований. Они обладают отличными возможностями для описания сложных систем в интуитивно понятной для человека манере, и доказали свою применимость и высокую эффективность во множестве различных прикладных областей [3, 4].

### Постановка задачи

Рассмотрим задачу анализа потенциальных рисков событий в контексте интеллектуализации процессов управления рисками. Опишем общую структуру произвольной предметной области  $D$  как два множества разнородных многопризнаковых объектов – одно  $X$  для формализации значимых факторов и параметров моделируемой прикладной области или системы, а второе  $Y$  – для формализации всех рисков и их различных характеристик.

На основе работы [5] опишем многопризнаковые объекты  $M_i, i = 1, \dots, n$ , из которых состоят множества  $X$  и  $Y$  моделируемой предметной области представляются в виде кортежей  $q_i = (q_{i1}^{e_1}, \dots, q_{im}^{e_m})$  в  $m$ -мерном декартовом пространстве  $Q = Q_1 \times \dots \times Q_m$ , где  $Q_s = \{q_s^{e_s}\}$  – непрерывная или дискретная шкала  $s$ -го признака,  $e_s = 1 \div h_s$ ,  $s = 1, \dots, m$ .

Общая теоретико-множественная схема произвольной предметной области представлена на рис. 1.

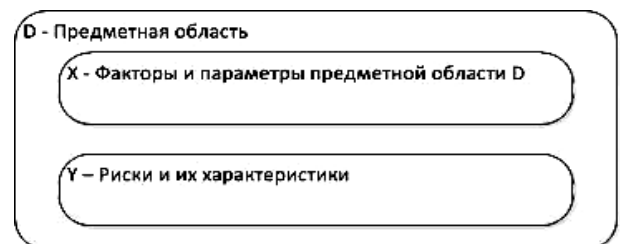


Рис. 1. Схема модели предметной области

На основе вышеуказанного теоретико-множественного представления сформулируем задачу исследования как построения обобщенной гибридной модели представления знаний для анализа рисков, которая будет содержать знания о предметной области, полученные как от экспертов, так и автоматически путем анализа накопленных данных. Модель должна давать возможность, получая на входе значения факторов и параметров предметной области, на выходе получать:

- достоверные оценки рисков – вероятности рисковых событий (как априорные, так и апостериорные по отношению к другим как рисковым так и не рисковым событиям);

- комплексные оценки последствий рисковых событий;

- вероятности несвоевременного обнаружения рисков.

Разрабатываемая модель должна быть адекватной и позволять эффективно работать с неточными, неполными и противоречивыми фактами предметной области.

### **Анализ существующих исследований**

Управление рисками представляет собой сложную, многокритериальную и многопараметрическую задачу, полную неопределенности и неполноты [3].

К классическим хорошо изученным количественным методам и моделям в управлении рисками относятся статистические гипотезы, теория вероятностей, методы, основанные на вычислении оптимумов и т.д. Данные методы дают приемлемые решения для некоторых классов конечномерных проблем, но без способности управлять неопределенностью [3]. Также данные модели обладают невысокой наглядностью и понятностью для конечных пользователей.

Нечеткое моделирование сложных нелинейных отношений, которые очень важны в формальных моделях управления рисками, представляет собой один из самых важных вопросов в применении нечеткой логики. Данный подход позволяет моделировать качественные аспекты человеческого знания и процесса рассуждений без применения точного количественного анализа.

В системах нечеткого логического вывода модель выражена в терминах лингвистических отношений или терминах локальных моделей [6]. В построении прикладных систем основанных на принципах нечеткой логики важным является достижение не только максимальных адекватности и точности по отношению к прикладной предметной области, но и компактности используемой базы правил.

Применение нечеткой логики в управлении рисками не требует от эксперта предоставления точной информации о существовании рисков фактора [7]. Она предоставляет удобный механизм

для работы непосредственно с лингвистической информацией, что достаточно широко используется в представлении различных рисковых факторов, их оценок и т.д. [3].

Системы поддержки принятия решений в задачах управления рисками, основанные на нечеткой логике, нашли широкое применение в различных прикладных областях – как технических, например, в строительстве и в производстве, так и в экономических, особенно связанных с операциями с ценными бумагами [3].

Несмотря на многие решенные проблемы, применение нечеткого логического вывода в задачах управления рисками наталкивается и на естественные ограничения – с ростом сложности систем, основанных на знаниях, способность представления знаний с использованием лишь «нечеткости» падает [7, 8].

Также возможности нечетких систем логического вывода могут быть ограниченными вследствие наличия случайных и вероятностных элементов в моделируемых системах. Случайность представляет собой особый тип неопределенности, называемый статистической неопределенностью [9]. Существуют различные подходы к интеграции нечеткости и вероятности в интеллектуальных системах – нечеткие вероятности и вероятностная нечеткая логика [10]. Тем не менее, на данный момент не существует единого универсального решения к объединению нечетко-логического и вероятностного подходов к решению прикладных задач [3, 10], поэтому построение оптимальных гибридных моделей представляет собой актуальную задачу, особенно в различных аспектах процессов управления рисками, где оба типа неопределенности сопутствуют один другому на всевозможных уровнях.

### **Предложенная модель**

Для решения поставленных задач предложена гибридная иерархическая модель вероятностного нечеткого логического вывода. Основной частью данной модели является вероятностно-нечеткая база правил и механизм логического вывода с их использованием.

Предложенная модель является иерархической, поскольку на данный момент это самый действенный способ преодоления так называемого «проклятия размерности» – экспоненциального характера зависимости между количеством входных параметров нечеткой модели и количеством задействованных правил [8]. Иерархические нечеткие модели, впервые предложенные в работе [11], состоят из нечетких моделей меньших размерностей, и выходы моделей одного уровня являются входами моделей следующего уровня, что позволяет значительно сократить количество правил.

Предложенную модификацию модели иерархического нечеткого логического вывода отличает ис-

пользование локальных подмоделей двух различных типов – собственно нечетких и гибридных нечетко-вероятностных. На рис. 2 показана одна из возможных структур модели. Множество входных параметров (как дискретных, так и непрерывных) обозначено как X, нечетко-логические модули (локальные подмодели) – FLU (Fuzzy Local Unit), нечетко-вероятностные

логические модули – как FPLU (Fuzzy-Probabilistic Local Unit). На рис. 2 входные параметры поступают на входы моделей только первого уровня, но это не является обязательной характеристикой модели – входные переменные могут поступать на входы подмоделей высших уровней и комбинироваться с выходами подмоделей нижних уровней.

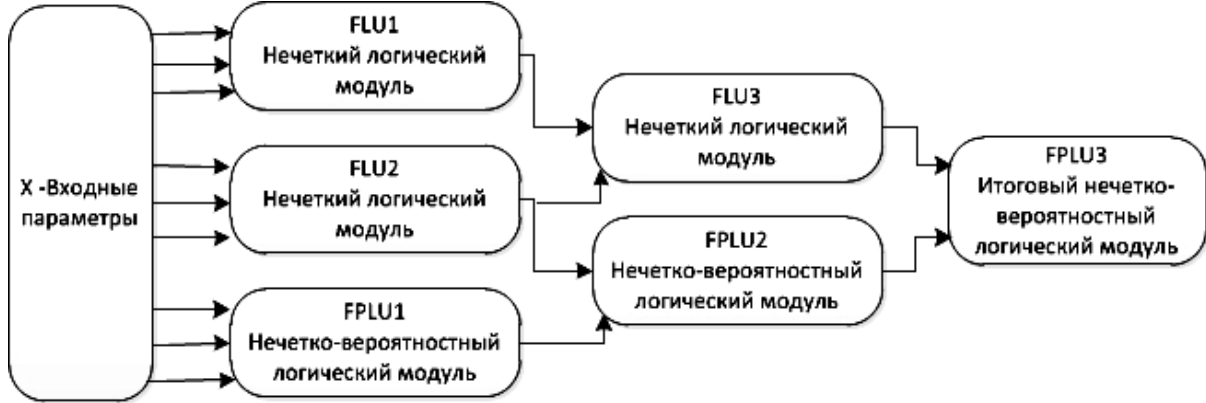


Рис. 2. Возможная структура предложенной гибридной иерархической модели

Существует несколько моделей нечеткого логического вывода, основным отличием которых является структура консеквента. В качестве нечетких подмоделей предложены модели Такаги-Сугено, к преимуществам которых можно отнести более компактный размер репозитория правил по сравнению с моделями нечеткого логического вывода Мамдани, а также меньшую вычислительную сложность, в первую очередь, за счет более простой процедуры дефаззификации [12]. Модель нечеткого логического вывода Такаги-Сугено отличается использованием «четких» функций в консеквенте, и поэтому подобные модели показывают хорошую производительность в различных прикладных приложениях. Антецедент в данной модели описывает нечеткие области в пространстве входных значений, в которых функции консеквента валидны [13]. В данной работе рассмотрены только подмодели с множеством входов и одним выходом (MISO).

Правила имеют следующий вид:

$$R_j : \text{if } x_1 \text{ is } A_{1j} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{2j} \text{ and...and } x_n \text{ is } A_{nj}. \quad (2)$$

$$\text{Then } y = g_j(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (j = 1, 2, \dots, N),$$

где  $g_j(\cdot)$  является «четкой» функцией от  $x_i$ .

Итоговый вывод в данной системе может быть представлен как [7]:

$$\sum_{j=1}^N g_j(\cdot) T_{i=1}^{m_j} \mu_{ij}(x_i) / \sum_{j=1}^N T_{i=1}^{m_j} \mu_{ij}(x_i), \quad (3)$$

где  $1 \leq m_j \leq n$  количество входных переменных, N – количество правил, n – количество входов,  $\mu_{ij}$  – функция принадлежности,  $A_{ij}$  и T – T- норма для нечеткой конъюнкции.

Ключевой задачей нечетко-логических подмоделей является обработка и обобщение информации, не обладающей свойством статистической неопределенности, в то время как задачей нечетко-вероятностных подмоделей – в интеграции двух типов неопределенности для максимально полного представления знаний о предметной области. На рис. 3 показано отношение между мерой правды и вероятностью правды в вероятностной нечеткой логике, используемой в нечетко-вероятностных подмоделях. Отсюда следует, что нечеткие локальные модели более акцентированы на первоначальной обработке данных, и они преобладают на нижних уровнях иерархии. Нечетко-вероятностные локальные модели, в свою очередь, должны обеспечивать итоговый логический вывод – оценки состояния системы и возможных рисков событий в ней.

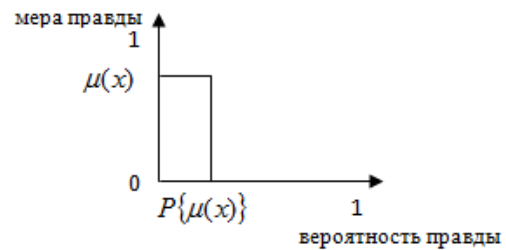


Рис. 3. Пример нечетко-вероятностной логики

В предложенных нечетко-вероятностных подмоделях используются вероятностные нечеткие правила Такаги-Сугено нулевого порядка. Нечеткие вероятностные правила имеют следующую структуру [9, 14]:

$$\text{Rule } R_{q1} : \text{If } x \text{ is } A_q \text{ then } \underline{y} = y_{q1} \text{ with } \Pr(y_{q1} | A_q) \text{ and } \underline{y} = y_{q2} \text{ with } \dots$$

$\Pr(y_{q2}|A_q)$  and  $\dots$

$$\underline{y} = y_{qN} \text{ with } \Pr(y_{qN}|A_q), \quad (4)$$

где  $x = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in X$  – входной вектор размерности  $M$ ;  $A_q$  – лингвистическое значение антецедента, определяемое нечеткой функцией принадлежности  $\mu_q(x)$ ,  $\underline{y}$  представляет собой стохастическую переменную консеквента, равную одному из значений  $y_{q1}, y_{q2}, \dots, y_{qN}$ . Выбор значения консеквента производится в соответствии с условными вероятностями

$\Pr(y_{q1}/A_q), \dots, \Pr(y_{qN}/A_q)$ . Каждое правило описывает вероятностное отображение нечеткого антецедента в множество четких консеквентов [9].

Таким образом, если иерархическую систему нечеткого логического вывода для пяти входных переменных и одного итогового выхода можно представить как:

$$f = f_3(f_2(x_1, x_2), f_1(x_3, x_4), x_5), \quad (5)$$

тогда предложенная нами модификация модели в общем будет иметь вид:

$$fp = fp_3(fp_2(x_1, x_2), f_1(x_3, x_4), x_5). \quad (6)$$

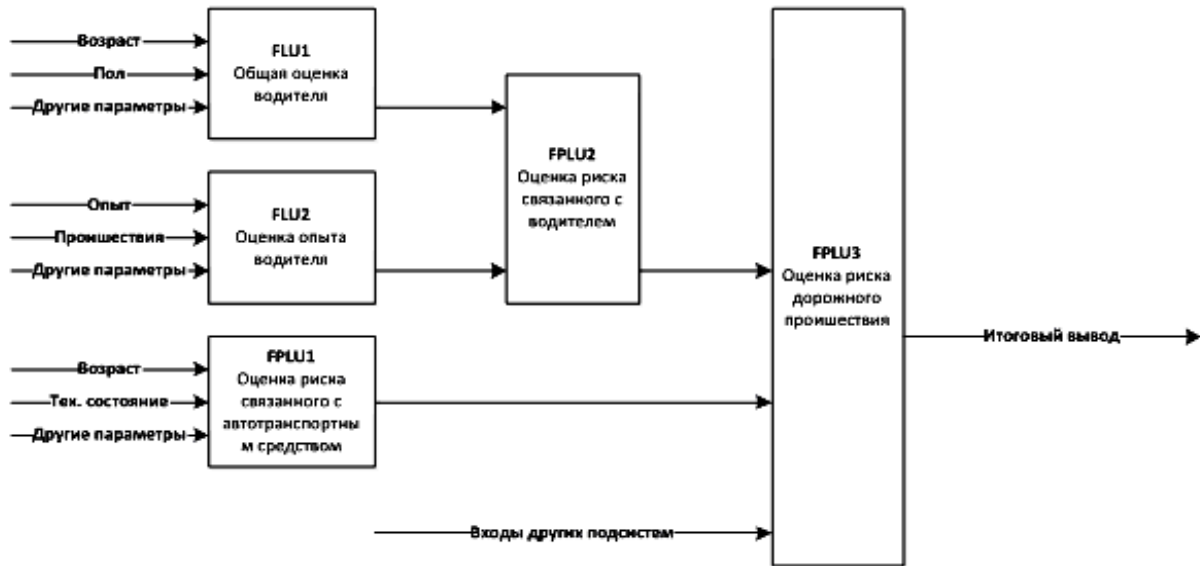


Рис. 4. Пример модели для конкретной прикладной области

В качестве примера практического применения разработанной модели рассмотрим предметную область страхования транспортных средств. На рис. 4 представлена возможная архитектура подобной системы. В качестве входов подсистем первого уровня поступают различные данные об автомобиле, его истории эксплуатации и водителе, техническом состоянии и т.д. В качестве выходов всех нечетко-вероятностных (FPLU) подсистем выступают оценки рисков.

Пример правила из FPLU1 (локальная модель оценки рисков, связанных с автотранспортным средством):

If  $x$  is  $A$  then  $\underline{y} = 1$  with

$$\Pr(0.9|A) \text{ and } \underline{y} = 2 \text{ with } \Pr(0.09|A), \quad (7)$$

где  $x$  – календарный возраст автотранспортного средства, подлежащего страхованию,  $A$  – функция принадлежности к нечеткому подмножеству «средний возраст» и  $\underline{y}$  – прогнозируемое количество неполадок технического характера, способных создать аварийную ситуацию в течении периода страхования.

Использованные функции принадлежности для лингвистической переменной возраста автотранс-

портного средства изображены на рис. 5. Для данной реализации модели были выбраны трапециевидные функции принадлежности.

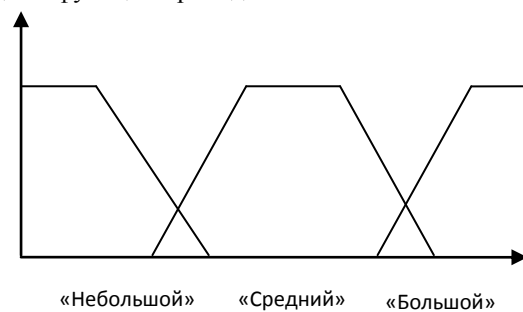


Рис. 5. Функции принадлежности для переменной возраста транспортного средства

### Выводы

В работе получила дальнейшее развитие иерархическая модель нечеткого логического вывода Такаги-Сугено для задач управления рисками. Модифицированная модель позволяет адекватно работать с нечеткой и со стохастической неопределенностями, что особенно актуально для сложных многоуровневых предметных областей и систем, где воз-

никают проблемы анализа и управления рисками. Данная модель может быть построена на основе экспертного знания, автоматически по накопленным массивам данных и с использованием обоих подходов. Использование иерархической структуры в модели позволяет значительно сократить объем используемых правил и разделить нечеткие и нечетко-вероятностные элементы.

Возможности модели исследованы на её реализации для прикладной области автострахования. В данной реализации проверены основные задачи модели: адекватное представление значимых знаний о предметной области для моделирования, оценка потенциальных рисков событий и их последствий, определение вероятности их несвоевременно обнаружения и т.д.

Перспективными направлениями дальнейших исследований в данном направлении являются разработка различных альтернативных механизмов логического вывода на данной модификации модели и анализ возможности использования нечетких подсистем второго типа (Type-2) а также систем нечеткого логического вывода Мамдани в локальных моделях. Важным направлением также является создание и анализ методов автоматического построения и обучения конкретных моделей прикладных областей и систем по накопленным массивам данных с применением различных оптимизационных методик, в частности эволюционных вычислений и методов роевого интеллекта.

### Список литературы

1. Kaplan S. *On The Quantitative Definition of Risk* / S. Kaplan, B.J. Garrick // *Risk Analysis– Society for Risk Analysis*. – 1981. – №1. – P. 11-27.
2. Campbell J.M. *Safety Hazard and Risk Identification and Management In Infrastructure Management* / J.M. Campbell; Ph.D. Thesis. – *The University of Edinburgh*. – 2008. – P. 75-80.
3. Babujska R. *Fuzzy Modeling and Identification* / R. Babujska; Ph.D. Thesis. *Delft Univ. Technol., Delft, The Netherlands*. – 1996. – P. 16-20.
4. Berg J. *Probabilistic reasoning in fuzzy rule-based systems* / J. van den Berg, U. Kaymak, W.-M. van den Bergh // *Soft Methods in Probability, Statistics and Data Analysis*. –

*Advances in Soft Computing, Physica Verlag, Heidelberg*. – 2002. – P. 189-196.

5. Петровский А.Б. *Многокритериальное ранжирование объектов по противоречивым данным* / А.Б. Петровский // *Искусственный интеллект*. – Донецк. – 2006. – №2. – С. 215-220.

6. Lee M. *Modeling of hierarchical fuzzy systems* / M.-L. Lee, H.-Y. Chung, F.-M. Yu // *Fuzzy Sets and Systems– Elsevier*, 2003. – №138. – P. 343-361.

7. Takagi T. *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control* / T. Takagi, M. Sugeno // *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., IEEE*. – 1985. – №15. – P. 116-132.

8. Tsekouras G. *A hierarchical fuzzy-clustering approach to fuzzy modeling* / G. Tsekouras, H. Sarimveis, E. Kavakli, G. Bafa // *Fuzzy Sets and Systems*. – Elsevier. – 2005. – №107. – P. 245-266.

9. Liu J. *Engineering System Safety Analysis and Synthesis Using the Fuzzy Rule-based Evidential Reasoning Approach* / J. Liu, J.B. Yang, J. Wang and H.Sing Sii // *Quality and Reliability Engineering International - John Wiley & Sons, Ltd*. – 2005. – №21. – P. 387-411.

10. Meghdadi A. *Probabilistic Fuzzy Logic and Probabilistic Fuzzy Systems* / A.H. Meghdadi, M.R. Akbarzadeh // *Fuzzy Systems, 2001. – The 10th IEEE International Conference on, 2001. – P. 1127-1130.*

11. Ragu G. *Hierarchical fuzzy control* / G.V.S. Raju, J. Zhou, R.A. Kisner // *International Journal of Control*. – 1991. – №54. – P. 1201-1216.

12. Wang L. *Analysis and Design of Hierarchical Fuzzy Systems* / L.X. Wang // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – IEEE Computational Intelligence Society*. – №7. – P. 617-624.

13. Takács M. *Soft Computing-Based Risk Management - Fuzzy, Hierarchical Structured Decision-Making System* / Márta Takács // *Risk Management Trends. – InTech Europe*. – 2011. – P.28-46.

14. Berg J. *Financial markets analysis by using a probabilistic fuzzy modeling approach* / J. van den Berg, U. Kaymak, W.-M. van den Bergh // *International Journal of Approximate Reasoning*. – Elsevier. – 2004. – №35. – P. 291-305.

15. Власенко А.Н. *Иерархические системы нечеткого вывода Такаги-Сугено в задачах управления рисками* / А.Н. Власенко // *Матер. XVI междунар. молод. форуму «Радиоелектроника и молодь в XXI веке», 17-19 апреля 2012г., Харьков*. – X.: ХНУРЕ. – 2012. – С. 69-70.

Поступила в редколлегию 26.12.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Филатов, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### ІЄРАРХІЧНА НЕЧІТКО-ЙМОВІРНІСТНА МОДЕЛЬ У ЗАДАЧАХ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ

О.М. Власенко, Є.І. Кучеренко

В роботі розглянуто проблему аналізу неповної, неточної та суперечливої інформації в задачах керування ризиками з використанням нечіткої логіки та ймовірного підходу до міркувань. Запропонована модифікація ієрархічної знання-орієнтованої системи нечіткого логічного виведення Такагі-Сугено з нечітко-ймовірнісними локальними підмоделями.

**Ключові слова:** керування ризиками, нечітка логіка, ієрархічні системи, нечітко-ймовірнісні правила.

### HIERARCHICAL FUZZY-PROBABILISTIC MODEL FOR RISK-MANAGEMENT

A.N. Vlasenko, Y.I. Kucherenko

In the paper considered the problem of analysis of incomplete, inaccurate and contradictory information in the field of risk management by using fuzzy logic and probabilistic approach for reasoning. Proposed modification of the hierarchical Takagi-Sugeno knowledge-oriented fuzzy inference system with the fuzzy-probabilistic local submodels.

**Keywords:** risk management, fuzzy logic, hierarchical systems.