

*О.М. Ларін, д.т.н., професор, НУЦЗУ,
Є.М. Грінченко, к.т.н., доцент, докторант, НУЦЗУ,
Д.Л. Соколов, к.т.н, доцент, НУЦЗУ,
Р.М. Федоренко, заст. нач. НПРЧ, НУЦЗУ*

ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ДЛЯ ОЦІНКИ ПОЖЕЖНОГО РИЗИКУ РЕЗЕРВУАРУ З НАФТОПРОДУКТОМ

Запропоновано для аналізу і оцінки індивідуального ризику від пожежі резервуару з нафтопродуктом використовувати систему нечіткої логіки на основі алгоритму Мамдані. Запропоновані логістичні зміни, проведено їх визначення. Розроблено відповідну систему нечіткої логіки.

Ключові слова: резервуар, нечітка логіка, індивідуальний ризик, алгоритм Мамдані.

Постановка проблеми. Рішення проблеми багатофакторного управління (до якої відноситься і комплексна оцінка пожежного ризику) є нетривіальним завданням [1]. Складність полягає в тому, що із зростанням числа врахованих факторів зростає ступінь неточності або нечіткості. Нечіткість полягає в тому, що в конкретний момент часу не завжди вдається достовірно виміряти (оцінити) всі вхідні величини, нечіткість також виникає внаслідок самого характеру вхідної величини. Ці обставини значно ускладнюють використання відомих методів оцінки ризику пожежі, які базуються на розрахунково-ймовірнісних залежностях. Також суттєвим питанням є підтвердження адекватності отриманих прогнозних оцінок.

У зв'язку з цим важливою проблемою щодо систем оцінки ризику є побудова моделей, що використовують алгоритми з використанням нечіткої логіки, зокрема при прогнозуванні ризику пожежі в резервуарі з нафтопродуктом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Невизначеності у системах прийняття рішень компенсують за допомогою різноманітних методів штучного інтелекту. Для ефективного прийняття рішень при невизначеності умов функціонування системи застосовують методи на основі правил нечіткої логіки. Такі методи ґрунтуються на нечітких множинах і використовують лінгвістичні величини і висловлювання для опису стратегій прийняття рішень [2-4]. Важливим застосуванням теорії нечітких множин є контролери нечіткої логіки, які використовуються у різноманітних системах керування, зокрема у побутових приладах. Замість математичної моделі для опису системи такі контролери використовують інтегровані знання експертів, які за структурою подання наближаються до ро-

змовної мови і описуються за допомогою лінгвістичних змінних та нечітких множин [5-7]. В монографії [8] запропоновано використання системи нечіткої логіки при оцінці екологічних ризиків, але не надано ніяких рекомендацій щодо конкретних алгоритмів. Проте, використанню системи нечіткої логіки для оцінювання ризиків виникнення пожеж на підприємствах нафтопереробного комплексу приділено недостатню увагу.

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є використання методів нечіткої логіки (алгоритм Мамдані) для проведення оцінки рівня ризику при виникненні пожежі в резервуарі з нафтопродуктом.

Нечітка множина (fuzzy set) являє собою сукупність елементів довільної природи, щодо яких не можна з повною визначеністю стверджувати – чи належить той чи інший елемент аналізованої сукупності даній множині чи ні [9].

Управління з нечіткими множинами тісно пов'язане з таким поняттям, як система нечіткого виводу. В роботі розроблено модель використання

Побудова системи нечіткого виводу складається з наступних етапів:

- фазифікація вхідних змінних;
- формування бази нечітких правил;
- агрегування підумови;
- активація підвисновків;
- акумуляція висновків;
- дефазифікація вихідних змінних.

Розглянемо більш детально кожен з етапів.

Фазифікація вхідних змінних. На етапі фазифікації для кожної лінгвістичної змінної визначається безліч відповідних їй лінгвістичних термів. А для кожного певного лінгвістичного терма визначається відповідна функція приналежності.

Метою етапу фазифікації є встановлення відповідності між конкретним (чітким, crisp) значенням окремої вхідної змінної і значенням функції приналежності відповідного їй терма вхідної лінгвістичної змінної. Після завершення цього етапу для всіх вхідних змінних повинні бути визначені конкретні значення функцій приналежності по кожному з лінгвістичних термів [8].

Формування бази нечітких правил. База нечітких правил складається з записів виду

ПРАВИЛО_X: ЯКЩО "Умова_X" ТО "Висновок_X" (F_x),

де F_x – ваговий коефіцієнт відповідного правила.

Тут вираз, що стоїть після ЯКЩО, називають антцедентом, передумовою, умовою. А вираз, що стоїть після ТО - консеквентом, висновком, операцією.

Припустимо, що базу знань утворюють два нечітких правила:

П1: ЯКЩО Poragenie = легке ТО Risk = прийнятний;

П2: ЯКЩО Poragenie = сильне ТО Risk = неприйнятний.

Тут Poragenie і Risk представляють собою нечіткі лінгвістичні змінні, задані своїми лінгвістичними термами (рис. 1).

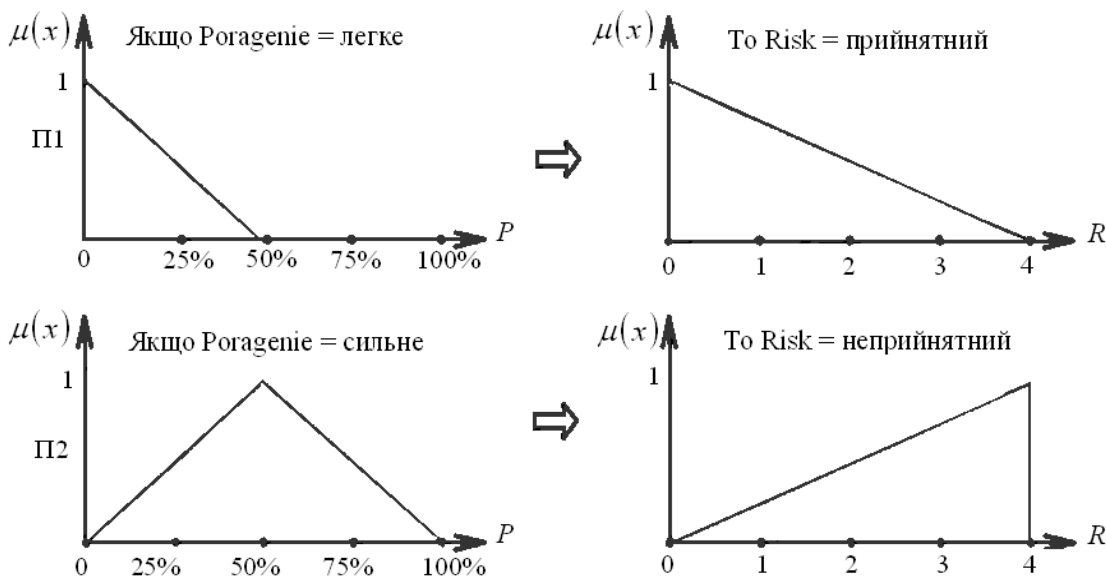


Рис. 1. Графічна ілюстрація нечітких правил

До бази нечітких правил пред'являються інші вимоги. По-перше це вимога до кінцівки самої бази. По-друге - вимога до узгодженості щодо використовуваних лінгвістичних змінних.

Агрегування підумови. На етапі агрегування визначається ступінь істинності підумови кожного правила "Умова X". Це необхідно зробити, так як в загальному випадку умова може містити кілька лінгвістичних змінних, пов'язаних в єдиний логічний вираз. У тому випадку, коли умова правила містить всього одну лінгвістичну змінну, процес агрегування носить тривіальний характер і по суті відсутня.

Активация підвисновків. На даному етапі знаходяться ступені істинності кожного з підвисновків нечітких правил "Висновок X". Існує кілька процедур відшукування ступеня істинності висновку. Ось деякі з них:

- min-активация;
- prod-активация;
- average- активация.

Ілюстрацією етапів фазифікації, агрегування підумови і активации підвисновків нечіткого правила може служити рис. 2.

В даному прикладі використовується min-активация підвисновку, сенс якої полягає в обмеженні зверху нечіткої множини відповідного лінгвістичного терма вихідної змінної рівнем, отриманим в результаті фазифікації і агрегування підумов. Практика показує, що найбільш часто використовуваний спосіб активации підвисновків це якраз min-активация.

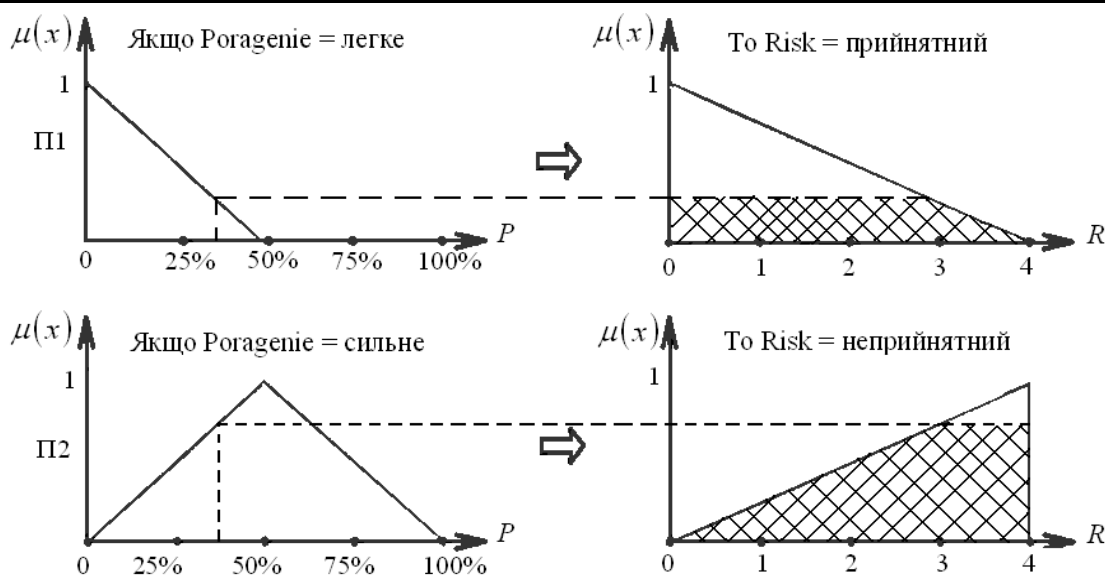


Рис. 2. Активація нечітких правил

Якщо умову нечіткого правила П1 позначити через А, а висновок правила через В:

$$A = \{\text{Poragenie} = \text{легке}\}$$

$$B = \{\text{Risk} = \text{прийнятний}\},$$

то наше нечітке правило, що відбиває знання експерта, являє собою нечітке причинне відношення передумови та висновку:

$$F = A \rightarrow B.$$

Назвемо F нечітким відношенням [8].

Акумуляція висновків являє собою процес знаходження функції приналежності для кожної з вихідних лінгвістичних змінних. В даний час найбільш широко використовуваними є методи об'єднання та підсумовування окремих функцій приналежності (рис. 3).

На рис. 3 показаний варіант max-акумуляції, найбільш часто застосовуваний на практиці.

Дефаззіфікація вихідних змінних являє собою процедуру знаходження звичайного (чіткого) значення вихідної змінної (метрики) по нечітким значенням відповідної вихідній лінгвістичної змінної. Найбільш поширені методи дефаззіфікації:

- метод центру ваги;
- метод центру площі;
- метод лівого модального значення;
- метод правого модального значення.

На підставі перелічених вище етапів шляхом комбінації їх різновидів можна отримати різні алгоритми нечіткого висновку. Найбільш відомі з них:

- алгоритм Мамдані (Mamdani);
- алгоритм Цукамото (Tsukamoto);
- алгоритм Ларсена (Larsen);
- алгоритм Сугено (Sugeno).

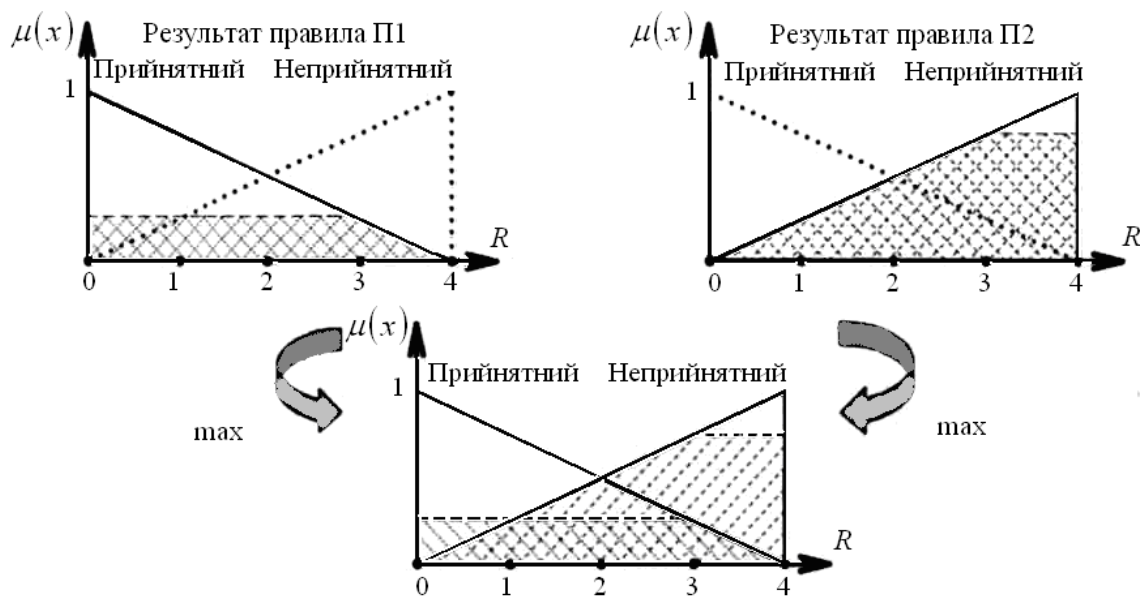


Рис. 3. Акумуляція висновків

В даний час найбільше практичне застосування отримали алгоритми Мамдані і Сугено.

Метод оцінки індивідуального ризику набуває характеру нечіткої системи, а сам процес обчислення складається з основних етапів формування нечіткого відгуку: фазифікація, композиція і дефазифікація [10].

Фазифікація в даному випадку пов'язана з визначенням нечітких множин, що характеризують вхідні змінні - ймовірність аварії (розгерметизації резервуара) і ймовірність ураження. Такі множини описуються характеристичними функціями, приймаючими значення в інтервалі від нуля до одиниці, що визначають ступінь переваги відповідного фактора. В деяких випадках такі функції можна визначити об'єктивно, ґрунтуючись на статистичні дані, в інших (що зустрічається найчастіше) на основі експертної оцінки. У розглянутій проблемі оцінки індивідуального ризику ми маємо приклади і того й іншого підходу.

Перший етап фазифікації складається з визначення вхідних і вихідних змінних, а також відповідних їм нечітких лінгвістичних змінних. Відповідність "чітких" вхідних і вихідних змінних системи лінгвістичним змінним приведено в табл. 1.

Табл. 1. Змінні нечіткої системи оцінки ризику

Ім'я змінної	Тип змінної	Діапазон значень	Відповідна лінгвістична змінна
Ймовірність аварії, 1/рік	Вхідна	$10^{-6} \dots 10^{-4}$	Інцидент (Incident)
Ймовірність згоряння, 1/рік	Вхідна	$10^{-2} \dots 0,1$	Запалювання (Fire)
Ймовірність ураження, %	Вхідна	$0 \dots 100\%$	Ураження (Progenies)
Ймовірність присутності	Вхідна	$0,1 \dots 1$	Присутність (Presence)
Індивідуальний ризик R_i , 1/рік	Вихідна	$10^{-8} \dots 10^{-4}$	Ризик (Fuzzy risk)

На другому етапі фазифікації для кожної лінгвістичної змінної слід задати набір термінів і відповідні їм нечіткі множини.

На другому етапі фазифікації для кожної лінгвістичної змінної слід задати набір термінів і відповідні їм нечіткі множини.

Лінгвістична змінна індивідуальний ризик (Fuzzy_risk) має у своєму складі три терма:

$$\text{Fuzzy_risk} = \{\text{прийнятний (Acceptable)}, \text{допустимий (Satisfy)}, \text{не допустимий (Unacceptable)}\}.$$

Нечіткі множини, відповідні термам лінгвістичної змінної індивідуальний ризик (Fuzzy_risk) визначаються відповідними характеристичними функціями, які в свою чергу задаються аналітично [10]:

$$\text{Fuzzy_risk (прийнятний)} = -1 \cdot 10^5 R_i + 1$$

$$\text{Fuzzy_risk (допустимий)} = \begin{cases} 1,05 \cdot 10^6 R_i - 0,05, & R_i < 10^{-6} \\ -1 \cdot 10^4 R_i + 1, & R_i > 10^{-6} \end{cases}$$

$$\text{Fuzzy_risk (не припустимий)} = 0,01 \cdot 10^6 R_i - 0,01$$

де R_i – індивідуальний ризик, змінюється в діапазоні $[10^{-8} \dots 10^{-4}]$, що відповідає вимогам [11]. Значення індивідуального ризику менше 10^{-8} , що лінгвістично визначаються як вкрай малі, не враховувалися в діапазоні значень вихідної змінної індивідуальний ризик тому що розроблювальна нечітка система цілеорієнтована на виявлення контрольованого і не прийнятного ризиків. А похибка в області значень вкрай малого ризику не становить небезпеки, але, при необхідності, без особливих зусиль можна розширити діапазон значень і провести необхідне довизначення правил на етапі композиції.

Характеристичні функції (рис. 4) показують, як в одному і тому ж діапазоні значень змінної, Fuzzy_risk змінюється вага прийнятного, допустимого і недопустимого значення ризику. Точки Fuzzy_risk (Індивідуальний ризик = 10^{-8}) = прийнятний (Acceptable), Fuzzy_risk (Індивідуальний ризик = 10^{-6}) = допустимий (Satisfy) і Fuzzy_risk (Індивідуальний ризик = 10^{-4}) = не припустимий (Unacceptable) визначають чіткі орієнтири оцінки ризику в нечіткому просторі можливих рішень.

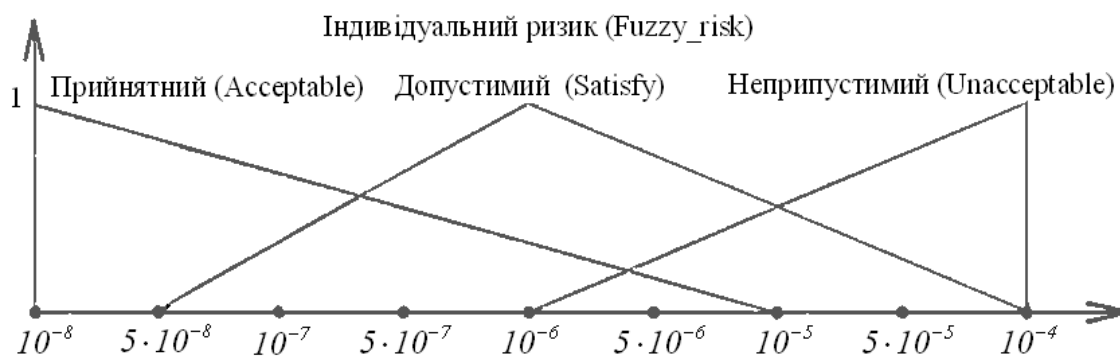


Рис. 4. Лінгвістична змінна індивідуальний ризик (Fuzzy_risk)

Аналогічно визначаються нечіткі змінні інцидент (Incident), запалювання (Fire), ураження (Porogenie) і присутність (Presence). (рис. 5 – рис. 8)

Ймовірність аварії (Incident = 10^{-6}) = низька (Low), ймовірність аварії (Incident = 10^{-5}) = середня (Middle), ймовірність аварії (Incident = 10^{-4}) = часта (High).

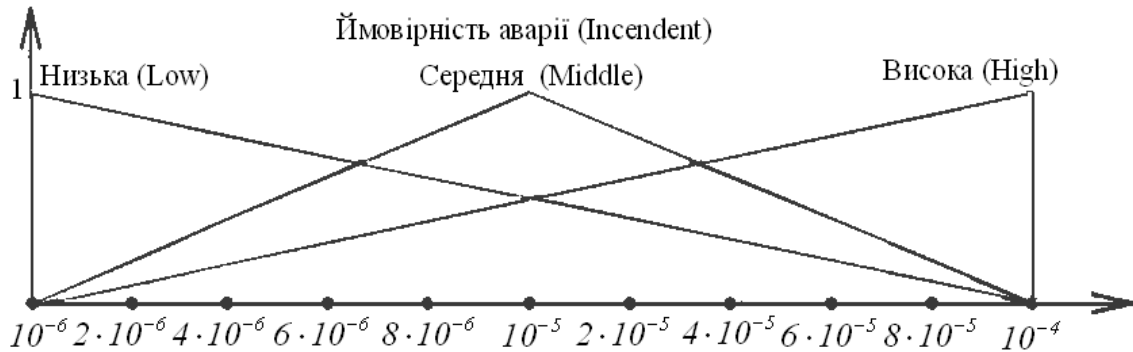


Рис. 5. Лінгвістична змінна ймовірність аварії (Incident)

Ймовірність запалювання (Fire = 10^{-2}) = рідкісна (Rarely), ймовірність запалювання (Fire = 0,1) = часта (Often).



Рис. 6. Лінгвістична змінна запалювання (Fire)

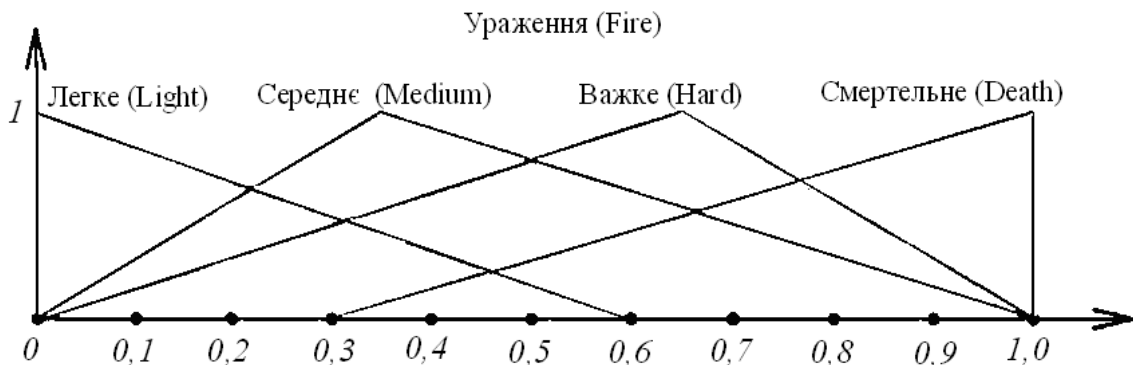


Рис. 7. Лінгвістична змінна поразка (Porogenie)

Ураження (Porogenie) = {легке (Light), середнє (Medium), важке (Hard), смертельне (Death)}, так як, згідно [12], ймовірність ураження

персоналу визначається в залежності від пробіт-функції у відсотках, то резонно припустити (суб'єктивно), що характеристичні функції, що задають нечіткі безлічі для термів змінної ураження (Poragenie), залежать лінійно від імовірності ураження.

Присутність (Presence) = {звичайна (Usually), постійна (Constant)}.

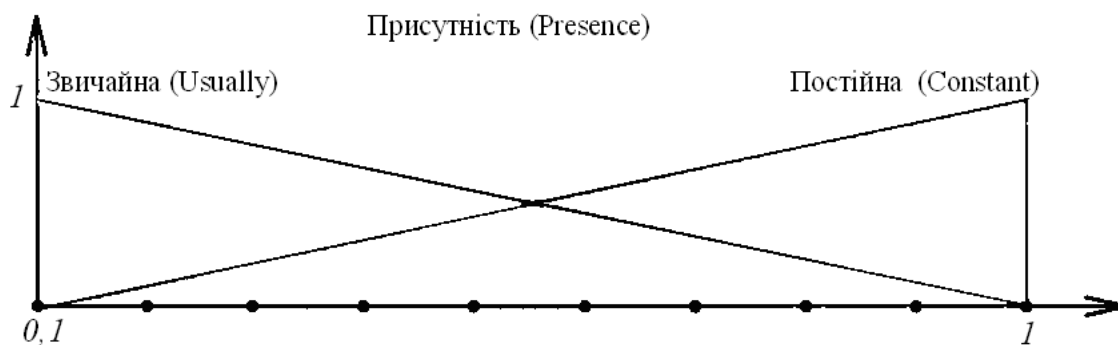


Рис. 8. Лінгвістична змінна присутність (Presence)

Композиція. На етапі композиції слід задати умови відповідності (правила) між вхідними і вихідними нечіткими змінними. Структура правил визначається форматом "if-then-else", а семантика – знаннями та інтуїцією експертів. Список нечітких правил може поповнюватися і змінюватися в процесі відпрацювання та налагодження алгоритму прийняття рішення. Розглянута система матиме, чотири групи по дванадцять правил, всього сорок вісім правил прийняття рішень. Далі ілюструються деякі з них:

1. **Запалювання = Рідкісне, Присутність = Звичайна**, ймовірність джерела запалювання характеризується як рідкісна, ймовірність присутності звичайна:

При високій ймовірності аварії і ймовірності смертельного ураження, індивідуальний ризик повинен бути не допустимий:

Якщо **Інцидент = Високий і Ураження = Смертельне** то **Індивідуальний ризик = Не допустимий**

При високій ймовірності аварії і ймовірності важкого ураження, індивідуальний ризик повинен бути допустимим:

Якщо **Інцидент = Високий і Ураження = Важке** то **Індивідуальний ризик = Допустимий**

При високій ймовірності аварії і ймовірності середнього та легкого ураження, індивідуальний ризик повинен бути прийнятним:

Якщо **Інцидент = Високий і Ураження = Середнє** то **Індивідуальний ризик = Прийнятний**

Якщо **Інцидент = Високий і Ураження = Легке** то **Індивідуальний ризик = Прийнятний**

При середній ймовірності аварії та ймовірності смертельного

ураження, індивідуальний ризик повинен бути не допустимий:

Якщо Інцидент = Середній і Ураження = Смертельне то Індивідуальний ризик = Не допустимий

При середній ймовірності аварії та ймовірності важкого, середнього і легкого ураження, індивідуальний ризик повинен бути прийнятним:

Якщо Інцидент = Середній і Ураження = Важке то Індивідуальний ризик = Прийнятний

Якщо Інцидент = Середній і Ураження - Середнє то Індивідуальний ризик = Прийнятний

Якщо Інцидент = Середній і Ураження = Легке то Індивідуальний ризик = Прийнятний і т.д.

Пропоновані рішення можуть бути визначені «точніше», хоча вони гарантують добре рішення в нетривіальних випадках, але рішення ситуацій з високим ступенем складності може бути покращено. У складніших ситуаціях необхідно до визначення правил із залученням всіх додаткових чинників, що уточнюють і доповнюють ситуацію. Це може бути обумовлено урахуванням таких факторів, як: вірогідність виникнення парогазової суміші (ПГВС) вибухонебезпечної концентрації; щільність розподілу людей на розглянутому майданчику (частини об'єкта), чисельності персоналу на об'єкті і т. п.

Крім того, термальність лінгвістичних змінних може бути збільшена, наприклад Запалювання = {Рідкісне, Середнє, Часте}. При цьому набір правил може виявитися більш багатим і водночас більш тонко реагуватиме на ситуацію, що складається при оцінці ризику.

Висновки. Підсумовуючи вищезазначене можна відзначити, що найбільш адаптованим і перспективним математичним апаратом, що дозволяє реалізувати наукову задачу розробки методу оцінки індивідуального пожежного ризику резервуарних парків в умовах багатофакторності і невизначеності, є апарат теорії нечітких множин, що дозволяє внести в дану область методологію системного аналізу. У зв'язку з великим динамічним діапазоном чинників, що беруть участь у формуванні пожежного ризику, з метою розробки нового методу оцінки індивідуального пожежного ризику, доцільно використовувати алгоритм нечіткого виводу Мамдані. Створення методу оцінки індивідуального пожежного ризику, заснованого на теорії нечітких множин доцільно реалізувати на універсумі змінних, що мають широкий діапазон значень, таких як ймовірність аварії і ризик.

ЛІТЕРАТУРА

1. Искусственный интеллект. - В 3-х кн. Кн. 2. Модели и методы: Справочник / Под ред. Д.А. Поспелова - М: Радио и связь, 1990. – 304 с.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение

- к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
3. Zimmerman H. J. Fuzzy Set Theory and Its Applications / H.J. Zimmerman. – Kluwer, Dordrecht, 1991. – 315p.
 4. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения: Монография / С.Л. Блюмин, И.А. Шуйкова, П.В. Сараев, И.В. Черпаков. – Липецк: ЛЭГИ, 2002. – 113 с.
 5. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant / E.H. Mamdani // Proc. IEEE 121, 1974. – P. 1585-1588.
 6. Sugeno M. Industrial applications of fuzzy control / M. Sugeno, ed. – North-Holland, Amsterdam, 1985. – 269p.
 11. Theoretical aspects of fuzzy control / H.T. Hguen, M. Sugeno, R. Tong, R.R. Yager. – New York, John Wiley & Sons, 1995. – 359 p.
 7. Mudi R.K. A self-tuning fuzzy PI controller / R.K. Mudi, N.R. Pal // Int. Jo. Fuzzy sets and systems. – № 115. – 2000. – P. 327-378.
 8. Лисиченко Г.В. Природний, техногенний та екологічний ризици: аналіз, оцінка, управління. / Г.В. Лисиченко, Ю.Л. Забулонов, Г.А. Хміль // К.: Наукова думка, 2008.–543 с.
 9. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков // СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736с.
 10. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун, В.Б. Силов, В.Б. Тарасов; под ред. Д.А. Поспелова. //М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1986. – 312с.
 11. Безопасность жизнедеятельности. / Под ред. Белова СВ. – М.: Высшая школа, 1999. – 448с.
 12. Акимов В.А. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. / В.А. Акимов, В.Д. Новиков, Н.И. Радаев // М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2001. – 341с.

А.Н. Ларин, Е.Н. Гринченко, Д.Л. Соколов, Р.Н. Федоренко

Использование теории нечетких множеств для оценки пожарного риска резервуара с нефтепродуктом

Предложено для анализа и оценки индивидуального риска от пожара резервуара с нефтепродуктом использовать систему нечеткой логики на основе алгоритма Мамдани. Предложенные логистические переменные, проведено их определение. Разработана соответствующая система нечеткой логики.

Ключевые слова: резервуар, нечеткая логика, индивидуальный риск, алгоритм Мамдани.

A.N. Larin, Ye.N. Grinchenko, D.L. Sokolov, R.N. Fedorenko

Using fuzzy sets theory to assess the fire risk from petroleum reservoir

For the analysis and evaluation of individual risk from fire tank with mineral oil it is proposed to use fuzzy logic system based on Mamdani algorithm. The logistic variables are proposed, as well as their definitions. A corresponding system of fuzzy logic is elaborated.

Keywords: petroleum reservoir, fuzzy logic, individual risk, Mamdani algorithm.