

Моделі надзвичайних ситуацій техногенного характеру для систем підтримки прийняття рішень

В. О. Яковенко, Ю. В. Ульяновська, Т. Ю. Яковенко

Розглядаються питання контролю та попередження виникненню надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Завчасне виявлення критичних станів, точність та достовірність параметрів систем моніторингу є запорукою запобігання техногенним катастрофам різного рівня.

Запропоновано модель надзвичайної ситуації як нечіткої ситуації, що базується на теорії нечітких множин та понятті лінгвістичної змінної, визначена множина показників, які повністю описують вражаючі фактори надзвичайної ситуації. Множина показників є об'єднанням як кількісних, так і якісних даних. Показано, що запропонована нечітка модель узгоджується з характеристикам та умовами виникнення надзвичайної ситуації на об'єктах критичної інфраструктури і, в той же час, дає можливість обробки як кількісних так і якісних показників. Такий підхід дозволяє використовувати нечіткі відношення для формування груп подібності і будувати бази правил в системах підтримки прийняття рішень з урахуванням подібності ситуацій, що підвищує ефективність систем підтримки прийняття рішень.

В екстремальних умовах оперативне прийняття кваліфікованих управлінських рішень є найважливішою задачею, яка вирішується, в тому числі, за допомогою систем підтримки прийняття рішень. Оскільки для формування бази правил інтелектуальних системи необхідним є залучення експертів, в роботі запропоновано метод представлення та обробки експертних даних що дозволяє визначити характеристики їх узгодженості і обрати відповідний метод обробки. Запропоновані підходи до моделювання надзвичайних ситуацій дозволять проводити ідентифікацію ситуацій з метою контролю, попередження та формуванні комплексу дій у випадку настання надзвичайної ситуації, що дозволить зберегти людські життя та природні ресурси

Ключові слова: надзвичайна ситуація, нечітка ситуація, експертна інформація, системи підтримки прийняття рішень

1. Вступ

Розробка технологій забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури, особливо під час надзвичайних ситуацій, є важливою складовою економіки та безпеки держави. Будь-які надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру можуть спричиняти значні матеріальні збитки, порушення стану довкілля та людські жертви [1]. Забруднення води, яке може супроводжувати такі надзвичайні ситуації, порушує стандарти Міжнародної Федерації Товариств Червоного Хреста та Червоного Півмісяця [2]. Особливо руйнівними для навколишнього середовища

є аварії на таких об'єктах підвищеної небезпеки як підприємства хімічної, металургійної, нафтопереробної та іншої промисловості. Результатом техногенних катастроф на таких об'єктах є раптовий вихід із ладу машин, механізмів та агрегатів під час експлуатації. Це супроводжується серйозними порушеннями виробничого процесу, вибухами, утворенням осередків пожеж, радіоактивним, хімічним або біологічним зараженням великих територій, ураженням та загибеллю людей [3]. Основні нещасні випадки в галузях хімічної промисловості відносно рідкісні, але заподіяна шкода працівникам, втрата майна, переривання бізнесу та шкода для навколишнього середовища дуже серйозні [4]. За даними Swiss Re Institute [5] в 2018 році відбулося 304 катастрофи, аналогічні до, тих, які трапились у 2017 році. З них 181 були стихійними катастрофами (184 у 2017 році), а 123 – техногенними катастрофами. Загальні економічні збитки від стихійних і техногенних катастроф у 2019 році склали близько 140 мільярдів доларів США проти 176 мільярдів доларів США в 2018 році. Природні катастрофи посилюються через дисбаланс природного середовища, в деяких випадках це опосередковано пов'язано з людською діяльністю [6].

Надзвичайні ситуації характеризуються складністю передбачення, раптовістю виникнення, швидкістю розвитку, неповнотою і невизначеністю вихідної інформації, характер наслідків залежить від ситуації і має ланцюговий характер. Завчасне виявлення НС, точність та достовірність параметрів систем моніторингу є запорукою запобігання техногенних катастроф різного рівня. Вирішальну роль під час надзвичайних ситуацій у різних установах відіграють оператори. Коли у виробничому процесі виникають аномалії, оператор часто має обмежений час або на виправлення, або на евакуацію, перш ніж ситуація стане смертельною [7]. Системи сигналізації відіграють важливу роль у промисловості для сповіщення операторів про аномальні ситуації. На реальних підприємствах у системах сигналізації існує проблема хибних сигналів та пропущених сигналів, що заважає судженням операторів при прийнятті рішення [8]. Якщо виникає надзвичайна подія, вона може перетворитися на різні можливі надзвичайні ситуації через динамічні особливості надзвичайних подій. Перш ніж приймати рішення, особа, яка приймає рішення, повинна зібрати усю інформацію (можливі ситуації, можливі втрати, спричинені різними можливими ситуаціями тощо). У реальній ситуації, через неадекватну або неповну інформацію, особливо на ранніх стадіях надзвичайної події, особі, що приймає рішення, важко оцінити усі фактори та прийняти адекватне рішення [9]. Існуючі на сьогоднішній день автоматизовані системи здебільшого є або моніторинговими системами, або моделюють поширення НС, або орієнтовані на евакуаційні дії при настанні НС. Саме тому актуальною є розробка інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) для виявлення та попередження надзвичайних ситуацій а також надання підтримки при прийнятті оперативних рішень у випадку настання НС в умовах недостовірних або не повних даних. Розробка систем прийняття рішень вимагає побудови адекватних математичних моделей предметних областей, об'єктів контролю, з урахуванням досвіду ліквідації та дій в умовах НС.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Розробка ефективних моніторингових систем та СППР передбачає моделювання усіх етапів и повинно охоплювати контроль показників технологічного процесу, завдання параметрів виникнення тривожної ситуації, моделювання поширення та дій у випадку настання НС. У роботі [8] зазначено, що задані значення тривоги, порядок динамічної тривоги та алгоритм тривоги є трьома основними елементами оповіщення та сигналізації. Запропоновано стратегію оптимізації сигналів, але при цьому питання неповноти інформації яка виникає за таких умов не розглядається.

Для вирішення різноманітних проблем прийняття рішень в умовах НС роботі [9] пропонується використовувати метод перспектив, який базується на оцінці альтернатив. На основі існуючих методів прийняття рішень, заснованих на методі перспектив, ідеальною альтернативою зазвичай є та, яка має найбільше загальне значення перспективи. Однак в реальному світі іноді ідеальна альтернатива не є оптимальною для подолання надзвичайної події, оскільки існує багато інших факторів, які слід враховувати при альтернативному відборі, наприклад, вартість альтернативи, кількість ресурсів реагування на надзвичайні ситуації тощо. Тому виникає проблема, щоб альтернативний вибір був близьким до реальної ситуації.

У роботі [10] запропоновано використовувати для моделювання НС віртуальну реальність, імерсивні і інтерактивні технології. Але дослідження обмежується розробкою симуляторів для навчання персоналу в надзвичайних ситуаціях.

У роботах [11–13] приділяється моделюванню НС з урахуванням її просторової та часової складової. У роботі [11] моделювання відбувається з припущеннями, що НС відбуваються тільки в межах обмеженої територіальної системи. Оскільки предметною областю дослідження є НС природнього характеру, то передбачається декілька осередків її виникнення. Ситуації техногенного характеру не досліджуються. У роботі [12] розглядаються НС ситуації на транспорті, які пов'язані в загрозою вибухів. Для моделювання використовуються теоретико-множинний підхід у комбінації з продукційними моделями при відомих параметрах НС. Але в реальних умовах не завжди вдається визначити усі параметри. У роботі [13] модель ліквідації НС будується на припущеннях, що інформація про надзвичайну ситуацію має детермінований характер; надзвичайна ситуація має n одночасно існуючих чинників ураження. У моделі використовується такі статистичні категорії як відносна частота та математичне очікування. В той же час обмеження в спостереженні за НС, недостатня точність виміру параметрів навколишнього середовища ускладнює застосування статистичних підходів [11].

Незважаючи на те, що існують різні моделі, жодна з них не є загальноприйнятою. У роботі [14] для попередження та прогнозування аварійних ситуацій або відмов систем пропонується використовувати моделі причинно-наслідкового зв'язку, що створюють НС. Автори приділяють увагу принципам безпеки системи та аналізу причини виникнення аварій, але сама модель аварійної ситуації відсутня. Наголошується, що для виявлення взаємозв'язків та впливу прихованих факторів, а також виявлення систематичних порушень, доціль-

ним є залучення експертів, знання та досвід яких є основою для формування бази даних та бази правил інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Експерт часто аналізує ситуацію в цілому, аналізує, які рішення ухвалювалися раніше в подібних ситуаціях [15]. Потім він або безпосередньо використовує ці рішення, або, за необхідності, адаптує їх до обставин, що змінилися для конкретної проблеми. Моделювання такого підходу до вирішення проблем, заснованого на досвіді минулих ситуацій, привело до появи технології логічного виведення, заснованого на прецедентах [15]. У ряді ситуацій метод виведення на прецедентах має серйозні переваги в порівнянні з висновком, заснованим на правилах, але в той же час існують дві проблеми: пошук найбільш відповідних прецедентів та подальша адаптація знайденого рішення.

Методи моделювання та маніпулювання базою знань, яка є основою інтелектуальних СППР, можна згрупувати на основі 4 категорій:

- 1) база лінгвістичних знань;
- 2) база експертних знань;
- 3) онтологія;
- 4) база пізнавальних знань [16].

Частиною висновків цього дослідження є встановлення високої залежності бази лінгвістичних знань, бази знань експертів та онтології з нестабільними експертними знаннями. У той же час проблема усунення нестабільності експертних знань не розглядається.

Одним із варіантів її вирішення є використання усередненої оцінки експертів на основі середньозваженого значення тих оцінок, які надали експерти [17]. Запропонований підхід може бути використаним у випадку, коли отримані результати обробки експертної інформації представлені у вигляді, до якого може бути застосовані статистичні методи, що у випадку якісних або нечітких значень є проблемою.

Аналіз літературних джерел дозволив зробити висновки, що існуючі моделі для вирішення задач підтримки прийняття рішень в умовах НС, в основному, зводяться до моделювання процесів ліквідації наслідків та розповсюдження НС на місцевості, дій персоналу в умовах НС. Питання аналізу параметрів, які описують вражаючі фактори, та методи їх обробки з урахуванням недостовірних та неповних характеристик інформації не розглядається. У той же час дане питання є важливим при ідентифікації НС та при формуванні кваліфікованих управлінських рішень щодо дій в умовах її виникнення.

Задача побудови моделі НС вирішується, в основному, з точки зору побудови просторово орієнтованих моделей з урахуванням часової складової. У той же час для контролю за станом об'єкта управління та подальшої ідентифікації імовірної НС і прийнятті рішень в надзвичайних умовах є необхідність в її ідентифікації за параметрами вражаючих факторів. Важливим є завдання параметрів небезпечної ситуації. Статистичні методи опису НС мають обмеження щодо застосування для вирішення поставленої задачі. Залишається до кінця не вирішеним питання обробки експертних знань.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є моделювання НС техногенного характеру в умовах нечітких та не повних даних з використанням експертної інформації для побудови на їх основі систем підтримки прийняття рішень.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести декомпозицію проблеми запобігання виникненню НС та розробити математичні моделі НС з визначенням вражаючих факторів надзвичайних ситуацій;
- розробити метод обробки експертної інформації з урахуванням і нечіткого характеру даних;
- провести чисельну реалізацію запропонованих моделей та методів.

4. Розробка математичної моделі надзвичайної ситуації з визначенням вражаючих факторів.

Запобігання виникнення техногенних аварій є комплексною науково-практичною проблемою. Серед комплексу задач які є складовою частиною зазначеної проблеми можна виділити наступні:

- аналіз досвіду попередніх надзвичайних ситуацій;
- прогнозування та моделювання аварійних ситуацій на кожному потенційно небезпечному об'єкті;
- контроль та оцінка ліцензійних умов провадження діяльності та надання послуг, пов'язаних з небезпечними речовинами;
- формування та оцінка виробничих планів дій при настанні НС: аварійно-рятувальні роботи, евакуація тощо;
- розробка математичних моделей для моделювання та аналізу НС;
- розробка та впровадження інтелектуальних автоматизованих систем підтримки прийняття рішень в надзвичайних ситуаціях;
- розробка та впровадження ефективних систем реагування, моніторингу та оповіщення щодо настання НС;
- виконання заходів, спрямованих на запобігання аваріям у процесі виробництва та транспортування небезпечних речовин;
- навчання персоналу та населення діям в разі виникнення НС;
- аналіз та моделювання ризиків, пов'язаних з використанням небезпечних речовин.

Визначимо математичний опис кожного вражаючого фактору НС .

Нехай $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$ – множина ознак, значеннями яких задається НС. При цьому самі значення факторів можуть бути визначені як на основі нормативних даних так і з залученням фахівців експертів. У цьому випадку якщо оцінки експерта носять якісний характер то для опису зв'язків використовуються відношення лінійного та часткового порядку, еквівалентності толерантності або будь які відношення, які не володіють такими властивостями як зв'язність, транзитивність тощо.

Кожна y_i ознака, що описує НС, може бути охарактеризована наступними показниками:

– $w(y_i)$ – вражаючий впливу фактору y_i , приймає значення «низький», «нижче середнього», «середній», «вище середнього», «високий»; експерти оцінюють вплив із відрізка $[0;1]$ – при $w(y_i)=0$ – маємо нульовий вражаючий вплив, при $w(y_i)=1$ – фактор y_i має максимальний вплив на НС;

– $v(y_i)$ – важливість фактору y_i для ідентифікації НС, приймає значення «не важливий», «важливість нижче середнього», «середня важливість», «важливість вище середньої», «висока важливість»; експерти оцінюють вплив із відрізка $[0;1]$: $v(y_i)=0$ – фактор може бути проігнорованим при ідентифікації, але сам вплив фактору y_i на НС має місце, $v(y_i)=1$ – максимальне значення для ідентифікації НС;

– $\text{int}(y_i); \overline{\text{int}}(y_i) \in [\underline{\text{int}}_i; \overline{\text{int}}_i]$ – інтенсивність y_i фактору, $\underline{\text{int}}_i$ – мінімальне значення показника, $\overline{\text{int}}_i$ – максимальне (критичне) значення показника;

– $q_1(y_i), \dots, q_n(y_i)$ – інші параметри y_i фактору.

З урахуванням введених вище позначень математична модель y_i ознаки НС може бути записана у вигляді n -мірного вектору (1):

$$y_i = \{w(y_i), v(y_i), \text{int}(y_i), q_1(y_i), \dots, q_n(y_i)\}. \quad (1)$$

Величини $w(y_i)$, $v(y_i)$ визначаються експертами з урахуванням попереднього досвіду. Для таких даних виникає потреба в розробці процедур фазифікації та дефазифікації. Параметр $\text{int}(y_i)$ визначається за допомогою датчиків, у тому числі газоаналізаторів. Параметри $\underline{\text{int}}_i$, $\overline{\text{int}}_i$ визначаються як фіксовані показники на основі нормативних документів так і розраховуються за визначеними за встановленими методикам. Так, відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України [18], порогова маса залежить від найменшої відстань від елементів потенційно небезпечного об'єкта до елементів селитебної території або промислових об'єктів. Якщо вона не перевищує 500 метрів для небезпечних речовин 1 і 2 групи і 1000 метрів для небезпечних речовин 3 групи, пороговою масою вважається маса небезпечних речовин, визначена за формулою (2):

$$Q_{ir} = Q_i * (R_x / R_{\Pi})^2, \quad (2)$$

де Q_{ir} – порогова маса небезпечної речовини, Q_i – встановлений або розрахований згідно Порядку норматив порогової маси 2 – го класу, R_x – відстань від потенційно небезпечного об'єкта до межі найближчого елемента селитебної території або промислового об'єкта, R_{Π} – гранична відстань від потенційно небезпечного об'єкта до найближчого промислового об'єкта або елемента селитебної території, починаючи з якої проводиться перерахунок нормативу порогової маси (для речовин 1 і 2 групи R дорівнює 500 метрів, для речовин 3 групи R дорівнює 1000 метрів).

У разі коли Q_{ir} менше 1 відсотка, встановленого або розрахованого згідно порядку нормативу порогової маси 2 класу, порогова маса приймається рівною 1 відсотку незалежно від відстані потенційно небезпечного об'єкта до елементів селитебної території.

З урахуванням нечіткого характеру даних представимо кожен надзвичайну ситуацію як нечітку ситуацію.

Нехай $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$ – множина ознак, значеннями яких задається НС. Формування множини ознак повинно виконуватись експертами для кожного типу НС. При моделюванні системи контролю та попередження на хімічному виробництві до множини ознак може бути віднесено територія можливого ураження, матеріальні збитки, зношеність устаткування тощо які характеризуються такими нечіткими поняттями як велика зона ураження, середня зношеність тощо. Нечіткі ознаки $y_i (i \in I = \{1, \dots, p\})$ задається відповідною лінгвістичною змінною $\langle y_i, T_i, D_i \rangle$, де $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_{m_i}^i\}$ – терм-множина лінгвістичної змінної (набір лінгвістичних значень ознаки), m_i – число термів, D_i – базова множина ознаки y_i . Для опису термів $T_j^i (j \in L = \{1, 2, \dots, m_i\})$, які відповідають значенням ознаки y_i , використовуються нечіткі змінні $\langle T_j^i, D_i, \tilde{C}_j^i \rangle$, тобто значення T_j^i характеризується нечіткою множиною \tilde{C}_j^i в базовій множині D_i [19]:

$$\tilde{C}_j^i = \{ \langle \mu_c(d) / d \rangle, d \in D_i \}. \quad (3)$$

Таким чином, в термінах теорії нечітких множин кожна НС \tilde{s} може бути розглянута як нечітка множина другого рівня (4):

$$\tilde{s} = \{ \langle \mu_s(y_i) / y_i \rangle, y_i \in Y \}, \quad (4)$$

де $\mu_s(y_i) = \{ \langle \mu_{\mu_s}(T_j^i) / T_j^i \rangle, T_j^i \in T_i \}$.

Використання такого підходу дозволяє створити модель ситуації, яка дозволить враховувати як ознаки, які описуються в нечітких термінах, так і кількісні характеристики. З урахуванням прийнятих позначень ідентифікація нечітких ситуацій може бути виконана за допомогою нечіткого включення, нечіткого рівняння та нечіткої подібності ситуацій. Це дозволить сформувати спільні для кожного класу методи контролю та попередження виникненню надзвичайної ситуації і у разі її настання обрати необхідні заходи щодо її усунення.

НС в термінах нечіткої логіки визначається наступною терм множиною значень лінгвістичної змінної $NS = \{ \langle \text{«безпечна ситуація»}, \text{«нестабільна ситуація»}, \text{«середня загроза»}, \text{«критична ситуація»}, \text{«небезпечна ситуація»} \}$.

Побудова функцій приналежності кожної нечіткої множини та визначення базової множини вимагає уніфікованого підходу оскільки система нечіткої логіки повинна використовуватись для будь яких НС. Саме тому у якості базової множини будемо розглядати відрізок $X = [0; 1]$. Позначимо через α_Σ оператор перетворення множини нечітких ознак $y_i (i \in I = \{1, \dots, p\})$ в число $k \in [0; 1]$, яке характеризує ступінь небезпечності деякої ситуації: $\alpha_\Sigma : Y \rightarrow [0; 1]$.

Оскільки система моніторингу НС – це система реального часу, контроль параметрів НС може здійснюватися як дискретно так і в безперервному режимі. Сформулюємо умови контролю за допомогою виразу (5):

$$\forall t_i, t_{i+1} [T_0, T_n]: HC(t_{i+1}) - HC(t_i) \leq k_{kr}, \quad (5)$$

де t_i, t_{i+1} – контрольні точки вимірювання; $[T_0, T_n]$ – період контролю, $HC(t_{i+1}), HC(t_i)$ – стан ситуації в моменти часу t_{i+1}, t_i .

При цьому стан об'єкта управління $SO(t)$ в момент часу t має вигляд, заданий виразом (4):

$$\forall t \in [T_0; T_n], SO(t) = G(\Delta S(t/t_0), \{\hat{y}_i\}, f(t)), \quad (6)$$

де G – оператор опису стану об'єкта управління, $\Delta S(t/t_0)$ функція зміни стану об'єкта управління в момент часу t_i в порівнянні з початковим станом в момент часу t_0 , $\{\hat{y}_i\} \in Y$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$ – множина ознак, значеннями яких задається НС, $f_{SO}(t)$ – функція управління станом об'єкта.

Враховуючи специфіку предметної області, що розглядається, а також необхідність залучення експертів до формування бази правил для ІСППР та формування системи правил управління станом об'єкта, виникає необхідність в використанні методів обробки експертної інформації. При цьому експертні думки можуть бути як узгодженими, так і не узгодженими.

5. Метод обробки експертних думок

Розглянемо питання обробки експертних знань. Нехай є n експертів $X = \{x_i\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Експертам пропонується оцінити множину $A = \{a_j\} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ альтернатив, визначаючи їх значеннями терм – множини $T^j = \{a_1^j, a_2^j, \dots, a_{k_j}^j\}$.

Визначимо оптимальну множину лінгвістичних значень альтернатив таким чином. Нехай щодо альтернативи a_j маємо терм-множину $T_i^j = \{t_{i1}^j, t_{i2}^j, \dots, t_{ik_j}^j\}$ лінгвістичних значень, сформульоване експертом x_i . Тоді $T^j = \bigcap_i T_i^j, i=1, \dots, n$. Експерт при цьому задає число μ із інтервалу $[0;1]$, яке характеризує ступінь відповідності альтернативи a_j обраному терму t_k^j . В цьому випадку отримуємо дискретну функцію приналежності, побудовану прямим методом. Думки експертів при цьому можуть збігатися або бути не узгодженими. Відповідно до цього обираються методи обробки експертних даних. Для опису альтернатив та визначення узгодженості даних, отриманих від експертів, скористаємося методом, запропонованим в [20].

Сформуємо думки експертів, отримані описаною вище процедурою, щодо кожної альтернативи a_j в матрицю $n \times k_j$.

$$\begin{array}{c|cccc}
& t_1^j & t_2^j & \dots & t_{k_j}^j \\
\hline
x_1 & \mu_1^1(a_j) & \mu_2^1(a_j) & \dots & \mu_{k_j}^1(a_j) \\
M_{jT^j}^i = x_2 & \mu_1^2(a_j) & \mu_2^2(a_j) & \dots & \mu_{k_j}^2(a_j), \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
x_n & \mu_1^n(a_j) & \mu_2^n(a_j) & \dots & \mu_{k_j}^n(a_j)
\end{array} \quad (7)$$

де x_1, \dots, x_n – експерти, t_k^j – терм, $\mu_k^i(a_j)$ функція приналежності.

Позначимо $\mu_k^i(a_j) = \mu_{jk}^i$ – значення функції приналежності альтернативи a_j терму t_k^j у відповідності з думкою x_i -го експерта.

При такому підході необхідно враховувати компетентність експертів. Для вирішення цього питання будемо використовувати частоту безпомилкових оцінок експерта, засновану на статистичних даних. Нехай x_i експерт приймав участь в N експертизах, причому в M з них його результати були вірними. Тоді вага x_i експерта позначається через $w(x_i) = M/N$, при цьому $0 \leq w_i \leq 1$.

Таким чином, у відповідності до нечіткої алгебри кожна альтернатива буде задана виразом

$$a_j = (T^j, \mu_T(a_j), w^j), \quad (8)$$

де a_j – альтернатива, T^j – терм-множина лінгвістичних значень альтернативи a_j , $\mu_T(a_j)$ – множина функцій приналежності, w^j – середня вага експертної думки відносно альтернативи a_j .

Введемо декілька умов для виразу (7):

$$\exists k' : k \leq k' \leq k_j, \sum_{i=1}^n \mu_{jk'}^i \neq 0, \sum_{i=1}^n \mu_{jk}^i = 0, k \neq k', \quad (9)$$

$$\exists t_k^j : \max_{i,h} (\mu_{jk}^i - \mu_{jk}^h) \leq 0.5. \quad (10)$$

Спроектуювавши оцінки на вісь (μ, T) , отримаємо добре згруповані думки, якщо функції приналежності мають один центр кластеризації. У цьому випадку будемо називати оцінку експертів узгодженою. Якщо при тих же умовах центрів кілька, то оцінку експертів будемо називати умовно узгодженою. Побудований вище простір назвемо експертним простором і будемо позначати його через A_n^m , кожна точка якого a_i^j – оцінка x_i -м експертом a_j -ї альтернативи описується вектором.

Для ранжування альтернатив представимо експертну інформацію, надану x_i -м екпертом у вигляді матриці $A(x_i)$:

$$A(x_i) = \begin{array}{c|cccc} & t_1 & t_2 & \dots & t_k \\ \hline a_1 & \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1k} \\ a_2 & \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & \mu_{nk} \end{array}, \quad (11)$$

де μ_{ij} – функція приналежності a_i -ї альтернативи t_j -му терму.

Введемо величину $p_j(a_i)$ – частоту появи альтернативи a_i .

Впорядкуємо альтернативи в такий спосіб. Через r_i позначимо рейтинг a_i альтернативи, який визначається у відповідності до кількості термів, для яких функція приналежності альтернативи, що розглядається, приймає максимальне значення. Тобто максимальний рейтинг r_1 належить альтернативі, для якої $r_i = a_i \cdot a_i : p_i = \max_i p(a_i)$.

Альтернативи, рейтинг яких визначено, вибувають із розгляду. Отримана запропонованим методом послідовність дозволяє впорядкувати альтернативні варіанти дій в умовах НС з урахуванням усіх факторів, які характеризують альтернативи. Запропонований метод обробки експертної інформації може бути застосованим як для узгоджених, так і для неузгоджених думок експертів, оскільки базується на комплексній оцінці даних і враховує компетентність експертів.

6. Чисельна реалізація запропонованих моделей надзвичайних ситуацій та методів обробки нечітких експертних даних

Розглянемо чисельну реалізацію розроблених в роботі моделей та методів.

Сформуємо вектор, який характеризує вражаючий вплив y_i фактору на прикладі аміаку. У цьому випадку $w(y_i)$ є функцією від $\text{int}(y_i)$, де між $w(y_i)$ та $\text{int}(y_i)$ існує пряма залежність: чим вище $\text{int}(y_i)$, тим вище $w(y_i)$. Важливість фактору $v(y_i)$ визначається експертами, інтенсивність $\text{int}(y_i)$ визначається за допомогою датчиків-газоаналізаторів, $\underline{\text{int}}_i = 0$, $\overline{\text{int}}_i$ – порогова (вибухонебезпечна) концентрація в повітрі від 15 до 28 % (107...200 мг/л). До інших параметрів віднесемо:

– $q_1(y_i)$ – порогову масу небезпечної речовини 1-го класу, яка дорівнює 500т;

– $q_2(y_i)$ – порогова маса небезпечної речовини 2-го класу 50 т.;

– $q_3(y_i) = \{1, 8\}$ – категорії, до яких може бути віднесена речовина;

– $q_4(y_i) = \{1, 3\}$ – групи, до яких може бути віднесена речовина. У групи небезпечні речовини об'єднуються за видами аварій, що можуть статися виходячи з властивостей небезпечних речовин, та за впливом вражаючих факторів цих аварій;

– $q_5(y_i) = 1$ – токсичність речовини ($q_5(y_i) = 1$, якщо речовина токсична і $q_5(y_i) = 0$ у протилежному випадку);

– $q_6(y_i) = 4$ клас безпеки;

– $q_7(y_i) \approx 0,45$ МПа ($4,5$ кгс/см²) максимальний тиск вибуху аміачно-повітряної суміші;

– $q_8(y_i) = 0,0028$ % ($0,02$ мг/л) – гранично допустимий об’ємний вміст аміаку в повітрі дозволений у робочій зоні;

– $q_9(y_i) = 0,035$ % ($0,25$ мг/л) – гранично допустимий об’ємний вміст аміаку в повітрі, що не викликає наслідків після перебування протягом 60 хв, $q_9(y_i)$ [$0,05$ %; $0,1$ %] ($[0,35$ мг/л; $0,7$ мг/л]) – гранично допустимий об’ємний вміст аміаку в повітрі, небезпечний для життя;

– $q_{10}(y_i) = [0,21$ %; $0,39$ %] ($[1,5$ мг/л; $2,7$ мг/л]) – гранично допустимий об’ємний вміст аміаку в повітрі, який викликає летальний наслідок при впливі протягом 30...60 хвилин.

Наведені вище показники, які характеризують вражаючий вплив аміаку при виникненні НС, відповідно до (1) є координатами вектору порогових значень. Відповідно до виразів (5), (6), контроль стану об’єкта управління необхідно виконувати з урахуванням показників вражаючих факторів в $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$ – множині ознак, значеннями яких задається НС.

Таким чином, сукупність факторів, які описують надзвичайну ситуацію, можна представити у вигляді поєднання кількісних та якісних оцінок, частина показників може бути недоступна, що є причиною неповноти та нечіткості даних. Цей факт обумовлює використання в моделюванні та прогнозуванні НС елементів нечіткої логіки та нечітких множин.

Проведемо чисельну апробацію методу обробки експертних даних. Припустимо в опитуванні беруть участь чотири експерта $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, які оцінюють шість альтернатив $A = \{a_j\} = \{a_1, a_2, \dots, a_6\}$, визначаючи їх функції приналежності до термів $T = \{t_1, t_2, \dots, t_6\}$. Припустимо, що $w(x_1) = 0,8$, $w(x_2) = 0,6$, $w(x_3) = 0,8$, $w(x_4) = 0,7$. У якості альтернатив виступають варіанти дій в НС, у якості термів вартість альтернативи, кількість ресурсів реагування на надзвичайні ситуації тощо. При цьому будемо вважати що терми $T = \{t_1, t_2, \dots, t_6\}$ розташовані в порядку зменшення пріоритету.

Відповідно до виразу (11) сформуємо альтернативи і значення функцій приналежності термів в матриці $A(x_1), \dots, A(x_4)$, які відповідають думкам чотирьох експертів.

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
a_1	0,5	0,6	0,7	0,8	0	0,1
a_2	0,4	0,2	0	0,3	0	0,4
$A(x_1) = a_3$	0,1	0,5	0	0,2	0,9	0,6
a_4	0	0,1	0,9	0,3	0,2	0,5
a_5	0,7	0,2	0,2	0,3	0,4	0,7
a_6	0,1	0,9	0,4	0,3	0,8	0,6

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
a_1	0,4	0,4	0,6	0,9	0,1	0,05
a_2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4
$A(x_2) = a_3$	0,05	0,3	0,2	0,2	0,8	0,5
a_4	0,1	0,1	0,8	0,3	0,25	0,4
a_5	0,8	0,2	0,2	0,4	0,5	0,7
a_6	0,15	0,9	0,5	0,4	0,8	0,7

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
a_1	0,6	0,5	0,75	0,7	0,05	0,15
a_2	0,4	0,3	0	0,3	0,1	0,3
$A(x_3) = a_3$	0,1	0,4	0,1	0,3	0,8	0,6
a_4	0	0,1	0,9	0,3	0,2	0,5
a_5	0,7	0,2	0,2	0,6	0,4	0,7
a_6	0,1	0,9	0,4	0,5	0,8	0,6

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
a_1	0,4	0,5	0,5	0,8	0,1	0,1
a_2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,4
$A(x_4) = a_3$	0,05	0,5	0,1	0,25	0,9	0,5
a_4	0,1	0,1	0,8	0,3	0,3	0,4
a_5	0,8	0,2	0,2	0,4	0,5	0,7
a_6	0,2	0,9	0,5	0,4	0,8	0,7

Проведемо обробку експертної інформації, отриманої від першого експерта. Виконаємо ранжування для кожного значення терм множини, впорядковуючи альтернативи по зменшенню значення відповідної функції приналежності. Отримані послідовності зведемо в табл. 1.

Частоти появи альтернатив наведено в матриці $P(x_1)$.

	$p_1(a_i)$	$p_2(a_i)$	$p_3(a_i)$	$p_4(a_i)$	$p_5(a_i)$
a_1	1/6	3/6	0	0	2/6
a_2	0	1/6	1/6	2/6	2/6
$P(x_1) = a_3$	1/6	1/6	2/6	1/6	1/6
a_4	1/6	1/6	1/6	1/6	2/6
a_5	2/6	1/6	1/6	2/6	0
a_6	1/6	6/6	1/6	1/6	0

Таблиця 1.

Послідовності альтернатив, впорядкованих у відповідності до значень функції приналежності для першого експерта

Терм	Альтернативи				
t_1 :	a_5	a_1	a_2	$\langle a_3, a_6 \rangle$	a_4
t_2 :	a_6	a_1	a_3	$\langle a_2, a_5 \rangle$	a_4
t_3 :	a_4	a_1	a_6	a_5	$\langle a_2, a_3 \rangle$
t_4 :	a_1	$\langle a_2, a_4, a_5, a_6 \rangle$	a_3		
t_5 :	a_3	a_6	a_5	a_4	$\langle a_2, a_1 \rangle$
t_6 :	a_5	$\langle a_6, a_3 \rangle$	a_4	a_2	a_1

З урахуванням способу побудови матриці $P(x_1)$ і проаналізувавши отримані данні можемо зробити висновок, що найбільш сильною є альтернатива a_5 , оскільки її відносна частота є найбільшою. В термінах введених припущень це означає, що вона є найкращою за двома термами і, відповідно, її рейтинг найбільший. У другому стовпці альтернативи a_1 і a_6 мають однакові значення відносних частот і, отже, ці альтернативи для трьох термів мають значення функції належності, наступні за максимальним значенням і для одного терму мають максимальне значення. Однак $p_3(a_6)=1/6$, $p_3(a_1)=0$. Тому a_6 має перевагу і в рейтингу займає друге місце. Після аналогічного аналізу усіх стовпців маємо наступне ранжування альтернатив за результатами обробки даних першого експерта: $a_5, a_6, a_1, a_3, a_2, a_4$.

Проведемо аналогічну процедуру для $A(x_2)$. Результати аналізу альтернатив сформуємо у табл. 2.

Таблиця 2.

Послідовності альтернатив, впорядкованих у відповідності до значень функції приналежності для першого експерта

Терм	Альтернативи					
t_1 :	a_5	a_1	a_2	a_6	a_4	a_3
t_2 :	a_6	a_1	$\langle a_2, a_3 \rangle$	a_5	a_4	
t_3 :	a_4	a_1	a_6	$\langle a_3, a_5 \rangle$	a_2	
t_4 :	a_1	$\langle a_5, a_6 \rangle$	a_4	$\langle a_2, a_3 \rangle$		
t_5 :	$\langle a_6, a_3 \rangle$	a_5	a_4	a_2	a_1	
t_6 :	$\langle a_6, a_5 \rangle$	a_3	$\langle a_2, a_4 \rangle$	a_1		

Частоти появи наведено в матриці $P(x_2)$.

	$p_1(a_i)$	$p_2(a_i)$	$p_3(a_i)$	$p_4(a_i)$	$p_5(a_i)$	$p_6(a_i)$
a_1	1/6	3/6	0	1/6	1/6	0
a_2	0	0	3/6	2/6	1/6	0
$P(x_1) = a_3$	1/6	1/6	1/6	2/6	0	1/6
a_4	1/6	0	3/6	0	2/6	0
a_5	2/6	2/6	0	2/6	0	0
a_6	3/6	1/6	1/6	1/6	0	0

Після аналізу усіх стовпців маємо наступне ранжування альтернатив за результатами обробки даних другого експерта: $a_6, a_1, a_2, a_4, a_3, a_5$.

Аналогічно за результатами обробки даних отримаємо наступне ранжування для третього експерта: $a_5, a_6, a_1, a_4, a_2, a_3$, для четвертого: $a_6, a_1, a_5, a_2, a_4, a_3$.

З урахуванням ваги кожного експерта остаточно альтернативи мають наступний рейтинг: $a_5, a_6, a_1, a_4, a_2, a_3$. Альтернативи впорядковані за порядковою шкалою.

7. Обговорення результатів моделювання НС

Запропонована модель НС у вигляді нечіткої ситуації з використанням представлення ознаки у вигляді вектору (1) з урахуванням вражаючого фактору пояснюються декількома причинами. По перше, представлення техногенної ситуації у вигляді нечіткої ситуації обумовлено наявністю ознак, сформульованих в якісних показниках, а також великою імовірністю неповноти інформації щодо процесів контролю. По друге, використання у якості моделі ознак НС n -мірного вектору обумовлена характеристиками вражаючих факторів. Для попередження аварій необхідною умовою є завчасне виявлення відхилень від нормативних або допустимих показників. Комплексний контроль у відповідності до (5), (6) може бути виконано на основі співставлення координат векторів фактичного стану та контрольного вектору, координатами якого є порогові значення параметрів процесів, що контролюються. Такий підхід дозволяє всебічно охарактеризувати процеси, що розглядаються, і ідентифікувати ситуацію за вражаючими факторами. Завдяки представленню НС у вигляді нечіткої ситуації (3), (4) вдалось уникнути проблем, які виникають при використанні статистичних методів для моделювання НС. Використання моделі нечіткої ситуації дозволяє застосувати для ідентифікації НС відношення нечіткої подібності та нечіткого включення. Визначення в такий спосіб міри близькості ситуацій вирішує проблему пошуку найбільш відповідних прецедентів, що є перевагою у порівнянні з підходом, запропонованим в [11]. Можливість використання відношень подібності до запропонованих моделей дозволяє приймати рішення навіть за умови неповних даних, що знімає обмеження, які існують в роботах [12, 13]. Таким чином подальші дослідження повинні бути спрямовані на побудову таких відношень в предметній області, що розглядається.

Розроблений в роботі метод обробки експертних даних, заснований на поняттях нечіткої логіки, є узгодженим з математичним представленням надзвичайної ситуації у вигляді нечіткої ситуації. Даний метод може бути використаний як для формулювання окремих ознак НС, так і для ранжування альтернатив при прийнятті рішень. Застосування виразів (7)–(10) дозволяє оцінити узгодженість думок експертів. На основі обробки даних, сформованих у матрицю (10) щодо експертних думок, можемо отримати ранжування альтернатив. Відмітимо, що використання нечітких моделей для представлення альтернатив з подальшою обробкою даних на основі значень функцій приналежності нівелює розбіжність в експертних оцінках і вирішує недоліки статистичних підходів, викладених в [16, 17]. Введення коефіцієнту компетентності експертів дозволяє скоригувати висновки в залежності від досвіду експертів. При цьому необхідно відмітити, що запропонований

підхід дозволяє врахувати усі критерії, за якими може бути оцінена альтернатива. Це досягається способом формування терм множини для кожної альтернативи. Оцінка альтернатив за цими критеріями з послідувачим їх ранжуванням дозволяє вирішити проблему наближення альтернативного вибору до реального, що є перевагою у порівнянні з методами, наведеними в [9]. Але даний підхід має обмеження, оскільки для визначення кваліфікації експерта необхідно мати інформацію про попередній досвід, а людині властиво не афішувати свої помилки. Крім того, в даному методі не розглядається питання ранжування терм множини лінгвістичних значень: вартість альтернативи, кількість ресурсів, як вони співвідносяться з можливими втратами тощо.

Чисельна реалізація запропонованих підходів підтверджує можливість використання розроблених методів та моделей в реальних ситуаціях. Так, дані табл. 1, 2 демонструють технологію побудови послідовності альтернатив за зменшенням значення функції приналежності і дозволяють відслідковувати, наскільки та чи інша альтернатива домінує над іншими. Цей принцип є основою в ранжуванні альтернатив за порядковою шкалою. Однак питання отримання значень функцій приналежності в даному методі не розглядається. Необхідно зауважити, що для обробки великих масивів інформації для реалізації запропонованого підходу необхідно використання програмних продуктів.

8. Висновки

1. Розроблені математичні моделі, які базуються на поєднанні теорії нечітких множин і теоретико-множинних підходів, дозволяють отримати представлення ситуації, яке поєднує в собі як числові параметри, так і лінгвістичні значення. Таке представлення, на відміну від представлення ситуації у вигляді чітких множин на основі тільки кількісних параметрів, дозволяє проводити ідентифікацію ситуацій та приймати рішення в умовах неповноти інформації. Зазначена проблема вирішується можливістю застосовувати до таких моделей мір подібності ситуацій. Це, у свою чергу, значно спрощує формування бази правил для ідентифікації ситуацій та прийняття рішень. У якості моделі для представлення ознаки НС було запропоновано n -мірний вектор. Координатами є характеристики вражаючих факторів, які формувались з нормативних показників, систем моніторингу, експертної інформації. Такий підхід у поєднанні з представленням ситуації за допомогою нечітких моделей дозволив комплексно представити об'єкт управління і врахувати усі фактори, що його описують.

2. Запропоновано метод обробки експертної інформації, який дозволяє оцінити узгодженість думок експертів та вирішує задачу ранжування альтернатив. Показано, що такий метод дозволяє формувати терм-множину альтернатив, враховуючи всі фактори, які існують при альтернативному відборі. Принцип формування послідовності термів та алгоритм ранжування альтернатив у відповідності до значень функцій приналежності дозволяє формувати альтернативний вибір максимально близьким до реальної ситуації. Запропонований алгоритм ранжування альтернатив за порядковою шкалою дає можливість у випадку неможливості застосування кращої альтернативи застосовувати наступну за пріоритетом.

3. Чисельна апробація запропонованих методів та моделей показала можливість їх застосування до реальних промислових об'єктів. Проведена чисельна реалізація методу обробки нечітких експертних даних підтвердила факт придатності запропонованого підходу для обробки як узгоджених, так і неузгоджених даних.

Література

1. Лобойченко, В. М. (2019). Розробка процедури ідентифікації факторів небезпеки на об'єктах малотонажного хімічного виробництва. Проблеми надзвичайних ситуацій, 2 (30), 176–186. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/10608/1/15loboychenko.pdf>
2. Minimum standards for protection, gender and inclusion in emergencies (2018). International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. Geneva, 116. URL: <https://media.ifrc.org/ifrc/wp-content/uploads/sites/5/2018/11/Minimum-standards-for-protection-gender-and-inclusion-in-emergencies-LR.pdf>
3. Портянко, Т. М., Ротте, С. В., Пшенишна, Н. М. (2018). Аналіз історичних аспектів розвитку техногенної безпеки. Гуманітарний вісник. Сер.: Історичні науки, 12, 128–136.
4. Jung, S., Woo, J., Kang, C. (2020). Analysis of severe industrial accidents caused by hazardous chemicals in South Korea from January 2008 to June 2018. Safety Science, 124, 104580. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104580>
5. Natural catastrophes and man-made disasters in 2018: “secondary” perils on the frontline (2019). Swiss Re Institute. No. 2/2019. URL: https://www.swissre.com/dam/jcr:c37eb0e4-c0b9-4a9f-9954-3d0bb4339bfd/sigma2_2019_en.pdf
6. Adikaram, K. K. N. B., Nawarathna, C. M. (2018). Business sector preparedness in disaster management: case study with businesses in Southern Sri Lanka in both aspects of natural and technological disasters. Procedia Engineering, 212, 918–920. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.118>
7. Murray, S. L., Harputlu, E., Mentzer, R. A., Mannan, M. S. (2014). Modeling operators' emergency response time for chemical processing operations. Journal of Emergency Management, 12 (6), 479. doi: <https://doi.org/10.5055/jem.2014.0211>
8. Su, J., Guo, C., Zang, H., Yang, F., Huang, D., Gao, X., Zhao, Y. (2018). A multi-setpoint delay-timer alarming strategy for industrial alarm monitoring. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 54, 1–9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.02.004>
9. Zhang, Z.-X., Wang, L., Wang, Y.-M. (2018). An Emergency Decision Making Method Based on Prospect Theory for Different Emergency Situations. International Journal of Disaster Risk Science, 9 (3), 407–420. doi: <https://doi.org/10.1007/s13753-018-0173-x>
10. Longo, F., Nicoletti, L., Padovano, A. (2019). Emergency preparedness in industrial plants: A forward-looking solution based on industry 4.0 enabling technologies. Computers in Industry, 105, 99–122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.003>

11. Жарикова, М. В., Шерстюк, В. Г. (2015). Разработка модели чрезвычайной ситуации природного характера в системе поддержки принятия решений. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 1 (4 (73)), 62–69. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.37801>
12. Кацман, М. Д., Родкевич, О. Г. (2015). Інформаційна модель ідентифікації екологічно небезпечних надзвичайних ситуацій. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 1 (42), 126–131. URL: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/4167>
13. Рогозін, А. С., Хоменко, В. С. (2011). Математична модель ліквідації надзвичайних ситуацій. Проблеми надзвичайних ситуацій, 14, 143–147. URL: <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol14/Rogozin.pdf>
14. Grant, E., Salmon, P. M., Stevens, N. J., Goode, N., Read, G. J. (2018). Back to the future: What do accident causation models tell us about accident prediction? Safety Science, 104, 99–109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.12.018>
15. Литвин, В. В., Даревич, Р. Р., Досин, Д. Г., Мельник, А. С., Мазур, А. О. (2011). Пошук релевантних прецедентів на основі адаптивних онтологій. Штучний інтелект, 2, 35–44. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/58840>
16. Vimba, A. T., Idris, N., Al-Hunaiyyan, A., Mahmud, R. B., Abdelaziz, A., Khan, S., Chang, V. (2016). Towards knowledge modeling and manipulation technologies: A survey. International Journal of Information Management, 36 (6), 857–871. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.05.022>
17. Стрілець, В. М., Лобойченко, В. М. (2013). Вдосконалення методу експертних оцінок для розрахунку професійного ризику. Проблеми надзвичайних ситуацій, 17, 198–204. URL: <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol17/23.pdf>
18. Про ідентифікацію та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. Постанова від 11.07.2002 № 956. Кабінет Міністрів України. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/shou/956-2002-%D0%BF/page>
19. Мелихов, А. Н., Берштейн, Л. С., Коровин, С. Я. (1990). Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М., 272.
20. Ulianovskaya, Yu. (2016). Information technology for treatment of results expert estimation with fuzzy character input data. An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes, 5 (4), 55–60. URL: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-dc538a41-176b-4ecf-8157-22272a913466>