

УДК 629.17

Л. А. Мурадян – к.т.н., доцент кафедри «Вагони та вагонне господарство»,  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка  
В. Лазаряна, leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

## ПОБУДОВА СИСТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

### Вступ

Залізничний транспорт у всьому світі займає значну частину ринку послуг, які пов'язані з організацією та забезпеченням перевізного процесу [1], основою якого є рухомий склад. На залізницях усього світу найбільше уваги приділяється безпеці руху поїздів, від якої залежить життя та здоров'я людей. Безпека руху поїздів напряму залежить від надійності рухомого складу, в т.ч. і вантажних вагонів.

У процесі вирішення різних проблем, пов'язаних з надійністю рухомого складу залізниць, в т.ч. і вантажних вагонів, використовується безліч джерел невизначеності інформації. Практично в кожному випадку є можливість розділити їх на дві категорії: недостатній рівень знання предметної області і недостатньо повна інформація про конкретну ситуацію.

У зв'язку з тим, що в теорії предметної області [2, 3] (тобто у наших знаннях про цю область) можуть бути використані концепції, що не мають чіткого формулювання, чи мало вивчені явища, тобто вона є неясною або неповною. Наприклад, в процесі визначення можливих несправностей вантажних вагонів існують різні свідчення за непрямими ознаками, які можуть указувати на поломку різних вузлів, їх сполучень або деталей.

Внаслідок наявності невизначеності знань, правила впливу часто не призводять до отримання коректних результатів, навіть у найпростіших випадках. Не маючи повного знання, не можливо з упевненістю передбачити, який ефект отримаємо від здійснення тієї чи іншої дії. Навіть маючи дос-

татньо повну теорію предметної області [1], дослідник може прийти до думки, що більш ефективно використовувати евристичні, ніж точні методи для прогнозування надійності вантажних вагонів.

Окрім наявності неточних знань, причинами неясності, щодо технічного стану вантажного вагона, можуть стати неточні або ненадійні дані про конкретну ситуацію.

У роботах багатьох дослідників [2 – 4], відстежується єдина думка про важливість використання неточних методів у процесі реалізації системи дослідження, при цьому багато дискусій виникає на тлі визначення конкретного переліку методів, які повинні використовуватися. До недавнього часу, більшість з них, підтримували твердження Мак-Карті і Хейеса, з приводу того, що теорію ймовірностей неможливо використовувати як адекватний інструмент при вирішенні завдань за поданням невизначеності знань і даних [3]. На підтвердження цього наводилися такі аргументи:

- теорія ймовірності не дозволяє дати відповідь на питання, пов'язане з можливістю комбінації імовірнісних і кількісних даних;
- призначення ймовірності певних подій вимагає інформації, яка відсутня.

Інші дослідники розширили цей перелік своїми аргументами [3]:

- незрозуміло, як за допомогою кількісних даних оцінити деякі поняття, які дуже часто зустрічаються на практиці. Наприклад, «у більшості випадків», «в окремих випадках», або такі поняття, які характеризую-

ють приблизні оцінки як «швидкий» або «швидкісний»;

- застосування теорії ймовірностей змушує інженерів давати точну оцінку таким параметрам, які вони не можуть оцінити, оскільки цей процес вимагає «занадто багато чисел»;
- оновлення ймовірнісних оцінок є дуже дорогим процесом, тому що вимагає великого обсягу обчислень.

Наявність цих суджень призвела до формування нового формального апарата, призначеного для роботи з невизначеностями – нечітка логіка або теорія функцій довіри.

### Аналіз попередніх досліджень

Використання моделей подання нечітких знань актуально для формалізації людських знань, які описують якісні характеристики (наприклад, великий, сильний, дуже сильний, високий тощо) об'єктів предметної області, які інтерпретуються неоднозначно, але містять важливу інформацію [3].

При вирішенні реальних завдань часто виникають ситуації невизначеності, які можна розділити на дві категорії: відсутність достатньо повного і достовірного знання про предметну область і відсутність можливості отримати вичерпну інформацію про конкретні умови роботи, об'єкт, ситуацію тощо. У першому випадку, мова може йти про явища, які недостатньо вивчені, теорії, що викликають багато протиріч або концепцій, що не мають чіткого формулювання.

Крім зазначених джерел невизначеності знань, існують також інші, серед яких можна виділити: ненадійні або неточні дані. Іноді доводиться користуватися інформацією, отриманою раніше, і яку неможливо ні перевірити, ні доповнити, ні отримати повторно. Для подолання проблеми невизначеності знань розроблені різні методи, що застосовуються при побудові системи дос-

лідження надійності [3]. Найбільш неформальний підхід – це використання коефіцієнтів впевненості, що виражають ступінь достовірності знання. Альтернативний спосіб полягає у використанні теорії ймовірностей. Однак неясно, як за допомогою ймовірності, представити такі поняття як «надійний», «часто», «іноді» тощо. Крім того, теорія ймовірностей вимагає значну кількість обчислень для поновлення ймовірнісних оцінок.

На сучасному етапі розвитку науки для представлення знань широке поширення одержав математичний апарат нечіткої логіки, теорія функцій довіри [5 – 12].

При формуванні оцінки тієї чи іншої ознаки, симптому або ситуації, дослідник оперує поняттями класів об'єктів, відносин, гіпотез та ін., а не використовує знання, в основі яких лежить інформація про конкретні приклади об'єктів, даних, відносин. Тому, методи рішень завдань повинні включати етап класифікації даних або знань. Виходячи з такої ситуації, розгляд конкретних екземплярів об'єктів повинно здійснюватися у вигляді подання більш загальних класів, категорій. Але в реальних ситуаціях, рідко можна зустріти об'єкт, який точно відповідає певній категорії або класу. У кожного конкретного вантажного вагона ознаки, які визначають його приналежність до даного класу, можуть бути присутніми як у повному обсязі, так і частково. Тому, приналежність цього вантажного вагона до певного класу є розмитою. З метою формування суджень про наявність подібних категорій та об'єктів, які до них належать, був запропонований формалізм теорії нечітких множин. Ця теорія лягла в основу нечіткої логіки, яка дозволяє використовувати поняття невизначеності при здійсненні логічних обчислень.

Базовою основою класичної теорії множин є булева, двозначна логіка [3]. За умови, що об'єкт  $a$  входить у множину  $A$ , приналежність об'єкта  $a$  до класу  $A$  може приймати значення: ІСТИНА, в протилежному випадку – НЕПРАВДА.

Після появи поняття «нечіткі множини», звичайні множини стали також називати «жорсткими». Саме притаманна класичній теорії множин «твердість» при визначенні категорій, стала джерелом проблем, при спробі застосувати її для опису нечітко визначених категорій.

Частково привабливість нечіткої логіки для проектувальників дослідницьких систем полягає в її близькості до природної мови. Таким термінам, як «швидкий», «трохи», «правдоподібно», найчастіше дається інтерпретація на основі повсякденного досвіду і інтуїції. Це спрощує дослідницький процес, оскільки подібні судження дослідника можна безпосередньо перетворити у вирази нечіткої логіки.

Коефіцієнти впевненості мають багато спільного з оцінками ймовірності, але між цими двома поняттями є й певні відмінності. Властивості цих коефіцієнтів не завжди підкоряються правилам теорії ймовірностей та, таким чином, з математичної точки зору ймовірностями не є. Але методи обчислення коефіцієнтів впевненості деякої сукупності дій за коефіцієнтами впевненості, що характеризують окремі компоненти в цій сукупності, значною мірою нагадують методи обчислення ймовірності складних подій за ймовірностями здійснення складових подій.

### Результати досліджень

У певному випадку можна обчислити ймовірність [5]

$$P(d_i|e), \quad (1)$$

де  $d_i$  –  $i$ -а категорія відмов, а  $e$  – є всіма необхідними додатковими ознаками або фундаментальними знаннями, що використовує тільки ймовірності:

$$P(d_i|S_j), \quad (2)$$

де  $S_j$  виступає  $j$ -м спостереженням (симптомом або свідченням).

На основі правила Байєса [3 – 6], виконуються такі обчислення у випадку, коли доступні всі значення  $P(s_j|d_i)$  і існує пра-

вдоподібність припущення про взаємну незалежність симптомів.

В системі досліджень надійності необхідно застосувати підхід, який полягає в застосуванні правил впливу. Далі, ці правила, пов'язують існуючі симптоми (свідчення) з гіпотезою рішення:

#### ЯКЩО

вантажний вагон має свідчення  $s_1 \wedge \dots \wedge s_k$ , і присутні відповідні фонові умови  $f_1 \wedge \dots \wedge f_m$ ,

#### ТО

можна твердити з упевненістю  $t$ , що у вантажного вагона відбувається накопичення несправностей в певній системі або вузлі.

При цьому коефіцієнт впевненості  $t$  може приймати значення в діапазоні  $[-1, +1]$ .

Для випадку, коли дотримані всі обумовлені умови і  $t = +1$ , дослідник абсолютно впевнений у вірності висновку  $d_i$ , а якщо  $t = -1$ , то існує абсолютна впевненість у помилці висновку  $d_i$ .

Позитивні значення коефіцієнта впевненості  $t$  відрізняються від  $+1$  є показником ступеня впевненості дослідника в правильності висновку  $d_i$ , а негативні значення – вказують на помилковість дослідника з певним ступенем впевненості.

Основна ідея, полягає в застосуванні породжуючих правил такого виду, щоб замінити обчислення ймовірності:  $P(d_i|s_1 \wedge \dots \wedge s_k)$  на наближену оцінку, щоб імітувати процес прийняття рішення дослідником.

Результати застосування таких правил зв'язуються з вихідним коефіцієнтом впевненості на етапі остаточного висновку за допомогою коефіцієнта впевненості  $KU(h)$  в достовірності значення параметра  $h$ , а додаткові умови  $f_1 \wedge \dots \wedge f_m$ , обмежують застосування конкретного правила.

Такі умови інтерпретуються значеннями «неправда» або «істина», а коефіцієнти впевненості приймають значення  $-1$  або

+1. Тобто коефіцієнти впевненості, які відрізняються від одиниці, характеризують тільки свідчення  $s_1, \dots, s_k$ . Фонові знання (додаткові умови) дозволяють або забороняють застосування правила в певному конкретному випадку.

Обчислення коефіцієнтів впевненості на етапі висновку являє собою явно виражений модульний характер, оскільки не береться до уваги ніяка інша інформація, крім тієї, яка необхідна. При цьому ніякого значення не має, яким чином отримані коефіцієнти впевненості на етапі висновку (вихідні дані).

Таку особливість необхідно використовувати при побудові системи дослідження надійності, в т.ч. і вантажних вагонів.

У роботі [3] рекомендується, у разі існування залежності між ознаками  $e_1$  і  $e_2$ , згрупувати їх в єдину ознаку, тобто якщо  $e_1$  і  $e_2$ , то з упевненістю  $t$  приходимо до висновку  $h$ , і немає необхідності в розподілі за двома ознаками, якщо  $e_1$ , то з упевненістю  $t$  приходимо до висновку  $h$ , а, якщо  $e_2$ , то з упевненістю  $t$  приходимо до висновку  $h$ .

В основі цієї рекомендації лежить один з наслідків теорії ймовірностей, яке свідчить, що  $P(h|e_1, e_2)$  не може бути простою функцією від  $P(h|e_1)$  і  $P(h|e_2)$ .

У такому сенсі, вирази для умовної ймовірності не розглядаються як модульні. Наприклад, вираз:  $P(B|A) = t$  не дозволяє зробити висновок за наявності  $A$ , яка не є єдиною відомою ознакою, що  $P(B) = t$ . Якщо є ще й знання  $E$ , то спочатку необхідно обчислити  $P(B|A, E) = t$ , а вже після говорити про значення  $P(B)$ . З такою чутливістю до ознак забезпечується дуже потужний механізм логічного висновку, який призведе до суттєвого підвищення складності обчислень.

У роботі [4] показано, що при використанні простої ймовірнісної моделі на основі

правила Байеса в системі дослідження надійності, при заданих ознаках, ймовірності гіпотез не відповідають коефіцієнтам впевненості гіпотез. У випадку, коли для впорядкування альтернативних гіпотез використовуються коефіцієнти впевненості – це прийнятно. Також у цій роботі [4] показано, якщо використовувати коефіцієнти впевненості, то дві гіпотези по відношенню до відповідних ймовірностей ранжуються в зворотному порядку. Розглянемо таке становище.

Через  $P(h)$ , позначимо суб'єктивне, тобто те, що складено на основі висновків дослідника. Значення ймовірності –  $P(h)$ , що гіпотеза  $h$  справедлива, тобто значення ймовірності в справедливості гіпотези  $h$  показує ступінь впевненості дослідника.

На користь цієї гіпотези додамо нову ознаку  $e$  і отримаємо  $P(h|e) > P(h)$ . Ступінь довіри (відносна міра) дослідника збільшиться до справедливості гіпотези  $h$ , а, математично, виразиться наступним відношенням:

$$\text{МД}(h, e) = \frac{P(h|e) - P(h)}{1 - P(h)}, \quad (3)$$

де МД – відносна міра довіри.

У разі свідчення ознаки  $e$  проти гіпотези  $h$ , тобто  $P(h|e) < P(h)$ , відбудеться збільшення міри недовіри МНД дослідника до справедливості такої гіпотези. Тоді міра недовіри МНД опишеться відношенням, у наступному вигляді:

$$\text{МНД}(h, e) = \frac{P(h) - P(h|e)}{P(h)}. \quad (4)$$

У роботі [3] показано, що при наявності додаткових ознак в одній гіпотезі, рівні довіри не можуть бути визначені незалежно. Коли якась ознака є індикатором конкретної несправності з абсолютним значенням, наприклад, якщо всі вантажні вагони з симптомом (свідченням)  $s_1$  мають несправність  $d_j$ , тоді ніяка інша ознака не змінить несправність, власне, до висунутої гіпотези

не зміниться і рівень довіри. Описати це можна таким чином. При існуванні ознак  $s_1$  і  $s_2$ , і рівності

$$P(d_i | s_1) = P(d_i | s_1 \wedge s_2) = 1,$$

то

$$P(d_i | s_2) = P(d_i | s_1).$$

Також в роботі [7] проводиться критичне ставлення до об'єднання (кон'юнкції) гіпотез.

В процесі дослідження при поєднанні гіпотез  $d_1 \wedge d_2$ , рівень довіри відповідає найменшому рівню для окремих гіпотез і, навпаки, рівень недовіри відповідає найбільшому для окремих гіпотез. Припустимо наступне: гіпотези  $d_1 \wedge d_2$  не тільки не незалежні, а й взаємно виключають одна одну. Тоді, у разі наявності будь-якої ознаки  $e$ :  $P(d_1 \wedge d_2 | e) = 0$

незалежно від рівня довіри (недовіри) до  $d_1$  або  $d_2$ .

У роботі [8] здійснено визначення коефіцієнта впевненості в гіпотезі, який чисельно оцінює комбінацію рівня довіри чи недовіри до неї і обчислюється, як різниця між мірою довіри і недовіри:

$$\begin{aligned} \text{КУ}(h, e_1 \wedge e_2) &= \\ &= \text{МД}(h, e_2) - \text{МНД}(h, e_1), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $e_2$  – виступає ознакою, яка свідчить на користь гіпотези  $h$ , а  $e_1$  – навпаки, свідчить проти гіпотези  $h$ .

Отримане значення КУ зовсім не є еквівалентним умовній ймовірності, за умови  $e_1 \wedge e_2$ , для існуючої гіпотези  $h$ , яка визначається з правила Байеса:

$$\begin{aligned} P(h | e_1 \wedge e_2) &= \\ &= \frac{P(e_1 \wedge e_2 | h) P(h)}{P(e_1 \wedge e_2)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Ступінь довіри, який знаходиться за певними правилами, може співвідноситися із суб'єктивною оцінкою ймовірності, але, при цьому, коефіцієнт впевненості виступає у вигляді комбінованої оцінки. Тобто його призначення полягає в управлінні

процесом пошуку необхідної мети в просторі різних станів (при значенні коефіцієнта впевненості в інтервалі  $[-0, 2; +0, 2]$  – пошук гіпотези повинен блокуватись) і в ранжуванні набору гіпотез після пошуку та обробки всіх значущих ознак.

Ранжування набору гіпотез [9] з коефіцієнтами впевненості дає протилежний результат, ніж, якщо використовувати ймовірнісні методи. Покладемо, що існують дві гіпотези  $d_1 \wedge d_2$ , а, також ознака  $e$ , яка свідчить на користь однієї й іншої гіпотези. Здамося відношенням апіорних ймовірностей:  $P(d_1) > P(d_2)$  и  $P(d_1 | e) > P(d_2 | e)$ .

У цьому випадку, суб'єктивна ймовірність  $P(d_1)$  справедливості гіпотези  $d_1$  більше, ніж гіпотези  $d_2$ , причому, беручи до уваги додаткову ознаку  $e$ , зберігається таке ж співвідношення.

У різних випадках можливе наступне зворотне співвідношення між коефіцієнтами впевненості гіпотез:

$$\text{КУ}(d_1, e) < \text{КУ}(d_2, e). \quad (7)$$

Підсумовуючи вищевикладене, вважаємо, що в системі досліджень надійності вантажних вагонів на основі знань про зв'язок симптомів (ознак) несправностей і самої несправності відповідного вантажного вагона, що формуються спеціалістами вагонних депо, як ремонтних, так і експлуатаційних, можливо отримати підсумковий коефіцієнт впевненості при використанні наступних співвідношень:

$$\text{КУ}[h : e] = \text{МД}[h : e] - \text{МНД}[h : e], \quad (8)$$

де  $\text{КУ}[h : e]$  – впевненість в гіпотезі  $h$  з урахуванням ознаки  $e$ ;  $\text{МД}[h : e]$  – міра довіри до гіпотези  $h$  при заданій ознаці  $e$ ;  $\text{МНД}[h : e]$  – міра недовіри  $h$  при ознаці  $e$ .

$$\begin{aligned} \text{МД}[h : e_1, e_2] &= \text{МД}[h : e_1] + \\ &+ \text{МД}[h : e_2] (1 - \text{МД}[h : e_1]), \end{aligned} \quad (9)$$

де кома між  $e_1$  і  $e_2$  означає, що  $e_2$  слідує за  $e_1$ .

### Висновки

У роботі було показано, яким чином будувати систему досліджень надійності вантажних вагонів. У даному випадку, для побудови такої системи залучено апарат нечіткої логіки. В системі досліджень надійності вантажних вагонів на основі знань про зв'язок ознак несправностей і самої несправності відповідного вантажного вагона, що формуються спеціалістами ремонтних і експлуатаційних вагонних депо, отримано підсумковий коефіцієнт впевненості гіпотез при заданих відношеннях апріорних ймовірностей справедливості гіпотез з певними ознаками несправностей вантажних вагонів.

### Бібліографічний список

1. Myamlin, S. V. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing [Текст] / S. V. Myamlin, D. M. Vaganovskiy // Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету ім. ак. В. Лазаряна «Проблеми економіки транспорту». – 2014. № 7. – С. 61 – 66.
2. Джарратано, Дж. Экспертные системы. Принципы разработки и программирование [Текст] / Дж. Джарратано, Г. Райли – М.: Вильямс, 2007. – 1152 с.
3. Джексон, П. Введение в экспертные системы. 3-е издание. Пер. с англ. [Текст] / П. Джексон – М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. – 984 с.
4. Саати, Т. Математические модели конфликтных ситуаций [Текст] / Т. Саати. – М.: Советское радио, 1977. – 189 с.
5. Аверин, А. Н. Нечеткие множества в моделях управления искусственного интеллекта [Текст] / Под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 305 с.
6. Кофман, А. Введение теории нечетких множеств: управление предприятием [Текст] / А. Кофман, Алуха Х. Хил. – Минск: Высшая школа, 1992. – 223 с.

7. Betti, G. A statistical model for the dynamics between two fuzzy states: theory and an application to poverty analysis [Text] / G. Betti, B. Cheli, R. Cambini // Metron, 2004, 62, pp. 391–411.
8. Cerioli, A. «A Fuzzy Approach to the Measurement of Poverty», in Dagum C. and Zenga M. (eds.) / A. Cerioli, S. Zani // Income and Wealth Distribution, Inequality and Poverty, Springer Verlag, Berlin, 1990, pp. 272–284.
9. Cheli B., Betti G. «Totally Fuzzy and Relative Measures of Poverty Dynamics in an Italian Pseudo Panel». 1985–1994 [Text] / B. Cheli, G. Betti // Metron 57(1-2), 1999, pp. 83–104.
10. Cheli, B. «Measuring Poverty in the Countries in Transition via TFR Method: the Case of Poland in 1990–1991» / B. Cheli, G. Ghellini, A. Lemmi, N. Pannuzi // Statistics in Transition, 1(5), 1994, pp. 585–636.
11. Cheli, B. «A ‘Totally’ Fuzzy and Relative Approach to the Multidimensional Analysis of Poverty» [Text] / B. Cheli, A. Lemmi // Economic Notes, 24, 1995, pp. 115–134.
12. Chen, S. Fuzzy Multiple Decision Making [Text] / S. Chen, C. Hwang. Springer-Verlag, Berlin, 1992.

**Ключові слова:** вагон, дослідження надійності, ймовірність, пошкодження, Байєса правило, коефіцієнт впевненості.

**Ключевые слова:** вагон, исследование надежности, вероятность, повреждение, правило Байеса, коэффициент уверенности.

**Keywords:** railway carriage, stability research, probability, damage, Bayes' rule, confidence coefficient.

### Рецензенти:

д.т.н., проф. С. В. Мямлін,  
д.т.н., проф. І. Е. Мартинов.

Надійшла до редколегії 17.09.2015  
Прийнята до друку 01.10.2015