

О.Л. Добровольський, к.т.н., ст. викл.
Вінницький національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОМІРНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗКУ ПРАКТИЧНИХ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОМОБІЛЯ

Отримано математичну модель, яка дозволяє визначити роботу сили тертя в контактї шини з опорною поверхнею з урахуванням великої кількості експлуатаційних та конструкційних факторів.

Вступ. Для розв'язання практичних задач дослідження експлуатаційних властивостей автомобіля необхідні більш потужні математичні методи, ніж класичні методи планування експерименту. Так для розв'язку задачі впливу експлуатаційних і конструктивних факторів на енергетичні втрати в плямі контакту необхідно використовувати велику кількість вхідних параметрів. В даній задачі для визначення енергетичних втрат як параметр, що поєднує силу, діючу в контактї шини з опорною поверхнею і викликане цією силою переміщення, була обрана робота сили тертя, що чисельно рівна добутку сили тертя на переміщення як функція від величини кутів установки керованих коліс та внутрішнього тиску в шині [1]. Цей параметр будемо вважати показником енергетичних втрат на тертя в плямі контакту шини з твердою опорною поверхнею при русі автомобіля, який залежить від безлічі вхідних параметрів. Врахувати їх усіх, використовуючи класичні методи планування та проведення експериментальних досліджень, не є можливим через складність і громіздкість розрахунків.

Постановка завдання. Виходячи з цього постає задача визначення енергетичних втрат в плямі контакту автомобільної шини використовуючи сучасні прогресивні математичні апарати, які дають можливість врахувати велику кількість вхідних параметрів для збільшення точності розрахунку при моделюванні процесів.

Викладення основного матеріалу. Для розв'язання поставленої задачі скористаємося методом моделювання багатомірних залежностей. Цей метод у завданнях кібернетики використовується для опису процесів нечіткими базами знань, призначеними для формалізації причинно-наслідкових зв'язків між змінними «вхід–вихід», які характеризують ту чи іншу конкретну залежність. Нечіткі бази знань втілюють у собі опис цих зв'язків природною мовою із застосуванням теорії нечітких множин і лінгвістичних змінних [2]. Побудова моделі нелінійного об'єкта здійснюється у два етапи, які аналогічні етапам структурної й параметричної ідентифікації, які характерні для класичних методів [3]. На першому етапі здійснюється формування і грубе настроювання моделі об'єкта шляхом побудови бази знань за доступною експертною інформацією, що є традиційним для технології нечітких експертних систем. Грубе настроювання вагомостей правил і форм функцій приналежності можна здійснювати за допомогою модифікованого методу парних порівнянь Сааті [4]. На другому етапі здійснюється тонке настроювання нечіткої моделі шляхом її навчання за допомогою експериментальних даних. Суть тонкого настроювання полягає в доборі таких вагових коефіцієнтів правил, «якщо–то» і таких параметрів функцій приналежності, при яких мінімізувалася б відмінність між бажаними (експериментальними) і модельними (теоретичними) параметрами об'єкта. Модель можна подати у вигляді функції (1), за допомогою якої визначатиметься робота тертя (A) або у вигляді дерева, вершинами якого є фактори впливу (рис. 1).

$$A = f(K, H, P, N, V, F) \quad (1)$$

де K – сумарний показник, що характеризує опір кочення автомобільного колеса і залежить від факторів: H – висота протектора шини; C – кут сходження; R – кут розвалу; T – жорсткість шини; Y – відведення колеса; P – тиск в шині; V – швидкість автомобіля; F – коефіцієнт зчеплення;

Більш детально фактори описано в роботі [5], а їх інтервали представлено у таблиці 1. Фактори впливу в рівнянні 1 будемо розглядати як лінгвістичні змінні, що задані на відповідних універсальних множинах і оцінюються нечіткими термами [6].

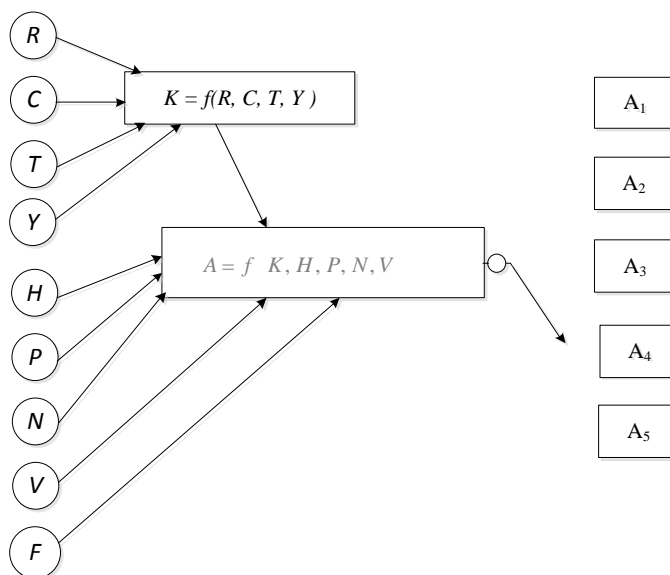


Рис. 1. Структура моделі визначення роботи тертя в контактї шини

Для зручності подання та розрахунків розіб'ємо A на 5 підінтервалів та переведемо всі вхідні величини у відсоткове співвідношення до реальних значень (табл. 1).

Таблиця 1

Фактори впливу на роботу тертя в контактї шини з опорною поверхнею

| Фактор | Універсальна множина | Терм для оцінки | Інтервал |
|--|----------------------|--|---------------|
| K – показник, що характеризує опір кочення | (0–100) % | низький (K_1) середній (K_2) високий (K_3) | [0,015–0,025] |
| H – висота протектора шини, мм | (0–100) % | нова шина (H_1) середня зношеність (H_2) зношена (H_3) | [1,6–4] |
| P – тиск в шині, МПа | (50–150) % | понижений (P_1) нормальний (P_2) підвищений (P_3) | [0,14–0,26] |
| N – навантаження на вісь, кг | (0–100) % | без навантаження (N_1) середнє (N_2) повне (N_3) | [515–615] |
| V – швидкість автомобіля, км/год. | (0–100) % | низька (V_1) середня (V_2) висока (V_3) | [0–130] |
| F – коефіцієнт зчеплення | (0–100) % | низький (F_1) середній (F_2) високий (F_3) | [0,7–0,8] |

Пропонуємо визначити кількість правил – 3 на діапазон (більша кількість правил може призвести до розмиття найбільш характерних взаємозв'язків між вхідними параметрами і рішеннями), тоді $k_1 = k_2 = K = k_6 = 3$, а загальна кількість правил буде 15. Виходячи з цього наведемо модель роботи тертя у вигляді дерева факторів (рис. 1).

Задача визначення роботи тертя в контактї шини полягає в тому, щоб для кожної комбінації значень параметрів (факторів) поставити у відповідність одне з рішень A_j , $j = \overline{1,3}$, а потім дефазифікувати його.

Для цього необхідно побудувати експертну базу знань, яка пов'язує фактори впливу з об'єктом ідентифікації, тобто роботою тертя. Представимо отриману модель у вигляді системи нечітких логічних висловлень (бази знань) [3]:

$$\begin{aligned} \text{ЯКЩО } & \left[x_1 = X_1^{j1} \text{ I } x_2 = X_2^{j1} \text{ IK } x_n = X_n^{j1} \right] \text{ з вагою } a_{j1} \\ \text{АБО } & \left[x_1 = X_1^{j2} \text{ I } x_2 = X_2^{j2} \text{ IK } x_n = X_n^{j2} \right] \text{ з вагою } a_{j2} \text{ K} \\ \text{АБО } & \left[x_1 = X_1^{jk_j} \text{ I } x_2 = X_2^{jk_j} \text{ IK } x_n = X_n^{jk_j} \right] \text{ з вагою } a_{jk_j}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{ТО } y = Y_j, j = \overline{1, m},$$

де Y_j – нечіткий терм для оцінювання j -го рівня вихідної змінної y ; m – кількість термів для оцінки змінної y ; X_i^{jp} – нечіткий терм для оцінки вхідної змінної x_i в p -му ряді матриці знань, що відповідає терму Y_j $p = \overline{1, k_j}$; k_j – кількість рядків, що відповідають терму Y_j ; a_{jp} – вага експертного правила з номером jp .

Наприклад, для 1-го правила:

$$\text{ЯКЩО } \left[x_1 = K_1 \text{ I } x_2 = H_1 \text{ I } x_3 = P_2 \text{ I } x_4 = N_1 \text{ I } x_5 = V_1 \text{ I } x_6 = F_2 \right] \text{ з вагою } 1.0$$

$$\text{АБО } \left[x_1 = K_2 \text{ I } x_2 = H_1 \text{ I } x_3 = P_1 \text{ I } x_4 = N_2 \text{ I } x_5 = V_1 \text{ I } x_6 = F_1 \right] \text{ з вагою } 0.96 \text{ K}$$

$$\text{АБО } \left[x_1 = K_1 \text{ I } x_2 = H_2 \text{ I } x_3 = P_1 \text{ I } x_4 = N_2 \text{ I } x_5 = V_2 \text{ I } x_6 = F_2 \right] \text{ з вагою } 0.95 ,$$

$$\text{ТО } A = A_1.$$

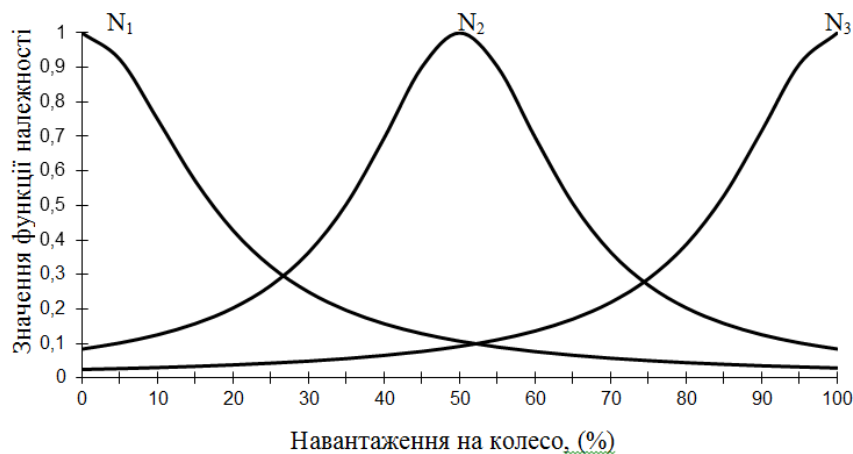
Аналогічно визначаються правила для інших значень. Отримана експертна база знань, надана у вигляді матриці і є узагальненням взаємозв'язку факторів впливу і роботи тертя.

Налаштування моделі на прийняття адекватного рішення полягає у підборі таких значень параметрів b і c , які б давали мінімальне розходження прийнятих рішень з експериментальними даними, виконаних за методикою [3]. В результаті налаштування математичної моделі отримані функції належності нечітких термів (рис. 2). Для цього за допомогою узагальненої моделі [7] визначимо функції належності змінної x до довільного нечіткого терму T :

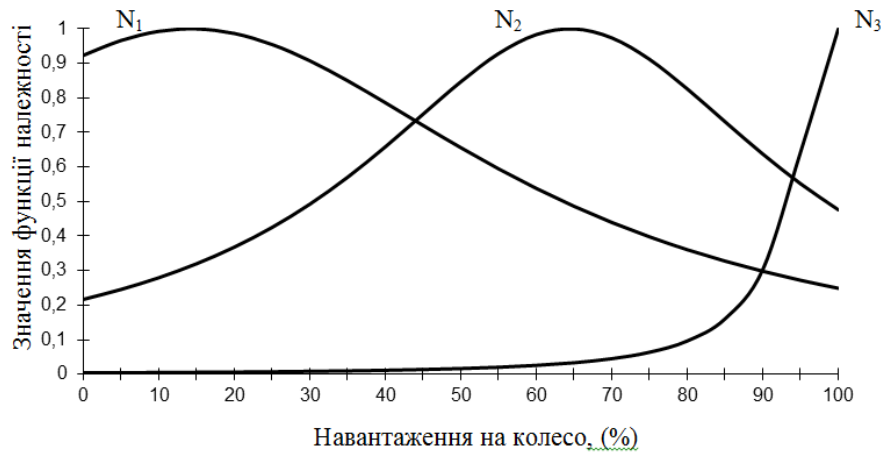
$$\mu^T x = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-b}{c} \right)^2}, \quad (3)$$

де b і c – параметри налаштування, які мають таку інтерпретацію: b – координата максимуму функції, $\mu^T x = 1$; c – коефіцієнт концентрації–розтягування функції.

Основними перевагами моделі є простота та зручність налаштування функцій належності. В нашому випадку графік функції належності набуде вигляду (рис. 2):



a)



б)

Рис. 2. Функції належності нечіткого терму « N – навантаження на колесо» до (а) та після налаштування (б)

Таким чином, знаючи діапазони зміни всіх факторів впливу, підберемо попередні значення параметрів налаштування функцій належності b і c таким чином: на основі даних таблиці 1 діапазони зміни кожного фактора ділимо на відповідну кількість термів, середини отриманих відрізків будуть значеннями параметра b ; параметр c обираємо з урахуванням розмірності факторів. Під час налаштування ці параметри будуть змінюватися. Параметри центрів b і крутизни c налаштованих функцій належності зведено в таблицю 2.

Таблиця 2

Параметри функцій належності після налаштування

| Терм | b | c | Терм | b | c |
|-------|---------|--------|-------|---------|--------|
| K_1 | 20,138 | 12,016 | F_1 | 0,850 | 52,420 |
| K_2 | 71,801 | 29,354 | F_2 | 49,523 | 21,215 |
| K_3 | 92,579 | 43,213 | F_3 | 96,220 | 13,901 |
| H_1 | 0,645 | 20,110 | N_1 | 14,865 | 48,322 |
| H_2 | 50,024 | 18,421 | N_2 | 63,626 | 31,641 |
| H_3 | 86,216 | 14,843 | N_3 | 98,234 | 11,250 |
| P_1 | 82,007 | 45,328 | V_1 | 20,961 | 22,028 |
| P_2 | 53,601 | 7,912 | V_2 | 65,856 | 37,425 |
| P_3 | 139,052 | 16,903 | V_3 | 123,845 | 45,210 |

Налаштування функцій належності здійснено підбором значень b та c з урахуванням ваги кожного правила заданого в системі.

Розроблена матриця знань, є груба модель. На даному етапі проведемо налаштування моделі – підбір значень ваг правил, використовуючи розроблену експертну базу знань. Експертна база знань з вагами нечітких правил, отриманими після налаштування, наведена в таблиці 3.

Таблиця 3

Експертна база знань після налаштування

| № правила | K | H | P | N | V | F | A | Вага правила |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 1 | K_1 | H_1 | P_2 | N_1 | V_1 | F_2 | A_1 | 1,00 |
| 2 | K_2 | H_1 | P_3 | N_2 | V_1 | F_1 | | 0,96 |
| 3 | K_1 | H_2 | P_3 | N_2 | V_2 | F_2 | | 0,95 |
| 4 | K_1 | H_3 | P_3 | N_1 | V_1 | F_1 | A_2 | 0,97 |
| 5 | K_1 | H_2 | P_2 | N_2 | V_1 | F_2 | | 1,00 |
| 6 | K_2 | H_2 | P_2 | N_1 | V_1 | F_2 | | 0,95 |
| 7 | K_2 | H_3 | P_3 | N_3 | V_2 | F_3 | A_3 | 0,95 |

| | | | | | | | | |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| 8 | K ₂ | H ₁ | P ₂ | N ₁ | V ₃ | F ₂ | A ₄ | 0,95 |
| 9 | K ₂ | H ₁ | P ₃ | N ₁ | V ₁ | F ₁ | | 1,00 |
| 10 | K ₃ | H ₂ | P ₂ | N ₂ | V ₂ | F ₃ | | 0,96 |
| 11 | K ₂ | H ₁ | P ₂ | N ₃ | V ₃ | F ₂ | | 1,00 |
| 12 | K ₂ | H ₃ | P ₃ | N ₃ | V ₃ | F ₃ | A ₅ | 0,95 |
| 13 | K ₃ | H ₃ | P ₁ | N ₂ | V ₃ | F ₃ | | 1,00 |
| 14 | K ₃ | H ₂ | P ₁ | N ₃ | V ₂ | F ₃ | | 0,96 |
| 15 | K ₃ | H ₃ | P ₁ | N ₃ | V ₁ | F ₂ | | 0,95 |

Таблиця 4

Навчальна вибірка

| № з/п | К | Н | Р | N | V | F | Вага правила | A | |
|-------|-------|------|------|-----|-----|------|-----------------|------------------|-------------------|
| | | | | | | | | Експери- мент | Нечітка логіка |
| 1 | 0,016 | 1,41 | 0,19 | 520 | 5 | 0,75 | 1 | 60,5 | 62,1 |
| 2 | 0,020 | 3,80 | 0,23 | 550 | 10 | 0,71 | 0,96 | 58,6 | 55,3 |
| 3 | 0,015 | 2,64 | 0,26 | 562 | 50 | 0,74 | 0,95 | 54,8 | 59,2 |
| 4 | 0,015 | 1,72 | 0,25 | 540 | 25 | 0,72 | 0,97 | 67,8 | 70,2 |
| 5 | 0,016 | 3,10 | 0,22 | 550 | 40 | 0,75 | 1 | 72,5 | 71,8 |
| 6 | 0,020 | 3,31 | 0,20 | 530 | 30 | 0,74 | 0,97 | 75,4 | 80,1 |
| 7 | 0,019 | 1,85 | 0,25 | 600 | 60 | 0,77 | 0,95 | 66,8 | 61,5 |
| 8 | 0,020 | 3,62 | 0,21 | 525 | 90 | 0,75 | 0,96 | 72,4 | 75,4 |
| 9 | 0,020 | 4,00 | 0,25 | 545 | 20 | 0,70 | 1 | 69,4 | 68,9 |
| 10 | 0,023 | 3,22 | 0,20 | 560 | 70 | 0,80 | 0,96 | 75,5 | 73,6 |
| 11 | 0,020 | 3,54 | 0,19 | 600 | 120 | 0,74 | 1 | 70,4 | 68,5 |
| 12 | 0,020 | 1,81 | 0,25 | 610 | 100 | 0,77 | 0,95 | 68,1 | 70,2 |
| 13 | 0,024 | 2,05 | 0,14 | 550 | 125 | 0,76 | 1 | 79,4 | 79,1 |
| 14 | 0,022 | 2,52 | 0,15 | 590 | 75 | 0,80 | 0,96 | 78,5 | 75,9 |
| 15 | 0,019 | 2,12 | 0,17 | 610 | 10 | 0,75 | 0,95 | 77,6 | 82,4 |

У результаті обробки всіх правил для кожної вихідної змінної утворюється сукупність підсумкових множин. Всі ці множини об'єднуються (накладаються одна на одну).

Після цього здійснюється операція дефазифікації, яка полягає в знаходженні «центра мас» [2] отриманої фігури (рис. 2). Центр мас розраховується за формулою:

$$y = \frac{\sum_{j=1}^m \left[y_{\text{нижн}} + j-1 \cdot \frac{\bar{y} - y_{\text{нижн}}}{m-1} \right] \cdot \mu^{y_j}}{\sum_{j=1}^m \mu^{y_j}}, \quad (4)$$

де $y_{\text{нижн}}$ – нижнє (верхнє) кількісне значення змінної y .

Навчальна вибірка, яка отримана при проведенні експериментальних досліджень і на основі якої проводилось налаштування математичної моделі, наведена в таблиці 4.

Висновки. Виконана перевірка адекватності моделі показала похибку прогнозу, яка не перевищує 11,5 % і є задовільною для практичних розрахунків визначення енергетичних втрат на тертя в плямі контакту шини з опорною поверхнею.

На відміну від існуючих методів планування експерименту, даний метод дозволяє врахувати більшу кількість факторів впливу у вигляді нечітких термів і звужити діапазон оцінок до конкретного числового значення, що суттєво підвищує точність визначення шуканої величини при розв'язанні практичних задач дослідження експлуатаційних властивостей автомобіля.

Список використаної літератури:

1. Добровольський О.Л. Визначення роботи сили тертя в контактї шини з опорною поверхнею / О.Л. Добровольський // Автошляховик України. – 2010. – № 13. – С. 67–69.

2. Кательников Д.И. Разработка метода идентификации нелинейных объектов для принятия решений на базе нечеткой логики : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Кательников Денис Иванович. – Винница, 1998. – 195 с.
3. Методы и системы принятия решений. Системы, основанные на знаниях / под ред. А.Н. Борисова. – Рига : РПИ, 1989. – 175 с.
4. Ротштейн О.П. Метод побудови функцій належності нечітких множин / О.П. Ротштейн, Г.О. Черноволик, Є.П. Ларюшкін // Вісник ВПП. – 1996. – № 3. – С. 72–75.
5. Біліченко В.В. Визначення роботи сили тертя в контактї шини з опорною поверхнею із застосуванням нечітких множин / В.В. Біліченко, О.Л. Добровольський, Ю.Ю. Кукурудзяк // Вісник . – 1996. – № 125. – С. 193–196.
6. Добровольський О.Л. Використання теорії нечітких множин для розв'язання практичних задач дослідження взаємодії автомобільної шини з опорною поверхнею / О.Л. Добровольський, В.В. Степанов // Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі : всеукр. наук.-техн. конф., 23–24 лист. 2011 р. : зб. наук. праць. – Донецьк, 2011. – С. 143–145.
7. Rotshtein A.P. Design and Tuning of Fuzzy If-Then Rules for Automatic Classification / A.P. Rotshtein, D.I. Katelnikov // Proc. International Conf. «Annual Meeting of North American Fuzzy Information Processing Society. – NAFIPS'98». – Tampa (USA). – 1998. – Pp. 50–55.

ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ Олександр Леонідович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання та дослідження експлуатаційних властивостей автотранспортних засобів.

Тел.: (0432)59–84–38.

E-mail: alexdobr_black@ukr.net

Стаття надійшла до редакції 23.07.2012

Добровольський О.Л. Використання методу моделювання багатомірних залежностей для розв'язку практичних задач дослідження експлуатаційних властивостей автомобіля

Добровольский О.Л. Использование метода моделирования многомерных зависимостей для решения практических задач исследования эксплуатационных свойств автомобиля

Dobrovolsky A.L. Using simulation methods multidimensional dependencies for solving practical problems of research car properties

УДК 629.113

Using simulation methods multidimensional dependencies for solving practical problems of research car properties / A.L. Dobrovolsky

A mathematical model that allows to determine the work force of friction tires in contact with the supporting surface including a large number of operational and structural factors.

УДК 629.113

Использование метода моделирования многомерных зависимостей для решения практических задач исследования эксплуатационных свойств автомобиля / О.Л. Добровольский

Получена математическая модель, которая позволяет определить работу силы трения в контакте шины с опорной поверхностью с учетом большого количества эксплуатационных и конструкционных факторов.