

Кічкін О.В., Кічкіна О.І.

**МАТЕМАТИЧНА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЯГОЮ ПОЇЗДА НА ДІЛЯНЦІ РУХУ**

*Стаття присвячена формалізації задачі управління тягою поїзда на основі апарату нейроматематики. В статті представлена математична нейро-нечітка формалізація моделі управління тягою поїзда на ділянці руху. Математичний апарат нечіткої логіки з подальшим «навчанням» створеної моделі є визначальним при створенні інтелектуальної системи управління тягою поїзда на ділянці руху. В процесі математичної формалізації здійснена параметризація моделі та наведено алгоритм розрахунку функцій належності вхідних та вихідних змінних моделі. Зроблено також математичну формалізацію бази знань та, як результат, математичну формалізацію системи рівнянь, розв'язання якої складає математичний сенс вирішення задачі управління тягою поїзда на ділянці руху. Для «навчання» створеної моделі використано адаптований алгоритм поширення помилки для нейро-нечіткої моделі. В якості критерія налаштування використано поширений критерій, який має просту похідну зручну для подальших математичних розрахунків. Представлена математична формалізація інтелектуальної системи управління тягою поїзда на ділянці руху дозволяє зробити подальшу практичну розробку системи автоматизованого управління тягою поїзда, основу якого складає нейро-нечіткий контролер, побудований на основі запропонованої нечіткої моделі та її «навчання» експериментальними даними руху поїздів на цій ділянці. Отримання експериментальних даних передбачається за допомогою експериментів на імітаційній моделі та створення «інтелектуальної» технологічної інфраструктури ділянки руху поїзда. Вирішене завдання такої математичної формалізації управління тягою поїзда максимально відображає інтелектуальний сенс процесу руху поїзда.*

**Ключові слова.** *Нейро-нечітка модель, тяга поїзда, функція належності, інтелектуальна система управління, лінгвістичний терм-інтервал, адаптивні методи нейро-нечіткого навчання, система автоматизованого управління (САУ).*

**Актуальність дослідження.** Формування «інтелектуальної» складової залізничних перевезень визнано актуальним для розвитку залізничних перевезень як в Україні, так і в ЄС, що підтверджено відповідними нормативними документами [1]. Зокрема, в Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року визначена задача стимулювання впровадження інноваційних технологій (смарт-інфраструктури та смарт-мобільності) та інтелектуальних транспортних систем. [2] Дослідження науковцями УкрІНТЕІ [3] динаміки наукових публікацій та їх цитування, а також динаміки патентування відповідних напрямів на транспорті, доводять, що найперспективнішими технологіями у світі в сфері транспорту є: штучний інтелект, великі дані, 5G-технології, пам'ять на нейронній мережі та інтернет речей. При чому, за даними авторів [3] у напрямку штучного інтелекту та нейронних мереж одним з перспективних напрямів розвитку технологій є системи керування транспортними засобами.

**Постановка проблеми.** Більшість рішень та термінологія, що пов'язані з інтелектуальними транспортними системами залізничного транспорту [4] оперують термінами, що збігаються по суті з поняттям комплексної (системної) автоматизації та інформатизації залізничних перевезень. Суттєвим недоліком таких розробок та термінологічних визначень є те, що в них відсутня математична основа, яка дозволяє застосування штучного «інтелекту» у вигляді нейронечіткого «навчання» відповідної транспортної (залізничної) системи. Сучасний математичний апарат дає розробникам таку можливість – це стосується, в першу чергу, нечіткої математичної логіки та нейро-адаптивних методів навчання моделей, побудованих на її основі. Застосування такого математичного апарату як основи проектування систем залізничного транспорту робить їх по-справжньому «інтелектуальними» та дозволяє ставити та вирішувати завдання, для яких автоматизація та інформаційні технології є лише складовими, а не основою вирішення задач. Все вищевикладене в повному обсязі стосується задачі управління тягою поїзда на ділянці руху. На цей час не існує рішення задачі управління тягою поїзда на основі апарату нейроматематики, що дозволить формалізувати цю задачу на рівні «інтелектуальної системи»

**Теоретичний аналіз дослідження**

Поняттям сервісів, стандартів і архітектури інтелектуальних транспортних систем (ІТС), транспортної та залізничної телематики, загальним принципам побудови і використання глобальних супутникових радіонавігаційних систем, а також питанням інформаційної безпеки в ІТС присвячені роботи таких вчених: В. В. Скалозуб, В. П. Солов'єв, І. В. Жуковицький, К. В. Гончаров. Удосконалення режимів тяги поїздів та моделювання оптимальних режимів руху поїздів розглядаються в роботах В. В. Скалозуба, О.П. Іванова, С.В.

Мямліна, В.В. Жижко. В цих роботах оптимальні режими тяги поїзда визначаються за критерієм зменшення вартості спожитої на тягу вантажних поїздів електроенергії за рахунок вибору раціональних режимів ведення поїздів. В наукових розробках О.П. Іванова представлено моделі на базі нечітких множин для відтворення змінності та невизначеності факторів, що впливають на режими ведення поїздів; алгоритми формування бази нечітких правил, на основі характеристик руху поїздів, визначених у реальних поїздках, що дозволяють обирати раціональні режими тяги засобами нечіткого управління; комплекс алгоритмів та програмного забезпечення для розрахунку раціональних режимів ведення поїздів за вартісними показниками. В роботі Л.А. Мугінштейна, І.А. Ябло, А.Є. Ілютовича розглядається енергооптимальний тяговий розрахунок руху поїзда

Математичним основам нечіткого моделювання та нейро-адаптивним методам навчання моделей присвячені роботи вчених Saaty T. L, Сявакко М.С. та інші.

**Мета статті.** Метою дослідження є математична формалізація задачі управління тягою поїзда на ділянці руху за допомогою моделі нечіткої логіки з її подальшим «навчанням» нейро-адаптивними методами.

**Задача дослідження.** Для досягнення поставленої мети необхідно визначити кількість та терм-інтервали вхідних та вихідних змінних моделі, побудувати функції належності та визначитись з математичним апаратом адаптації (навчання) формалізованої моделі.

У нашому випадку ставиться завдання такої математичної формалізації управління тягою поїзда, яка б в максимально відображала інтелектуальний сенс цього процесу на ділянці руху.

**Основний матеріал.** З метою параметризації моделі нечіткої логіки розглянемо зв'язок вхідних та вихідних змінних моделі управління тягою поїзда на ділянці руху. Наведемо перелік вхідних нечітких змінних :

- $X_1$  - швидкість поїзда ,
- $X_2$  - часова затримка руху,
- $X_3$  - маса поїзда,
- $X_4$  - довжина поїзда,
- $X_5$  - накопичена потужність тяги,
- $X_6$  - накопичена потужність електричного гальмування,
- $X_7$  - накопичена потужність механічного гальмування,
- $X_8$  - швидкість бічного та лобового вітру,
- $X_9$  - проміле ухилу підйому,
- $X_{10}$  - проміле ухилу спуску,
- $X_{11}$  - обмеження швидкості поїзда,
- $X_{12}$  - положення контролера машиніста.

При цьому вихідною нечіткою змінною є:

$Y$ - прискорення(гальмування) поїзда.

При цьому вважається, що всі нечіткі змінні є лінгвістичними змінними з такими терм-інтервалами:

$\{Y_j\}$ - множина терм-інтервалів змінної  $Y$ ,

$\{X_{ij}\}$ - множина терм-інтервалів змінної  $X_i$  ,  $i = 1 \div 12, j = 1 \div 8$  де  $i$  – кількість вхідних змінних

моделі,

$j$  – кількість терм-інтервалів відповідної змінної.

Ці залежності складають основу побудови продукційної нечіткої моделі управління тягою на ділянці руху.

Визначимо відповідні нечіткі змінні за допомогою терм-інтервалів та побудуємо для них функції належності.

Для цього побудуємо експертну таблицю, яка є результатом опитування експертів по шкалі від 1 до 16, що займаються проблемою управління тягою поїздів.

Наведене опитування зведене в таблиці, що відповідають вихідному показнику та 12-ти вхідним [5].

Відповідні таблиці згідно [6] зводяться до рядка, визначеного наступним чином:

$$k_j = \sum_{i=1}^8 b_{ij}, j = \overline{1,16}. \quad (1)$$

Вибравши максимальний елемент:

$$k_{\max} = \max k_j, \quad (2)$$

перетворимо всі  $b_{ij}$  у  $c_{ij}$  за формулою:

$$c_{ij} = \frac{b_{ij} k_{\max}}{k_j}, \text{ де } i = \overline{1,8}, j = \overline{1,16}. \quad (3)$$

Функції належності, які відповідають етапу фазифікації змінних нечіткої моделі управління тягою поїзда на ділянці руху, можливо визначити наступним чином:

$$\mu_{ij} = \frac{c_{ij}}{c_{i \max}}, \text{ де} \quad (4)$$

$$c_{i \max} = \max c_{ij}, \text{ де } i = \overline{1,8}, j = \overline{1,16}.$$

При цьому результати розрахунків функцій належності та їх графічний вигляд наступний (рис. 1).

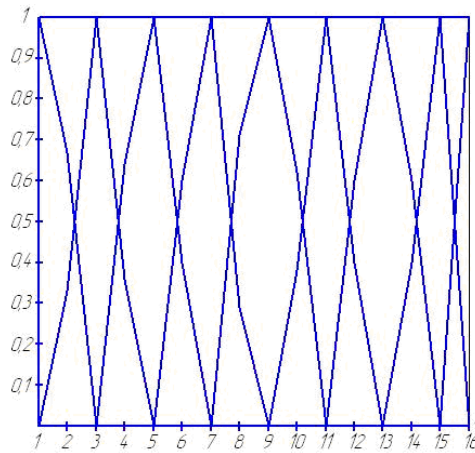


Рис.1. Графічний вигляд функцій належності нечітких змінних за результатами розрахунків

Їх загальний вигляд свідчить про трикутну форму функцій належності відповідних змінних.

Створення трикутних функцій належності нечітких терм-інтервалів універсальної множини  $U$  моделі управління тягою поїзда на ділянці руху відбувається за допомогою наступних функціональних виразів [6]:

$$\mu_j(U) = 1 - \frac{1}{K_i - 1} U, U \in [0, K_i - 1], j = 1 \quad (5)$$

$$\mu_j(U) = \frac{1}{j - 1} U, U \in [0, j - 1], j = \overline{2, K_i - 1} \quad (6)$$

$$\mu_j(U) = \frac{K_i - 1}{K_i - j} - \frac{1}{K_i - j} U, U \in [j - 1, K_i - 1], j = \overline{2, K_i - 1} \quad (7)$$

$$\mu_j(U) = \frac{1}{K_i - 1} U, U \in [0, K_i - 1], j = K_i \quad (8)$$

Аналітичні вирази функцій належності апроксимованих з кусково-лінійних функцій належності, наведених графічно на рис. 1 мають наведений вигляд при наявності у нашій задачі управління тягою поїзда на ділянці руху вісьмох термів у вхідних та вихідних нечітких змінних :

$$\mu_1(U) = 1 - \frac{1}{7} U, U \in [0, 7] \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
\mu_2(U) &= U, U \in [0,1] \\
\mu_2(U) &= \frac{7}{6} - \frac{1}{6}U, U \in [1,7] \\
\mu_3(U) &= \frac{1}{2}U, U \in [0,2] \\
\mu_3(U) &= \frac{7}{5} - \frac{1}{5}U, U \in [2,7] \\
\mu_4(U) &= \frac{1}{3}U, U \in [0,3] \\
\mu_4(U) &= \frac{7}{4} - \frac{1}{4}U, U \in [3,7] \\
\mu_5(U) &= \frac{1}{4}U, U \in [0,4] \\
\mu_5(U) &= \frac{7}{3} - \frac{1}{3}U, U \in [4,7] \\
\mu_6(U) &= \frac{1}{5}U, U \in [0,5] \\
\mu_6(U) &= \frac{7}{2} - \frac{1}{2}U, U \in [5,7] \\
\mu_7(U) &= \frac{1}{6}U, U \in [0,6] \\
\mu_7(U) &= 7 - U, U \in [6,7] \\
\mu_8(U) &= \frac{1}{7}U, U \in [0,7]
\end{aligned} \tag{10}$$

Побудова нечіткої моделі управління тягою поїзда на ділянці руху на мінімум вісьмох терм-інтервалах нечітких змінних обумовлена необхідністю найточнішого моделювання можливих ситуацій управління тягою поїзда на ділянці руху.

Подальша реалізація нечіткої моделі управління тягою поїзда на ділянці руху передбачала створення бази знань типу «ЯКЩО-ТОДІ, ІНАКШЕ». В математичній формалізації це виглядає наступним чином:

$$\cup_{j=1}^{12} [\cap_{i=1}^8 (x_i = X_{ij})] \xrightarrow{Y=y_j} \tag{11}$$

На основі формалізованої бази знань можна побудувати систему нечітких логічних рівнянь, які пов'язують між собою вектор вхідних змінних та певні значення вихідної змінної нечіткої моделі управління тягою поїзда на ділянці руху:

$$\mu_{mf_n}^Y = \cup_{j=1}^{12} (\cap_{i=1}^8 \mu_{mf_i}^{x_i}), \text{ де } n = 1 \div 8 \tag{12}$$

Для «навчання» створеної моделі використано адаптований алгоритм поширення помилки для нейро-нечіткої моделі. В якості критерія налаштування використано поширений критерій  $\varepsilon$ , який має просту похідну зручну для подальших математичних розрахунків:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{2} (\hat{y}_t - y_t)^2, \tag{13}$$

де  $y_t$  та  $\hat{y}_t$  – реальне та розрахункове значення вихідної змінної (прискорення-гальмування) нечіткої моделі управління тягою поїзда на ділянці руху.

Використання математичних методів «навчання» моделей нечіткої математичної логіки передбачає налаштування параметрів моделей якими є наступні:

- $c$  – параметр стиснення-розтягування функції належності вхідної змінної лінгвістичному терму вихідної змінної бази знань на  $t$  – му кроці «навчання»;
- $b$  – координата максимуму функції належності вхідної змінної лінгвістичному терму вихідної змінної бази знань на  $t$  – му кроці «навчання»;
- $w$  – вага правила прийняття рішень на  $t$  – му кроці «навчання».

Для налаштування вказаних параметрів використано систему рекурентних співвідношень, що мінімізують критерій (13) :

$$w_j(t+1) = w_j(t) - \eta \frac{d\varepsilon_t}{dw_j(t)},$$

$$c_i^j(t+1) = c_i^j(t) - \eta \frac{d\varepsilon_t}{dc_i^j(t)}, \quad (14)$$

$$b_i^j(t+1) = b_i^j(t) - \eta \frac{d\varepsilon_t}{db_i^j(t)}, \text{ де } j = \overline{1, 12}, i = \overline{1, 8}$$

**Висновки.** Представлена математична формалізація інтелектуальної системи управління тягою поїзда на ділянці руху дозволяє зробити подальшу практичну розробку САУ управління тягою поїзда, основу якого складає нейро-нечіткий контролер, побудований на основі запропонованої нечіткої моделі та її «навчання» даними поїздів на цій ділянці. Подальші розробки передбачають створення адекватної системно-динамічної імітаційної моделі тяги поїзда з метою отримання статистичних експериментальних даних для нейро-нечіткого «навчання» запропонованої нечіткої моделі, а також створення «інтелектуальної» технологічної інфраструктури ділянки руху поїзда.

#### Література

1. Intelligent Transport Systems (ITS) for sustainable mobility. UN, Economic Commission for Europe, UNECE. Geneva, February 2012. – 120 pp.
2. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text>
3. Богомазова В.М. Аналіз перспективних світових наукових та технологічних напрямів досліджень за Ціллю сталого розвитку № 9 щодо транспортної сфери з використанням інструментів платформ «Web of Science» та «Derwent Innovation»: науково-аналітична записка / В.М. Богомазова, Т.К. Кваша. – К.: УкрІНТЕІ, 2020. – 33 с.
4. Л. А. Мугинштейн, И. А. Ябко, А. Е. Илютович. Энергооптимальный тяговый расчет движения поезда ISSN 2223 – 9731 Вестник ВНИИЖТ 6/2013 УДК 629.423.1.004.68
5. Saaty T. L. Measurement the fuzziness of sets // J. of cybernetics. -1974.-No4.- P. 53-61.
6. Сявавко М. С. Інтелектуалізована інформаційна система «Нечіткий експерт» / М. С. Сявавко // - Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2007. – 320 с.

#### References

1. Intelligent Transport Systems (ITS) for sustainable mobility. UN, Economic Commission for Europe, UNECE. Geneva, February 2012. – 120 pp.
2. Nacional'na transportna strategiya Ukraini na period do 2030 roku. [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text>
3. Bogomazova V.M. Analiz perspektivnih svitovih naukovih ta tekhnologichnih napryamiv doslidzhen' za Cillyu stalogo rozvitku № 9 shchodo transportnoi sferi z vikoristannyam instrumentiv platform «Web of Science» ta «Derwent Innovation»: naukovu-analitichna zapiska / V.M. Bogomazova, T.K. Kvasha. – K.: UkrINTEI, 2020. – 33 s.
4. L. A. Muginshtejn, I. A. YAbko, A. E. Ilyutovich. Energooptimal'nyj tyagovyj raschet dvizheniya poezda ISSN 2223 – 9731 Vestnik VNIIZHT 6/2013 UDK 629.423.1.004.68
5. Saaty T. L. Measurement the fuzziness of sets // J. of cybernetics. -1974.-No4.- R. 53-61.
6. Syavavko M. S. Intelktualizovana informacijna sistema «Nechitkij ekspert» / M. S. Syavavko // - Vidavnichij centr LNU im. Ivana Franka, 2007. – 320 s.

*Стаття посвячена формалізації задачі управління тягою поїзда на основі апарата нейроматематики. В статті представлена математическая нейро-нечітка формалізація моделі управління тягою поїзда на участку руху. Математический аппарат нечеткой логики с последующим «обучением» созданной модели является определяющим при создании интеллектуальной системы управления тягой поезда на участке движения. В процессе математической формализации осуществлена параметризация модели и приведен*

алгоритм расчета функций принадлежности входных и выходных переменных модели. Сделано также математическая формализация базы знаний и, как результат, математическая формализация системы уравнений, решение которой составляет математический смысл решения задачи управления тягой поезда на участке движения. Для «обучения» созданной модели использовано адаптированный алгоритм распространения ошибки для нейро-нечеткой модели. В качестве критерия настройки использован распространенный критерий, который имеет простую производную удобную для дальнейших математических расчетов. Представленная математическая формализация интеллектуальной системы управления тягой поезда на участке движения позволяет сделать дальнейшую практическую разработку системы автоматизированного управления тягой поезда, основу которой составляет нейро-нечеткий контроллер, построенный на основе предложенной нечеткой модели и ее «обучение» экспериментальными данными движения поездов на этом участке. Получение экспериментальных данных предполагается с помощью экспериментов на имитационной модели и создания «интеллектуальной» технологической инфраструктуры участка движения поезда. Решенная задача такой математической формализации управления тягой поезда максимально отражает интеллектуальный смысл процесса движения поезда ..

*Ключевые слова.* Нейро-нечеткая модель, тяга поезда, функция принадлежности, интеллектуальная система управления, лингвистический терм интервал, адаптивные методы нейро-нечеткого обучения, система автоматизированного управления (САУ).

*The article is devoted to the formalization of the problem of train traction control based on the apparatus of neuromathematics. The article presents a mathematical neuro-fuzzy formalization of a model for controlling train traction on a traffic section. The mathematical apparatus of fuzzy logic with the subsequent "teaching" of the created model is decisive in the creation of an intelligent control system for train traction on a section of movement. In the process of mathematical formalization, the model was parametrized and an algorithm for calculating the membership functions of the input and output variables of the model was presented. A mathematical formalization of the knowledge base was also made and, as a result, a mathematical formalization of the system of equations, the solution of which constitutes the mathematical meaning of the solution of the problem of train thrust control on the traffic section. To "train" the created model, an adapted error propagation algorithm for a neuro-fuzzy model was used. As a tuning criterion, a common criterion was used, which has a simple derivative convenient for further mathematical calculations. The presented mathematical formalization of the intelligent control system for train traction on the section of movement allows further practical development of an automated control system for train traction, the basis of which is a neuro-fuzzy controller built on the basis of the proposed fuzzy model and its "teaching" by experimental data of train movement on this section. Obtaining experimental data is expected through experiments on a simulation model and the creation of an "intelligent" technological infrastructure for the train section. The solved problem of such a mathematical formalization of train thrust control reflects as much as possible the intellectual meaning of the train movement process.*

*Keywords.* Neuro-fuzzy model, train thrust, membership function, intelligent control system, linguistic term interval, adaptive methods of neuro-fuzzy learning, automated control system (ACS).

**Кічкін О. В.** старший викладач кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, e-mail: kichkin@ukr.net

**Кічкіна О. І.** к.т.н., доцент, професор кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, e-mail: ki4kinaoi@ukr.net