

І.В. ГРЕБЕННИК, О.А. КОВАЛЕНКО

НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ СОРТУВАЛЬНОЇ ЛІНІЇ ПОШТИ

Для зменшення часу обробки об'єктів поштових відправлень використовуються автоматичні сортувальні лінії зі стрічковими конвеєрами, які здійснюють транспортування до заданих пунктів завантаження. Головним недоліком застосування таких систем автоматизації є обмеження моделі прийняття рішень, пов'язаних з невизначеністю умов сортування.

Для реалізації управління автоматичною лінією із заданою логікою сортування в умовах невизначеності формалізовано нечітку модель прийняття рішень. Розроблена модель дозволяє реалізувати нечітку класифікацію вантажів за їхніми параметрами і визначити пункти завантаження для кожного класу. На основі нечіткої класифікації модель здійснює одночасне сортування за трьома критеріями: за оціночною вартістю, за вагою, за вагою і габаритами. За результатами перевірки моделі з використанням пакету Fuzzy Logic Toolbox Matlab підтверджено її працездатність. Розроблена нечітка модель прийняття рішень може бути використана в автоматичних сортувальних лініях різного призначення з невизначеністю умов визначення параметрів ваги і габаритів транспортованих вантажів.

1. Вступ

Глобальний розвиток електронної комерції обумовлює складність та різноманітність логістичних завдань, зв'язаних з доставкою пошти. Одним зі шляхів підвищення ефективності обробки об'єктів поштових відправлень (ОПВ) є використання промислової автоматизації у вигляді автоматичних сортувальних ліній (АСЛ) зі стрічковими конвеєрами-транспортерами. Такими лініями оснащуються центри обробки поштових відправлень аеропортів США, Японії, Китаю та Європи.

Сортувальні лінії виробляються у вигляді окремих стрічок-конвеєрів, автоматичних сортувальних машин [1-6], а також як елементи інтелектуальних автоматизованих систем [7].

Класифікація АСЛ ведеться за декількома ключовими параметрами, основними з яких є: напрямок переміщення об'єктів; вид вантажу, що транспортується; виконувана функція; розміщення сортувальної лінії та деталей; тип тягового органу; тип вантажонесучої конструкції; розташування робочого місця працівника. АСЛ не вимагає контролю з боку людини.

Об'єктами управління сучасної АСЛ є комплекс апаратних засобів, за допомогою яких здійснюється управління транспортуванням, а саме: засоби управління роликми конвеєра; пневматичні затвори, що регулюють потоки повітря; засоби зміни нахилу окремих секційних стрічок; засоби управління рухом конвеєрів на кожній секції; засоби управління швидкістю транспортування вантажів; засоби вимірювання ваги вантажів, якими обладнані платформи їх подачі на стрічки тощо.

Процес управління АСЛ здійснюється за допомогою системи прийняття рішень. Для управління сортуванням модель системи прийняття рішень (далі за текстом – модель прийняття рішень) АСЛ може отримувати дані за допомогою таких апаратних засобів: датчиків пневматичних затворів [1]; веб-камер визначення 2D-розмірів [2]; сканерів штрих-коду [3]; датчиків наближення [4]; датчиків двигунів конвеєрних стрічок [5]; датчиків механізму зважування [6] тощо.

Головним недоліком застосування АСЛ є обмеження моделі прийняття рішень, пов'язаних з невизначеністю умов сортування. Ця невизначеність обумовлена відсутністю стандартів, що визначають типи (категорії) об'єктів поштових відправлень. Класифікації за типами ОПВ у різних логістичних компаніях можуть не співпадати. У зв'язку з цим визначені завдання, що не вирішуються моделлю прийняття рішень АСЛ під час управління сортуванням та переміщенням ОПВ до пунктів завантаження (ПЗ) терміналів:

- налаштування параметрів моделі прийняття рішень з управління логікою сортування оператором АСЛ незалежно від різних стандартів класифікації ОПВ;
- реалізація визначеної логіки сортування з урахуванням порядку завантаження автомобілів об'єктами поштових відправлень. Цей порядок повинен визначатися параметрами ОПВ (габаритів, ваги тощо) з метою збереження їхньої цілісності під час завантаження й доставки;
- сортування з урахуванням габаритів кузова (контейнера) та вантажопідйомності різних типів вантажного автомобільного транспорту для їх завантаження з пунктів терміналу;
- визначення порядку завантаження кузова (контейнера) об'єктами поштових відправлень з врахуванням порядку їх вивантаження та завантаження на проміжних пунктах доставки.

Для усунення вказаних недоліків модель прийняття рішень АСЛ потребує модифікації управління сортуванням ОПВ на принципах нечіткої логіки. Такий підхід узгоджується з логічною системою, що застосовується в нечітких регуляторах.

2. Постановка задачі дослідження

Метою даного дослідження є вирішення завдання нечіткої класифікації й сортування з урахуванням параметрів ОПВ (габаритів, ваги, оціночної вартості). Досягнення цієї мети дозволить зберегти цілісність ОПВ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- розробка нечіткої моделі прийняття рішень для АСЛ;
- тестування розробленої нечіткої моделі.

Нечітка модель прийняття рішень повинна реалізувати задану логіку сортування за такими умовами:

а) ОПВ розвантажуються й сортируються АСЛ, тобто оброблюються в потоці. Модель прийняття рішень АСЛ отримує параметри ОПВ за штрих-кодом або за даними інших засобів (датчиків). Кінцева мета сортування – доставити ОПВ до ПЗ одного з терміналів. Кожен термінал має декілька ПЗ з числовими найменуваннями «1», «2», «3», ..., «N». За адресою доставки визначається термінал, який заздалегідь відомий (вказується у штрих-кодi ярлику ОПВ);

б) ПЗ терміналу призначені для прийому ОПВ за визначеною класифікацією. Завдання моделі – провести класифікацію за параметрами ОПВ (вага, габарити, оціночна вартість) і розподілити їх за ПЗ;

в) проведене сортування ОПВ повинно реалізувати заданий порядок завантаження автомобілів за ПЗ терміналу, враховуючи такі умови:

1) «на важкий ОПВ можна покласти об'єкт із меншою вагою, але не навпаки». Ця умова також пов'язана з рішенням задачі сортування за габаритами. Для вирішення завдання сортування за цими умовами використовується декілька ПЗ одного терміналу, які поділяються

за діапазонами габаритів і ваги ОПВ. Спочатку йде завантаження ОПВ великої важкості й габаритів, а далі, на іншому пункті, – легших за вагою;

2) ОПВ із великою оціночною вартістю незалежно від габаритів і ваги повинні завантажуватися на окремому пункті й доставлятися під охороною.

3. Розробка нечіткої моделі прийняття рішень

Архітектура нечіткого управління заснована на використанні нечіткої моделі прийняття рішень (моделі нечіткого виведення). У цьому випадку модель прийняття рішень (рис. 1) будується з урахуванням необхідності реалізації всіх етапів нечіткого виведення.

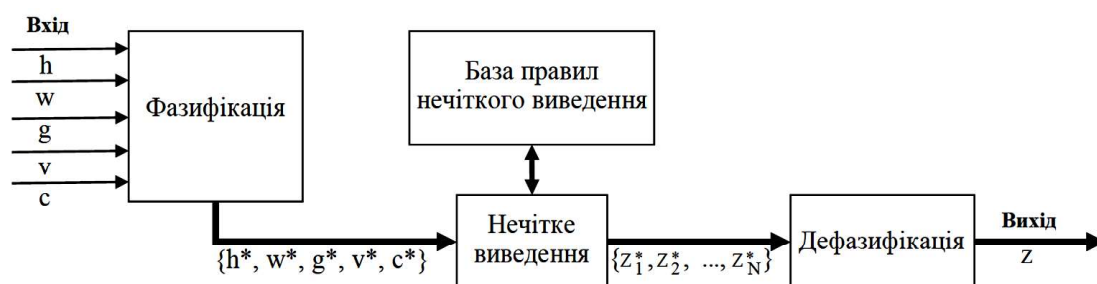


Рис. 1. Нечітка модель прийняття рішень АСЛ

Для здійснення сортування нечітка модель прийняття рішень повинна провести класифікацію ОПВ за його параметрами й визначити ПЗ, на який він буде транспортований. Процес класифікації реалізується на основі алгоритму нечіткого виведення Такагі-Сугено-Канга.

Нечітка модель прийняття рішень (рис. 1) має п'ять входів і один вихід. Вхідними чіткими параметрами ОПВ є: h – висота, w – ширина, g – глибина, v – вага, c – вартість. Вихідним чітким параметром моделі є номер ПЗ, визначений за проведеною нечіткою класифікацією.

Формалізуємо нечітку модель прийняття рішень (рис. 1) у вигляді бази правил нечіткого виведення. Для цього необхідно визначити лінгвістичні змінні на вході та виході моделі і самі правила.

Поставимо у відповідність ПЗ АСЛ з індексами $n=1, 2, \dots, N$ терм-множину $R=\{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N \rangle\}$. Елементи терм-множини R відповідають числовим найменуванням ПЗ.

Визначимо нечіткі змінні для чітких вхідних $\{h, w, g, v, c\}$ і вихідної z змінних моделі (рис. 1). Цю задачу розглянемо в узагальненому вигляді.

Для вхідної чіткої змінної x визначимо на універсумі U нечіткі множини $\{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N\} \in U, i=1, 2, \dots, N, \exists i \neq j: X_i \cap X_j \neq \emptyset$, кожна з яких відповідає терму з множини R . Нечіткі змінні $\{x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*\}$ визначаються кортежем:

$$\langle x_i^*, U, X_i \rangle = \langle "R_{X_i}", \{x_i^* | (\min x_i < x < \max x_i)\}, X_i \in U, X_i = (\mu_{X_i}(x), x) \rangle, \quad (1)$$

де x – будь-яка вхідна змінна з $\{h, w, g, v, c\}$; $\mu_{X_i}(x)$ – функція приналежності (ФП) чіткої змінної x до нечіткої множини X_i ; " R_{X_i} " – найменування нечіткої змінної x_i^* , що співпадає з термом множини R .

За допомогою ФП $\mu_{X_i}(x)$ здійснюється фазифікація (приведення до нечіткості) вхідної чіткої змінної x . За виразом $x_i^* = \mu_{X_i}(x)$, $i=1,2,\dots,N$, знаходиться N значень ступенів приналежності чіткої x до нечітких змінних x_i^* (до нечітких множин X_i). Ступень приналежності визначається в інтервалі $[0,1]$.

Значення нечітких змінних x_i^* приймає лінгвістична змінна X^* . Визначимо нечітку лінгвістичну змінну $X^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*\}$ у вигляді кортежу

$$X^* = \langle I, R(X^*), U \rangle, \quad (2)$$

де X^* – будь-яка лінгвістична змінна з переліку $\{H^*, W^*, G^*, V^*, C^*\}$; I – найменування нечіткої лінгвістичної змінної X^* : «Пункт завантаження за параметром x »; $R(X^*) = R = \{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N \rangle\}$ – терм-множина лінгвістичної змінної X^* , що містить терми найменувань ПЗ АСЛ, визначених змінними x_i^* .

Визначимо особливості завдання лінгвістичних змінних $\{H^*, W^*, G^*, V^*, C^*\}$. Будемо вважати, що для кожного ПЗ з індексом $n=1, 2, \dots, N-1$ задаються діапазони значень ваги, висоти, ширини і глибини у вигляді нечітких множин $\{H_j, W_m, G_s, V_q\}$ з співпадаючими термами $R(H^*) = R(W^*) = R(G^*) = R(V^*) = \{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \langle 3 \rangle, \dots, \langle N-1 \rangle\} \in R$ і індексами $n=j=m=s=q=1, 2, \dots, N-1$. ПЗ з індексом $n=N$ призначений для прийому ОПВ, оціночна вартість яких перевищила граничну. Тому для C^* визначаються дві нечітких змінних c_1^* і c_2^* на множинах C_1 і C_2 . Нечітка змінна c_1^* приймає значення терму з назвою «1-2-...-(N-1)», що відповідає термам $\{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N-1 \rangle\} \in R$, а для змінної c_2^* визначений терм з назвою «N» $\in R$.

Формалізуємо базу правил системи нечіткого виведення моделі (рис. 1), що описує взаємозв'язок між нечіткими змінними $\{h^*, w^*, g^*, v^*, c^*\}$ та чітким виходом z . Алгоритм Такагі-Сугено-Канга передбачає використання як вихідної продукції лінійної функції. Однак для нечіткої класифікації ОПВ визначається тільки один терм. Тому нечітка база правил є сингтонною [8]. Для сингтонної нечіткої бази правил замість лінійних функцій використовуються чіткі числові значення лінгвістичної змінної Z^* , що визначаються виразом

$$Z^* = \langle I_Z, R(Z^*), U \rangle = \{ \langle z_1^*, U, 1 \rangle, \langle z_2^*, U, 2 \rangle, \dots, \langle z_N^*, U, N \rangle \}, \quad (3)$$

де I_Z – найменування нечіткої лінгвістичної змінної Z^* ; $R(Z^*) = \{ \langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N \rangle \} \in R$ – терм-множина змінної Z^* , що містить найменування ПЗ АСЛ; $\langle z_i^*, U, i \rangle$ – кортежі чітких змінних, значення яких відповідають чисельним значенням ПЗ $\{z_1^*, z_2^*, \dots, z_N^*\} = \{1, 2, \dots, N\}$.

Представимо базу правил системи нечіткого виведення моделі (рис. 1) у вигляді K правил (rule) з п'ятьма умовами для кожного:

$$[\text{Rule } k] : \text{IF}(h \in H_j) \text{ and } \text{IF}(w \in W_m) \text{ and } \text{IF}(g \in G_s) \text{ and } \text{IF}(v \in V_q) \text{ and } \text{IF}(c \in C_i) \rightarrow z = z_k^* \quad (4)$$

де $k=1, 2, \dots, K$ – індекс правила. Всього може бути задано $K=2 \cdot N^4$ правил.

Під операцією визначення приналежності чіткої вхідної змінної x до нечіткої множини X_i в умовах правил (4) розуміється знаходження значення ФП $\mu_{X_i}(x)$. Для нечітких множин операція «AND» (« \wedge ») відповідає операції знаходження перетину « \cap » або мінімізації. Перепишемо правила (4) в іншому вигляді

$$[\text{Rule } k] : \min_{k=1}^K (\mu_{H_j}(h), \mu_{W_m}(w), \mu_{G_s}(g), \mu_{V_q}(v), \mu_{C_i}^{i=\{1,2\}}(c)) \rightarrow z = z_k^* \quad (5)$$

або $[\text{Rule}] : \mu_{Z_k}(z_k^*) \rightarrow z = z_k^*$,

де $\mu_{Z_k}(z_k^*)$ – узагальнене позначення результату активізації k -го правила, яка зводиться до вибору мінімального значення зі значень функцій приналежності $\mu_{V_q}(v)$, $\mu_{H_j}(h)$, $\mu_{W_m}(w)$, $\mu_{G_s}(g)$, $\mu_{C_i}(c)$.

Антецедент j -го правила з (5) складається з п'яти умов. Для нечітких множин H_j , W_m , G_s , V_q індекси j, m, s, q вибираються зі значень $\{1, 2, \dots, N-1\}$, незалежно від індексу правила k . Для нечітких множин C_i індекси вибираються зі значень $\{1, 2\}$. Консеквент правил з формули (5) визначається за чіткими числовими значеннями лінгвістичної змінної Z^* , які відповідають ПЗ.

Для реалізації логіки сортування визначено три критерії сортування, яких треба дотримуватися згідно з правилами (4), (5).

Згідно з першим критерієм, сортування за ПЗ проводиться за оцінкою оціночної вартості ОПВ. Для цього використовується ФП $\mu_{C_2}^{i=2}(c)$, що відповідає умові $c \in C_2$ в правилах (4), із завданням консеквенту $z=N$. Для умови $c \in C_1$, що відповідає ФП $\mu_{C_1}^{i=1}(c)$, використовуються другий та третій критерії, при цьому вплив ФП на розподіл ОПВ за ПЗ не враховується.

Згідно з другим критерієм, сортування за ПЗ проводиться за оцінкою ваги. Для цього використовується ФП $\mu_{V_q}(v)$ (умова $v \in V_q$) з визначення відповідного q -го терму з $R(V^*) = \{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N-1 \rangle\}$, а консеквент z дорівнює значенню терму з $R(V^*)$, незалежно від інших умов.

Згідно з третім критерієм, сортування проводиться за нечіткою класифікацією приналежності ОПВ визначеним ПЗ. Класифікація ведеться за сумісною оцінкою ваги і габаритів ОПВ, кожен з яких поділяється за збільшенням на $(N-1)$ діапазонів, визначених термами $\{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N-1 \rangle\}$ відповідних лінгвістичних змінних.

На етапі активізації правил проводиться визначення ступеня (міри) істинності висновків z_k^* кожного k -го правила за формулою (5). Для дефазифікації (зведення до чіткості) вихідних значень z_k^* використовується вираз, що визначає центр ваги для синглетонних множин

$$z = \frac{\sum_{k=1}^K z_k^* \cdot \mu_{z_k}(z_k^*)}{\sum_{k=1}^K \mu_{z_k}(z_k^*)}. \quad (6)$$

4. Тестування створеної нечіткої моделі

4.1. Реалізація нечіткої моделі прийняття рішень

Розглянемо АСЛ, що містить чотири ПЗ. За логікою сортування, необхідно забезпечити такі умови:

- сортування ОПВ здійснюється за чотирма ПЗ з номерами «1», «2», «3», «4»;
- за параметрами габаритів ОПВ визначаються три терми «1», «2», «3», що позначають номер ПЗ. Для цих термів визначаються розміри габаритів ОПВ – «маленькі», «середні» та «великі» відповідно;
- за параметром ваги ОПВ визначаються три терми «1», «2», «3». Для цих термів визначаються граничні значення ваги ОПВ – «малих», «середніх» та «великих» відповідно;
- за параметром оціночної вартості визначаються два терми. Перший терм «1-2-3» відповідає номерам ПЗ «1», «2», «3», а другий терм «4» – ПЗ з номером «4». Для цих термів визначаються граничні значення оціночної вартості ОПВ: для терму «1-2-3» – «незначна», а для терму «4» – «значна».

Для тестування розробленої моделі використовувалось програмне забезпечення середовища Matlab (версія R2016a-9.0.0.341360). Розроблено модель з п'ятьма входами (рис. 2), які відповідають чітким значенням параметрів ОПВ {h, w, g, v, c}, і одним виходом – чітким значенням ПЗ z.

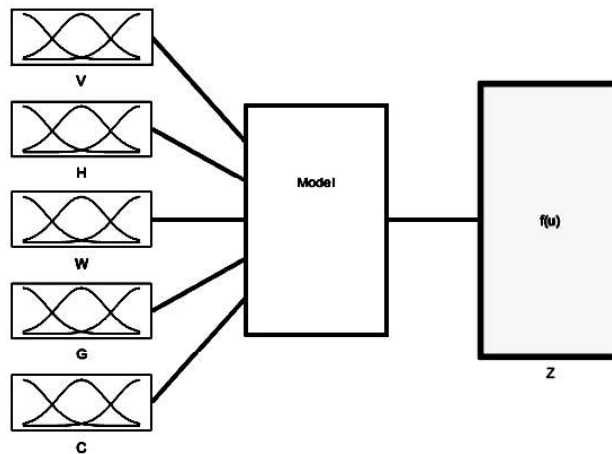


Рис. 2. Нечітка модель прийняття рішень АСЛ

Для реалізації бази правил нечіткого виведення обраний алгоритм Такагі-Сугено-Канга, для якого на етапі дефазифікації використовується метод «wtsum», що відповідає формулі (6).

4.2. Визначення входних і вихідних лінгвістичних змінних

Вхідними чіткими змінними нечіткої моделі (рис. 2) є параметри ОПВ {v, h, w, g, c}. Для реалізації моделі визначені входні нечіткі лінгвістичні змінні {H*, W*, G*, V*} з

трапецієвидними функціями приналежності, діапазони значень нечітких множин $\{H_j, W_m, G_s, V_q\}$, $j=m=s=q=1, 2, 3$ та терми $R(H)=R(W)=R(G)=R(V)=R=\{ "1", "2", "3" \}$, що відповідають найменуванням ПЗ.

Розглянемо приклад визначення нечітких змінних вхідної лінгвістичної змінної V^* для нечітких дискретних множин V_1, V_2, V_3 , що визначаються параметром ваги ОПВ. У відповідності до (1), нечіткі змінні v_1^*, v_2^*, v_3^* можуть бути представлені у вигляді кортежів:

$$\begin{aligned} \langle v_1^*, U, V_1 \rangle &= \langle "1", v_1^* \mid 0 < v < 30 \text{ кг}, X_i \in U, V_1 = (\mu_{V_1}(v), v) \rangle, \\ \langle v_2^*, U, V_2 \rangle &= \langle "2", v_2^* \mid 15 < v < 45 \text{ кг}, X_i \in U, V_2 = (\mu_{V_2}(v), v) \rangle, \\ \langle v_3^*, U, V_3 \rangle &= \langle "3", v_3^* \mid 30 < v < 60 \text{ кг}, X_i \in U, V_3 = (\mu_{V_3}(v), v) \rangle, \end{aligned}$$

де $\mu_{V_i}(v)$ – трапецієвидна ФП нечіткої змінної v_i^* до нечіткої множини V_i .

Значення нечітких змінних приймає лінгвістична змінна. Визначимо лінгвістичну змінну ваги за формулою (2)

$$V^* = \langle I, R(V^*), U \rangle,$$

де $R(V^*)$ – терм-множина лінгвістичної змінної V^* , $R(V^*) = \{ \langle "1" \rangle, \langle "2" \rangle, \langle "3" \rangle \}$; $I = \langle \text{пункт завантаження за вагою} \rangle$ – найменування нечіткої лінгвістичної змінної V^* .

Аналогічно до V^* , визначаються лінгвістичні змінні H^*, W^*, G^*

$$\begin{aligned} H^* &= \langle I, R(H^*), U \rangle = \{ \langle h_1^*, U, H_1 \rangle, \langle h_2^*, U, H_2 \rangle, \langle h_3^*, U, H_3 \rangle \}, \\ W^* &= \langle I, R(W^*), U \rangle = \{ \langle w_1^*, U, W_1 \rangle, \langle w_2^*, U, W_2 \rangle, \langle w_3^*, U, W_3 \rangle \}, \\ G^* &= \langle I, R(G^*), U \rangle = \{ \langle g_1^*, U, G_1 \rangle, \langle g_2^*, U, G_2 \rangle, \langle g_3^*, U, G_3 \rangle \}. \end{aligned}$$

Визначимо лінгвістичну змінну для оціночної вартості з двома термами

$$\begin{aligned} C^* &= \langle I, R(C^*), U \rangle = \{ \langle c_1^*, U, C_1 \rangle, \langle c_2^*, U, C_2 \rangle \}, \\ \langle c_1^*, U, C_1 \rangle &= \langle "1-2-3", c_1^* \mid 0 < c < 65000 \text{ грн.}, C_1 = (\mu_{C_1}(c), c) \rangle, \\ \langle c_2^*, U, C_2 \rangle &= \langle "4", c_2^* \mid 60000 < c < 100000 \text{ грн.}, C_2 = (\mu_{C_2}(c), c) \rangle, \end{aligned}$$

де $R(C^*)$ терм-множина лінгвістичної змінної C^* , $R(C^*) = \{ \langle "1-2-3" \rangle, \langle "4" \rangle \}$, $\mu_{V_i}(v)$ – трапецієвидна ФП нечіткої змінної v_i^* до нечіткої множини V_i .

У відповідності до алгоритма Такагі-Сугено-Канга, для чітких значень вихідної лінгвістичної змінної Z^* синглтонної бази знань ФП не задаються. Для лінгвістичної змінної Z^* визначені чотири терми $R(Z^*) = \{ \langle "1" \rangle, \langle "2" \rangle, \langle "3" \rangle, \langle "4" \rangle \}$ і набір з чотирьох чітких дискретних значень номерів ПЗ $\{z_1^*, z_2^*, z_3^*, z_4^*\} = \{1, 2, 3, 4\}$, що подаються у такому вигляді

$$Z^* = \langle I, R(Z^*), U \rangle = \{ \langle z_1^*, U, 1 \rangle, \langle z_2^*, U, 2 \rangle, \langle z_3^*, U, 3 \rangle, \langle z_4^*, U, 4 \rangle \}.$$

Для проведення моделювання визначені такі данні (табл.2): найменування вхідних $\{H^*, W^*, G^*, V^*, C^*\}$ та вихідної Z^* лінгвістичних змінних; терми нечітких змінних; діапазони значень нечітких множин $\{H_j, W_m, G_s, V_q\}$; параметри трапецієвидної ФП для нечітких множин.

Таблиця 1

Дані, визначені для нечітких лінгвістичних змінних

Тип, найменування, діапазон значень лінгвістичної змінної	Терм нечіткої змінної	Діапазон значень нечітких множин	Параметри трапецієвидної функції приналежності $\mu_{xi}(x) - \text{Trap}[a b c d]$
V*, вхідна, «Пункт завантаження за вагою», [0,60]	$v_1^* - \langle 1 \rangle$	$V_1 \in [0,30]$ кг	[0 0 20 30]
	$v_2^* - \langle 2 \rangle$	$V_2 \in [15,45]$ кг	[15 25 35 45]
	$v_3^* - \langle 3 \rangle$	$V_3 \in [30,60]$ кг	[30 40 60 60]
H*, вхідна, «Пункт завантаження за висотою», [0,150]	$h_1^* - \langle 1 \rangle$	$H_1 \in [0,20]$ см	[0 0 10 20]
	$h_2^* - \langle 2 \rangle$	$H_2 \in [15,105]$ см	[15 25 75 105]
	$h_3^* - \langle 3 \rangle$	$H_3 \in [85,150]$ см	[85 105 150 150]
W*, вхідна, «Пункт завантаження за шириною», [0,150]	$w_1^* - \langle 1 \rangle$	$W_1 \in [0,20]$ см	[0 0 10 20]
	$w_2^* - \langle 2 \rangle$	$W_2 \in [15,105]$ см	[15 25 75 105]
	$w_3^* - \langle 3 \rangle$	$W_3 \in [85,150]$ см	[85 105 150 150]
G*, вхідна, «Пункт завантаження за глибиною», [0,150]	$g_1^* - \langle 1 \rangle$	$G_1 \in [0,20]$ см	[0 0 10 20]
	$g_2^* - \langle 2 \rangle$	$G_2 \in [15,105]$ см	[15 25 75 105]
	$g_3^* - \langle 3 \rangle$	$G_3 \in [85,150]$ см	[85 105 150 150]
C*, вхідна, «ПЗ за вартістю», [0, 1E+05]	$c_1^* - \langle \text{ПЗ-1-2-3} \rangle$	$C_1 \in [0, 6.5E+4]$	[0 0 6E+4 6.5E+4]
	$c_2^* - \langle \text{ПЗ-4} \rangle$	$C_2 \in [6E+4, 1E+5]$	[6E+4 6.5E+4 1E+5 1E+5]
Z*, вихідна, «Пункт завантаження», {1, 2, 3, 4}	$z_1^* - \langle 1 \rangle$	$Z_1=1$	За алгоритмом Такагі-Сугено-Канга, для сингтонної нечіткої бази знань функції приналежності не визначаються
	$z_2^* - \langle 2 \rangle$	$Z_2=2$	
	$z_3^* - \langle 3 \rangle$	$Z_3=3$	
	$z_4^* - \langle 4 \rangle$	$Z_4=4$	

4.3. Завдання бази правил системи нечіткого виведення моделі

База правил системи нечіткого виведення моделі, задана у відповідності до виразів (4) і (5), подається в табл. 2. Для зменшення обсягів опису задані тільки десять правил. Для кожного правила задається антецедент, що містить п'ять умов.

Рядки 1-3 і 9-10 табл. 2 задають правила для реалізації третього критерію, за яким ОПВ розподіляються за трьома ПЗ в залежності від трьох значень нечітких змінних, що визначають нечіткі діапазони (множини) ваги і габаритів за збільшенням.

Таблиця 2

База правил системи нечіткого виведення

№	Умови антецеденту									Консеквент
	Умова 1	\wedge	Умова 2	\wedge	Умова 3	\wedge	Умова 4	\wedge	Умова 5	
1	IF(v*is V ₁)	\wedge	IF(h*is H ₁)	\wedge	IF(w*is W ₁)	\wedge	IF(g*is G ₁)	\wedge	IF(c*is C ₁)	$z_1=1$
2	IF(v*is V ₂)	\wedge	IF(h*is H ₂)	\wedge	IF(w*is W ₂)	\wedge	IF(g*is G ₂)	\wedge	IF(c*is C ₁)	$z_2=2$
3	IF(v*is V ₃)	\wedge	IF(h*is H ₃)	\wedge	IF(w*is W ₃)	\wedge	IF(g*is G ₃)	\wedge	IF(c*is C ₁)	$z_3=3$
4	IF(v*is V ₂)	\wedge	IF(h*is H ₁)	\wedge	IF(w*is W ₁)	\wedge	IF(g*is G ₁)	\wedge	IF(c*is C ₁)	$z_2=2$
5	IF(v*is V ₃)	\wedge	IF(h*is H ₂)	\wedge	IF(w*is W ₂)	\wedge	IF(g*is G ₂)	\wedge	IF(c*is C ₁)	$z_3=3$
6	IF(v*is V ₁)	\wedge	IF(h*is H ₁)	\wedge	IF(w*is W ₁)	\wedge	IF(g*is G ₁)	\wedge	IF(c*is C ₂)	$z_4=4$
7	IF(v*is V ₂)	\wedge	IF(h*is H ₂)	\wedge	IF(w*is W ₂)	\wedge	IF(g*is G ₂)	\wedge	IF(c*is C ₂)	$z_4=4$
8	IF(v*is V ₃)	\wedge	IF(h*is H ₃)	\wedge	IF(w*is W ₃)	\wedge	IF(g*is G ₃)	\wedge	IF(c*is C ₂)	$z_4=4$
9	IF(v*is V ₁)	\wedge	IF(h*is H ₂)	\wedge	IF(w*is W ₂)	\wedge	IF(g*is G ₂)	\wedge	IF(c*is C ₁)	$z_1=2$
10	IF(v*is V ₁)	\wedge	IF(h*is H ₃)	\wedge	IF(w*is W ₃)	\wedge	IF(g*is G ₃)	\wedge	IF(c*is C ₁)	$z_3=3$

Рядки 4-5 табл. 2 задають правила для реалізації другого критерію, за яким ОПВ розподіляються за ПЗ в залежності від трьох значень нечітких змінних ваги, незалежно від габаритів ОПВ.

Рядки 6-8 табл. 2 задають правила для реалізації першого критерію, якщо значення оціночної вартості буде належати нечіткій змінній $c_2 \in C_2$, то незалежно від ваги і габаритів ОПВ розподіляються до одного (4-го) ПЗ.

4.4. Тестування нечіткої системи виведення моделі

Тестування нечіткої системи виведення моделі проводилось за допомогою системи перегляду правил «Rule Viewer». Система «Rule Viewer» дозволяє візуально подати весь процес нечіткого виведення з відображенням залежності значень вхідних і вихідних змінних (рис. 3).

На рис. 3 візуально подається один з варіантів процесу нечіткого виведення з реалізацією оцінки значень вхідних і вихідних змінних нечіткої моделі, а також вплив кожного з десяти правил (табл. 2) на результат нечіткого виведення. Для кожного пронумерованого правила за горизонталлю подаються графічні зображення ФП для вхідних $\{v, h, w, g, c\}$ змінних. Графічні зображення, що розташовані праворуч за вертикаллю (рис. 3), демонструють процес активізації правил та розрахунку дійсного значення вихідного параметра z за виразом (6). Для видачі команди управління нечітка модель прийняття рішень визначає номер ПЗ шляхом округлення дійсного значення z за правилами математики.

5. Обговорення результатів тестування моделі

У процесі тестування моделі перевірялась можливість здійснення нечіткої класифікації ОПВ за їхніми параметрами у відповідності до заданих правил системи нечіткого виведення для реалізації заданої логіки сортування ОПВ за ПЗ АСЛ. Перевірялись три критерії нечіткої класифікації: перший – за оцінкою параметра вартості ОПВ c ; другий – за оцінкою параметра ваги ОПВ v ; третій – за сумісною оцінкою параметрів ваги v і габаритів ОПВ h, w, g .

Візуальне моделювання підтвердило працездатність визначених правил. Поданий на рис. 3 результат візуального моделювання підтверджує умову сортування за другим критерієм – для габаритів ОПВ за нечіткими значеннями повинен обиратися перший пункт завантаження, але для ваги – другий. За результатом обраний другий ПЗ.

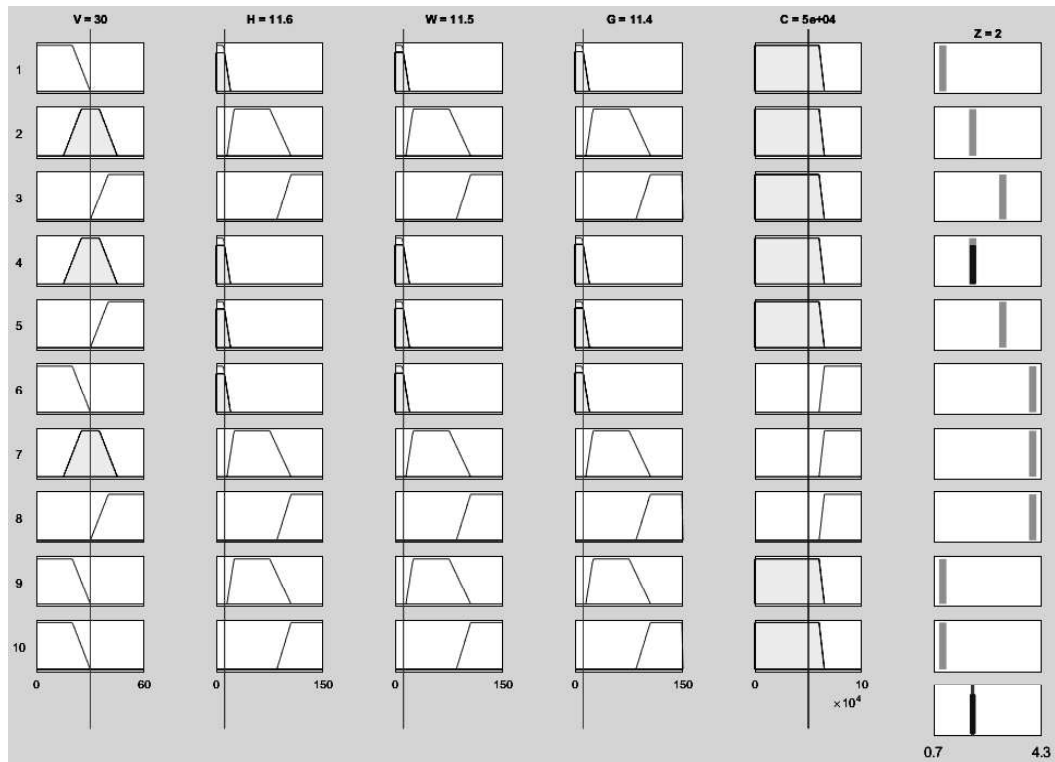
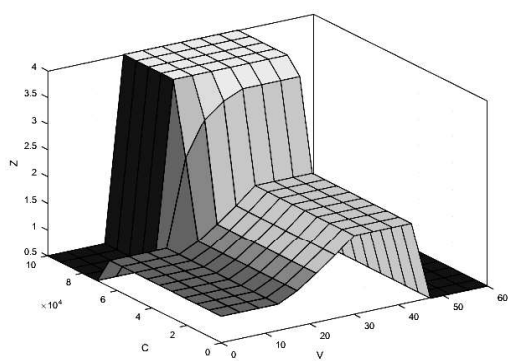
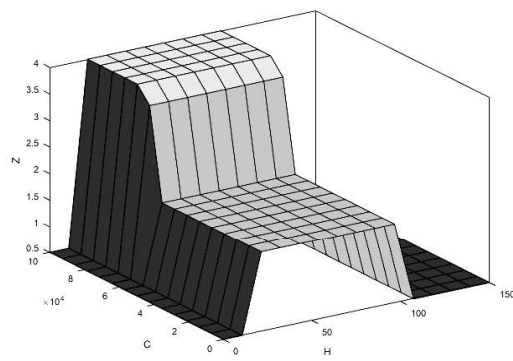


Рис. 3. Процес нечіткого виведення моделі прийняття рішень

Узагальнені результати тестування отримані у вигляді 3D-відгуків системи нечіткого виведення моделі. На рис. 4 подається функція відгуку нечіткої системи виведення моделі для двох варіантів. Для першого варіанта (рис. 4, а) подається функція 3D-відгуку для двох вхідних параметрів: оціночної вартості c , ваги v і вихідного ПЗ z . Для другого варіанта (рис. 4, б) – для оціночної вартості c , висоти h і вихідного ПЗ z .



а) функція відгуку $c - v - z$



б) функція відгуку $c - h - z$

Рис. 4. Функція відгуку нечіткої системи виведення розробленої моделі

Аналіз отриманих функцій відгуку нечіткої системи виведення моделі дозволяє зробити висновок, що усі критерії сортування реалізовані. Розроблена нечітка модель прийняття

рішень АСЛ повністю відповідає поставленій задачі нечіткої класифікації ОПВ та управлінням їх транспортуванням до ПЗ за трьома критеріями.

6. Висновки

У роботі розроблено нечітку модель прийняття рішень, що дозволяє за визначеними умовами реалізувати задану логіку сортування ОПВ за ПЗ. Для цього формалізовано систему нечіткого виведення для проведення нечіткої класифікації ОПВ за параметрами ваги і габаритів. Розподіл ОПВ за ПЗ здійснюється за трьома критеріями оцінки вартості, оцінки ваги та оцінки ваги й габаритів. Проведене моделювання за допомогою середовища Matlab підтвердило працездатність визначених критеріїв управління сортуванням ОПВ за ПЗ.

Перелік посилань:

1. Aashika Prasad, Gowtham M., Mohanraman S., Suresh, M. Automatic Sorting Machine. *International research journal of multidisciplinary technovation (IRJMT)*, 2020. 2(1). P.7-12. DOI: <https://doi.org/10.34256/irjmt2102>.
2. Riky Tri Yunardi, Winarno, Pujiyanto. Contour-based object detection in Automatic Sorting System for a parcel boxes. *International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA)*. 2015. P. 38-41. <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA.2015.7507998>.
3. Ahamed M., Gu H. Package sorting control system based on barcode detection. *2022 7th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*. Xi'an, China. 2022. P. 148-152. <https://doi.org/10.1109/CACRE54574.2022.9834212>.
4. Oladapo B.I., Balogun V.A., Adeoye A.O.M., Ijagbemi C.O., Oluwole A.S., Daniyan I.A., et al. Model design and simulation of automatic sorting machine using proximity sensor. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2016. Vol. 19. P. 1452-1456. <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2016.04.007>.
5. Sheth S., Kher R., Shah R., Dudhat P., Jani P. Automatic sorting system using machine vision. *Multi-Disciplinary International Symposium on Control, Automation & Robotics*. Nadiad, India. 2010. Vol. 1. P. 1-6. <https://doi.org/10.13140/2.1.1432.1448>.
6. Kannaki S, Karthigai Lakshmi S, Harish V, Manikandan R, Saktheeswaran G. Development of Advanced Automatic Sorting Machine using Weighing Mechanism. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019. Vol. 8 (3). P. 1703-1707. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C4451.098319>.
7. Modular Belt Intelligent Sorting System Product model specification. URL: <https://www.iconveytech.com/download/modular-belt-intelligent-sorting-system-product-model-specification/> (дата звернення: 01.02.2024).
8. Штовба С.Д., Панкевич О. Д., Мазуренко В. В. Залежність точності ідентифікації від обсягу нечіткої сингтонної бази знань. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2011. № 1. С. 73-78. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Itki_2011_1_12 (дата звернення: 01.02.2024).

Надійшла до редколегії 06.02.2024 р.

Гребеннік Ігор Валерійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системотехніки ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: igor.grebnik@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3716-9638>.

Коваленко Олексій Андрійович, аспірант кафедри системотехніки ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: oleksii.kovalenko3@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4779-6161>.