

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ АВТОМОБІЛЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНТРОЛЕРА НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

*Формалізацію задачі гальмування здійснено на основі нечіткої моделі Мамдані. Наведено функції належності термів лінгвістичних змінних, які представляють вхідні та вихідний параметр системи. Запропоновано нечітку базу знань, яка містить сто двадцять шість правил. Детально описано алгоритм нечіткого виведення Мамдані. Наведено результати експериментів. Контролер визначає достатню гальмівну силу, що необхідна для запобігання зіткнення, забезпечуючи плавну їзду для пасажирів автомобіля. В цілому стаття ілюструє концепції моделювання та проектування контролера нечіткої логіки для системи автоматичного гальмування.*

**Ключові слова:** Гальмівна система, коефіцієнт тертя, кут повороту коліс, гальмування, нечітка логіка, алгоритм Мамдані.

### **Abstract**

*The formalization of the braking problem is based on the fuzzy Mamdani model. The membership functions of the terms of linguistic variables, which represent the input and output parameters of the system, are given. A fuzzy knowledge base containing one hundred and twenty-six rules is proposed. The Mamdani fuzzy inference algorithm is described in detail. The results of experiments are given. The controller determines the sufficient braking force required to prevent a collision by providing a smooth ride for the car's occupants. In general, the article illustrates the concepts of modeling and designing a fuzzy logic controller for an automatic braking system.*

**Keywords:** Brake system, coefficient of friction, angle of rotation of the wheels, braking, fuzzy logic, Mamdani algorithm.

### **Вступ**

Неможливо переоцінити вплив дорожньо-транспортних пригод на життя та майно. Транспортний засіб без ефективної гальмівної системи схильний до аварії, і це несе катастрофічні наслідки. Кількість транспортних засобів збільшуються з кожним днем [1]. Це значно ускладнює водіння автомобіля та збільшує частоту виникнення аварійних ситуацій, чому сприяє і швидке зростання кількості користувачів автомобілів, багато з яких не мають професійних навичок водіння. Наслідком цього стають аварії пов'язані з керуванням людиною, що викликаються затримками в часі реакції та помилками в оцінюванні ситуації. Водію важко контролювати швидкість автомобіля і точність гальмування, особливо за раптової появи перед ним рухомого об'єкту.

Гальмівна система автомобіля є найважливішою для зменшення ризику зіткнення транспортних засобів. Зазвичай, вона керується вручну, коли водій натискає на педаль гальма [2]. Якщо гальмо виходить з ладу, результат також може стати непередбачуваним або навіть катастрофічним. Останніми роками було здійснено багато досліджень щодо вдосконалення гальмівної системи транспортних засобів, що забезпечило значне зростання рівня безпеки водіння. Але хоча в основу сучасних гальмівних систем закладають все більш досконалі математичні моделі, фактом залишається те, що поведінка водіїв здебільшого залежить від досвіду, а не від точності цих моделей [3].

### **Виявлення критичного гальмівного шляху**

Для виявлення критичного гальмівного шляху між рухомих транспортних засобом і пішоходом або двома рухомих транспортними засобами скористаємось ультразвуковими датчиками.

Відстань у реальному часі — це відстань між рухомих транспортних засобом та нерухомих об'єктом чи пішоходом або відстань між двома транспортними засобами, що рухаються. Час, необхідний для руху ультразвукових хвиль до перешкоди і назад, є часом польоту (time of flight).

Відстань  $d$ , яка отримується з ультразвукового датчика в реальному часі, визначатиме за формулою (1):

$$d = \frac{\text{time of flight}}{2} \times \text{speed of sound} \quad (1)$$

Швидкістю ходу пішохода нехтують відносно автомобіля А і приймають її рівною нулю. Тоді критичний гальмівний шлях між автомобілем А та пішоходом задається формулою (2):

$$d_{c1} = V_A \left( t_r + \frac{t_i}{2} \right) + \frac{V_A^2}{2\mu g} + d_{\min} \quad (2)$$

де  $d_{c1}$  – критичний гальмівний шлях для уповільнення;  $d_{\min}$  – мінімальна відстань між перешкодою та транспортним засобом  $i$ , коли він зупиняється;  $V_A$  – швидкість автомобіля А;  $t_r$  – сума часу реакції водія та координатії гальмування (0,8 - 1,2с);  $t_i$  – час зростання уповільнення гальмування (0,1- 0,2с);  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $g$  – прискорення під дією сили тяжіння (9,81 м/с<sup>2</sup>).

Рівняння (2) використовується для нерухокої перешкоди або пішохода, швидкість якого вважається рівною нулю. Обчислене значення критичного гальмівного шляху  $d_{c1}$  порівнюється з відстанню в реальному часі  $d$  між транспортним засобом і нерухокою перешкодою. За виконання умови  $d > d_{c1}$  транспортний засіб зможе зберегти початкову швидкість, а пішохід може безпечно перетнути дорогу. Якщо ж виконується умова  $d \leq d_{c1}$ , а водій все ще не пригальмує або не вживає інших заходів безпеки, стан вважається небезпечним і застосовується автоматичне гальмування.

Критичний гальмівний шлях між двома рухомими транспортними засобами (автомобіль А та автомобіль В) можна отримати відповідно до моделі безпечної відстані під час процесу гальмування за формулою (3):

$$d_{c2} = V_A t_r + \frac{(V_A - V_B) t_i}{2} + \frac{V_A^2 - V_B^2}{2\mu g} + d_{\min} \quad (3)$$

### Розробка бази знань нечіткої системи гальмування

Для формалізації наявних експертних знань щодо процесів гальмування автомобіля використаємо розглянуті вище фактори: дистанцію, швидкість, кут повороту коліс та коефіцієнт тертя. Значення вихідного параметра подамо як силу гальмування у відсотках від максимальної сили гальмування конкретної використовуваної гальмівної системи.

Для узагальнення експертних знань у формі правил гальмування, що відносяться не до окремих конкретних дорожньо-транспортних пригод, а до узагальнених «типових» ситуацій, подамо вхідні та вихідні параметри у вигляді відповідних лінгвістичних змінних. Значення лінгвістичних змінних конкретизуються не конкретними числами, а словами або словосполученнями природної мови, що відповідають певним діапазнам числових (або категоріальних) даних і є дуже зручними для формулювання експертних знань у вигляді тверджень природної мови.

Визначимо лінгвістичні змінні: «Дистанція», «Швидкість», «Кут повороту коліс», «Коефіцієнт тертя».

«Дистанція» (**Distance**). Одиниця вимірювання - метр. Чим ближче автомобіль наближається до перешкоди, тим сильніше треба гальмувати, щоб уникнути зіткнення. Визначимо чотири терми лінгвістичної змінної з діапазнами значень: мала [0;3], середня [3;10], достатня [10-20], довга [20;30], - в межах яких характер процесу гальмування матиме значні відмінності.

«Швидкість» (**Speed**). Одиниця вимірювання - км/год. Висока швидкість автомобіля потребує сильного гальмування, тоді як низька швидкість потребуватиме від нечіткого контролера слабкого

гальмування. Визначимо чотири терми лінгвістичної змінної з діапазонами значень: низька [0;60], середня [60;100], достатня [100-140], велика [140;240].

«Кут повороту коліс» (**Angle**). Одиниця вимірювання - градус. Чим він більший тим сильнішим буде гальмування. Виділимо два терми з діапазонами значень: малий [0;45] і великий [45;90].

«Коефіцієнт тертя» (**CoefficientFriction**). Визначатиметься автоматично під час контрольного гальмування. Характеризує стан дорожнього покриття і впливає на плавність гальмування. Визначимо чотири терми лінгвістичної змінної з діапазонами значень: низький [0;0,1], середній [0,1;0,2], достатня [0,2;0,4], велика [0,4;0,8].

Кількість термів даних лінгвістичних змінних обумовлена динамічністю системи автоматичного гальмування.

Характеристики вхідних лінгвістичних змінних наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Вхідні лінгвістичні змінні

Вхідні лінгвістичні змінні							
Швидкість, км/год		Дистанція, м		Коефіцієнт тертя		Кут повороту коліс, градуси	
<i>Терм</i>	<i>Діапазон</i>	<i>Терм</i>	<i>Діапазон</i>	<i>Терм</i>	<i>Діапазон</i>	<i>Терм</i>	<i>Діапазон</i>
низька	0 - 60	мала	0 - 3	низький	0 - 0.1	малий	0 – 45
середня	60 – 100	середня	3 – 10	середній	0.1 - 0.2	великий	45 – 90
достатня	100 – 140	достатня	10 – 20	достатній	0.2 - 0.4		
висока	140 - 240	довга	20 - 30	високий	0.4 - 0.8		

Зауважимо, що вказані в табл. 1 характеристики будуть встановлені за замовчуванням. Але розроблена система забезпечуватиме можливість їх кастомізації. Тобто, водію буде надано можливість встановлювати власні конкретні значення діапазонів, наприклад, швидкості та дистанції, оскільки для кожного транспортного засобу безпечна дистанція та максимальна швидкість можуть значно різнитися. Крім того, характеристики цих лінгвістичних змінних можуть автоматично змінюватись в режимах навчання на навчальній вибірці, або самонавчання в залежності від умов навколишнього середовища. Також на зміну діапазону швидкості та дистанції будуть впливати обмеження швидкості, які будуть отримуватися автоматично з Google Maps Roads API для поточної місцевості.

На виході нечіткого контролера будемо формувати сигнал гальмування (**Brake\_F**), що визначатиме силу гальмування у відсотках від максимальної сили гальмування конкретної гальмівної системи. Визначимо чотири терми вихідної лінгвістичної змінної з рівними діапазонами значень базової шкали у 25% кожний: незначне [0;25], середнє [25;50], достатнє [50-75], потужне [75;100].

Характеристики вихідної лінгвістичної змінної наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Вихідна лінгвістична змінна

Вихідна лінгвістична змінна	
Гальмування, %	
<i>Терм</i>	<i>Діапазон</i>
низька	0 - 25
середня	25 - 50
достатня	50 - 75
висока	75 - 100

Формалізуємо терми кожної з лінгвістичних змінних, відповідними нечіткими змінними (4):

$$\langle \alpha, X, \tilde{C}(\alpha) \rangle, \quad (4)$$

де  $\alpha$  - назва нечіткої змінної, що є назвою терму лінгвістичної змінної;  $X=\{x\}$  - множина визначення нечіткої змінної (універсальна множина);  $\tilde{C}(\alpha)=\{\langle \mu_{C(\alpha)}(x)/x \rangle, (x \in X)\}$  - нечітка підмножина множини  $X$ , яка описує обмеження на можливі значення нечіткої змінної  $\alpha$ ;  $\mu_{C(\alpha)}(x)/x: X \rightarrow [0,1]$  - функція належності елемента базової множини  $x \in X$  нечіткій множині  $\hat{A}$ . Для кожного конкретного значення  $x \in X$  значення  $\mu_{\hat{A}}(x)$  набуває певного значення з замкненого інтервалу  $[0,1]$ , яке називається ступенем належності елемента  $x \in X$  нечіткій множині  $\hat{A}$ , тобто ступенем відповідності елемента  $x \in X$  поняттю  $\hat{A}$ .

Наприклад, для формалізації значень «Середня» та «Достатня» лінгвістичної змінної «Швидкість», використаємо трикутні функції належності, що визначаються нижньою межею  $a$ , верхньою межею  $b$  і значенням  $m$ , де  $a < m < b$  (5):

$$\mu_A(x) = \left\{ \begin{array}{l} 0, x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, a \leq x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m}, m < x < b \\ 0, x \geq b \end{array} \right\} \quad (5)$$

Отже, функція належності для значення «середня» набуде вигляду  $\mu_{\text{серед}}(40, 80, 120)$ , де  $a = 40$ ,  $m = 80$ ,  $b = 120$ , а для значення «достатня» -  $\mu_{\text{дост}}(100, 120, 160)$ . При цьому швидкість в 90 км/год буде одночасно зі ступенем 0,75 відповідати поняттю (значенню лінгвістичної змінної) «Середня» і зі ступенем 0,25 - поняттю (значенню лінгвістичної змінної) «Достатня» (достатньо висока). При цьому значенням лінгвістичної змінної «Швидкість» у розроблюваній системі буде нечітка множина типу 2 [4]:

$$\text{«Швидкість» (90 км/год)} = (0,75/\text{середня}; 0,25/\text{достатня}).$$

Для формалізації значення «Мала» лінгвістичної змінної «Швидкість», використаємо особливий випадок трапецієвидної R-функції [5] з параметрами  $a = b = -\infty$  (6):

$$\mu_A(x) = \left\{ \begin{array}{l} 0, (x > d) \\ \frac{d-x}{d-c}, c \leq x \leq d \\ 1, x < c \end{array} \right\} \quad (6)$$

При цьому, функція належності для значення «Мала» набуде вигляду  $\mu_{\text{мала}}(40, 80)$ , де  $c = 40$ ,  $d = 80$ .

Для формалізації значення «Велика» лінгвістичної змінної «Швидкість», використаємо особливий випадок трапецієвидної L-функції з параметрами  $a = b = -\infty$  (7):

$$\mu_A(x) = \left\{ \begin{array}{l} 0, (x < a) \\ \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b \\ 1, x > b \end{array} \right\} \quad (7)$$

При цьому, функція належності для значення «Мала» набуде вигляду  $\mu_{\text{мала}}(120, 160)$ , де  $a = 120$ ,  $b = 160$ .

Графічне подання лінгвістичної змінної «Швидкість» = {мала, середня, достатня, велика}, наведено на рис.1.

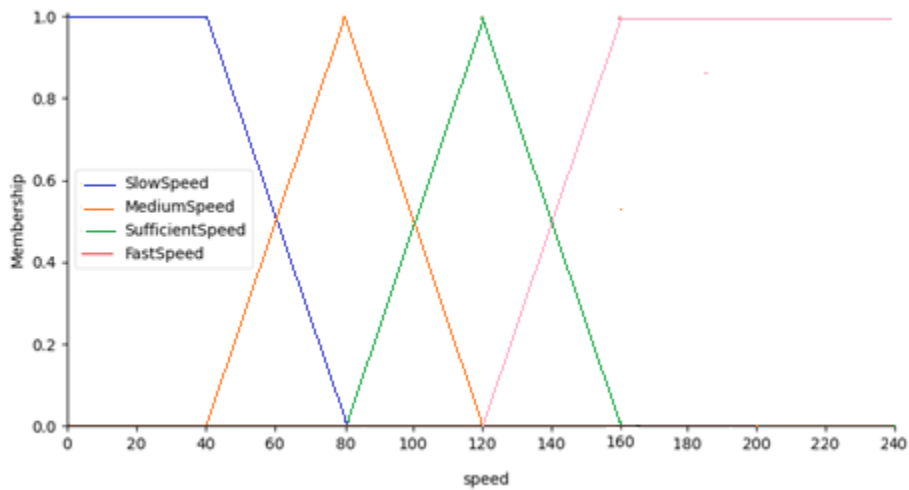


Рисунок 1 – Графічне представлення функції належності швидкості

Аналогічно формалізуємо значення інших вхідних і вихідної лінгвістичної змінної, після чого подамо експертні знання про показники сили гальмування у вигляді нечіткої продукційної моделі висловлювань «ЯКЩО – ТО», що пов'язують вхідні лінгвістичні змінні  $x_1 - x_4$  з одним зі значень вихідної лінгвістичної змінної  $y = \langle \text{Гальмування} \rangle$ :

ЯКЩО  $(x_1 = a_1^{11}) \text{ I } (x_2 = a_2^{11}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_n^{11})$  АБО

$(x_1 = a_1^{12}) \text{ I } (x_2 = a_2^{12}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_n^{12})$  АБО ...

$(x_1 = a_1^{1\delta_1}) \text{ I } (x_2 = a_2^{1\delta_1}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_n^{1k_1}),$

ТО  $y = d_1$ , ІНАКШЕ

...

ЯКЩО  $(x_1 = a_1^{m1}) \text{ I } (x_2 = a_2^{m1}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_n^{m1})$  АБО

$(x_1 = a_1^{m2}) \text{ I } (x_2 = a_2^{m2}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_n^{m2})$  АБО ...

$(x_1 a_1^{mk_m}) \text{ I } (x_2 = a_2^{mk_m}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_n^{mk_m}),$

ТО  $y = d_m$ ,

де  $a_i^{jp}$  - лінгвістичний терм, що оцінює значення фактора  $x_i$  в  $p$ -му рядку  $j$ -ої диз'юнкції, яка вибирається з відповідної терм-множини  $A_i (j = \overline{1, m}, p = \overline{1, k_j}, i = \overline{1, n})$ ;

$k_j$  - кількість правил, що визначають значення вихідної змінної  $y = d_j$ ;

$d_j (j = \overline{1, m})$  - лінгвістична оцінка змінної  $y$ , яка визначається з терм-множини вихідної змінної  $D$ .

Якщо до даної системи ввести операції  $\cup$  (АБО) і  $\cap$  (І), можна записати її більш компактно [6] у вигляді формули (8):

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[ \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \longrightarrow y = d_j, j = \overline{1, m}. \quad (8)$$

Якщо відстань  $d$  у реальному часі між автомобілями А та В перевищує критичний гальмівний шлях  $d_{c2}$ , стан дорожнього руху безпечний, і автомобіль може рухатися з поточною швидкістю. Якщо ж водій не уповільнює швидкість або не вживає інших заходів безпеки коли поточна відстань стає рівною або нижчою за критичний гальмівний шлях, стан вважається небезпечним і починається автоматичне сповільнення гальмування автомобіля А для запобігання його зіткнення з автомобілем В.

### Розробка нечіткої системи логічного виведення

Основною функцією розроблюваної системи нечіткого виведення є забезпечення автоматичного гальмування без будь-якого ручного залучення.

Для реалізації нечіткого виведення використовуємо алгоритм Мамдані гарно пристосований до роботи з експертними знаннями [7]. Завдяки інтерпретаційній та інтуїтивній природі бази правил, нечітка модель Мамдані широко використовується для підтримки прийняття рішень. Експерименти та теоретичні дослідження підтверджують, що алгоритм Мамдані часто дає кращі результати, ніж інші методи в програмах нечіткого керування. Структуру розроблюваної нечіткої системи автоматичного гальмування з чотирма входами і одним виходом наведено на рис. 2.

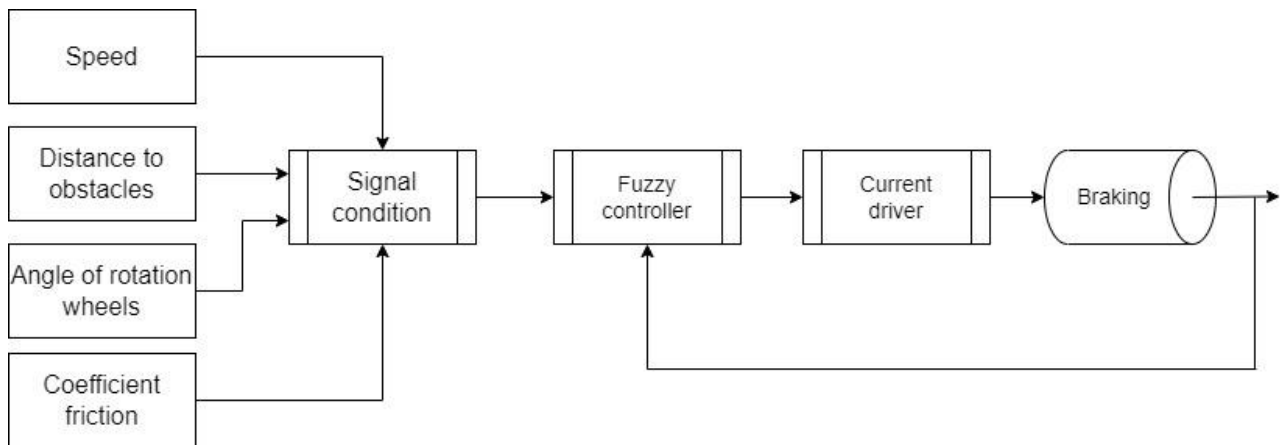


Рисунок 2 – Структура нечіткої системи автоматичного гальмування

По суті система нечіткого виведення (*Fuzzy Inference System*, FIS) визначає нелінійне відображення вектора вхідних даних у вихідний скаляр з використанням нечітких правил. Загальна модель FIS показана на рис.3 [8].

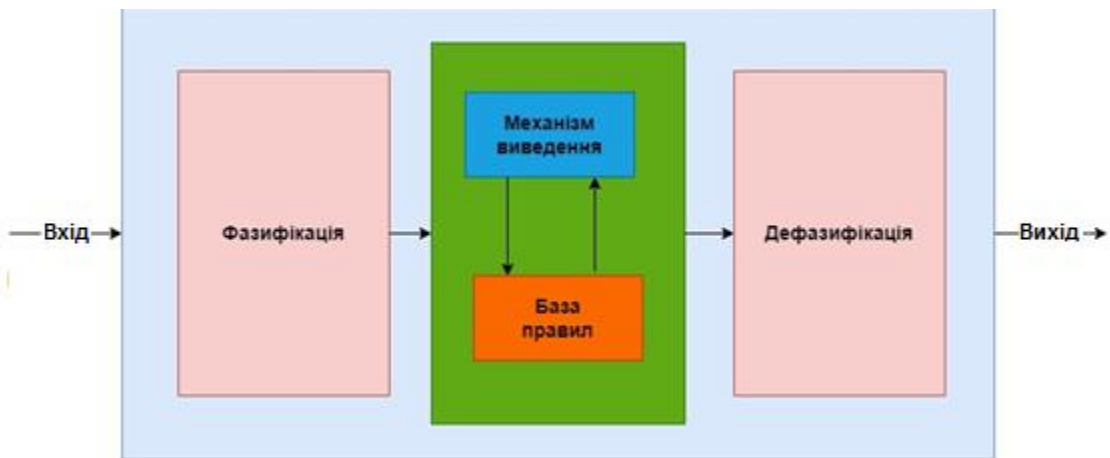


Рисунок 3 – Структурна схема контролера FuzzyLogic

З зображення рис.4 видно, що FIS містить чотири основні компоненти:

- 1) Фазифікація;
- 2) База правил (знань);
- 3) Механізм виведення;
- 4) Дефазифікація.

Фазифікатор перетворює вхідні числа у відповідні нечіткі множини, що необхідно для активації правил, які використовують лінгвістичні змінні. Фазифікатор приймає вхідні чіткі значення і визначає ступінь їх належності до кожного з термів відповідної лінгвістичної змінної.

Механізм логічного виведення з використанням нечітких правил здійснює обчислення термів вихідної лінгвістичної змінної за формулою (17). Це основний блок нечіткої системи гальмування побудований на основі експертних знань і досвіду, який здійснює відображення вхідних нечітких множин на вихідну нечітку множину.

Агрегована нечітка множина з виходу механізму логічного виведення поступає на вхід процесу дефазифікації вихідним результатом якого є чітке значення, що обчислюється в розроблюваній системі автоматичного гальмування методом центроїдної дефазифікації за формулою (9):

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_B(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_B(y_i)} \quad (9)$$

Метод центроїдної дефазифікації знаходить точку «балансу» нечіткої області рішення шляхом обчислення середньозваженого значення вихідної нечіткої області. Це найбільш широко використовуваний метод, оскільки за його використання дефазифіковані значення мають тенденцію плавно переміщатися по вихідній нечіткій області.

## Висновки

У даному дослідженні зосереджено на моделюванні системи автоматичного гальмування з використанням контролера нечіткої логіки на основі комбінування датчиків, призначених для використання в транспортних засобах, які можуть вирішити проблему, коли водії не можуть застосувати гальма вчасно в надзвичайній ситуації і може автоматично знижувати швидкість через виявлення перешкод. Завдяки підключенню ультразвукових датчиків у транспортному засобі, отримана система може виконувати вимірювання з високою точністю, коротким часом зупинки та покращеним вимірюванням короткої відстані. Система дуже підходить у разі щільного паркування, інтенсивного руху, аварійної ситуації та обмежених зон руху. Існуючі системи, що використовують PID-контролери в електронному блоці керування транспортним засобом, тоді як змодельована система використовує Fuzzy Logic для розробки контролера, отже, система є більш надійною та стабільною, ніж аналоги, і буде прийнята споживачами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Barry K. Guide to Automatic Emergency Braking [Електронний ресурс] / Keith Barry – Режим доступу до ресурсу: <https://www.consumerreports.org/car-safety/automatic-emergency-braking-guide-a1780056935/>.
2. Leanse A. Automatic-Emergency-Braking [Електронний ресурс] / Alex Leanse Режим доступу до ресурсу: <https://www.motortrend.com/features/automatic-emergency-braking/>.
3. Understanding automotive braking system [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://studentlesson.com/automotive-braking-system-definition-functions-working/>.
4. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М : Бином. Лаборатория знаний, 2011. 655 с.
5. [Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH.- СПб. 2005 — 736 с
6. Мітюшкін Ю.І, Мокін Б.І., Ротштейн О.П. SoftComputing: ідентифікація закономірностей нечіткими базами знань. Монографіяю - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 145 с.
7. NAUTICA. Методи нечіткого виведення [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://sites.google.com/site/ne4itkalogika/necitka-logika/metodi-necitkogo-vivedenna>.
8. Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems:/ Guanrong Chen, Trung Tat Pham – Boca Raton London New York Washington, D.C., 2013. – 329 p.

**Кісарчук Богдан Миколайович** – студент групи КН-20Мз, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [angruh14@gmail.com](mailto:angruh14@gmail.com)

**Месюра Володимир Іванович** – к.т.н., доцент, професор кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

**Kisarchuk Bohdan Mykolayovych** - Faculty of Intelligent Information Technology and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia,, e-mail: [angruh14@gmail.com](mailto:angruh14@gmail.com)

**Volodymyr Ivanovich Mesyura** – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor, Professor of the Computer Science Chair, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.