

ISSN 2786-9482

Ukrainian Journal of Information Systems and Data Science

since 2023



ISSN 2786-9482

Ukrainian Journal of Information Systems and Data Science

2023

Volume 1

Issue 1

Міжнародний науковий журнал **Ukrainian Journal of Information Systems and Data Science** виходить двічі на рік. Засновник та видавець – Донецький національний університету імені Василя Стуса. Журнал засновано в травні 2023 р. як електронне наукове видання. Журнал публікує статті українською або англійською мовами.
ISSN 2786-9482

- алгоритми та структури даних;
- інформаційні ресурси;
- моделі прийняття рішень;
- мета-евристична оптимізація;
- моделювання та оптимізація мережових систем;
- безпека та надійність складних систем;
- людино-комп'ютерна взаємодія;
- інформаційні системи на основі інтернету речей;
- машинне навчання;
- інженерія знань;
- технології обробки природної мови.

Євген Федоров, Черкаський державний технологічний університет, Україна.

Вінниця: Донецький національний університету імені Василя Стуса, 2023. № 1. 86 с.

Номер зверстано редакційною колегією. Підписано до друку 28 грудня 2023 р.

© Донецький національний університет імені Василя Стуса, 2023

UDC 004

Ukrainian Journal of Information Systems and Data Science is an electronic international scientific journal with two issues per year. Vasyl' Stus Donetsk National University is the founder and publisher of the journal. The journal was founded in May 2023. Articles are published in Ukrainian and English.

ISSN 2786-9482

Topics of the journal include:

- Algorithms And Data Structures;
- Information Resources;
- Decision-Making Models;
- Metaheuristic Optimization;
- Modeling and Optimization of Networked Systems;
- Safety and Reliability of Complex Systems;
- Human-Computer Interaction;
- Internet of Things Systems;
- Machine Learning;
- Knowledge Engineering;
- Natural Language Processing Technologies.

Editor-in-Chief	Serhiy Shtovba , Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, Ukraine.
Vice Editor-in-Chief	Roman Babakov , Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, Ukraine.
Editorial Assistant	Nadiia Potapova , Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, Ukraine

Editorial Board:

Ramiz Aliguliyev, Institute of Information Technology, Azerbaijan;
Oleksandr Androshchuk, Bohdan Khmelnytsky National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine;
Georgios Dounias, University of the Aegean, Greece;
Oksana Zelinska, Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, Ukraine;
Vyacheslav Kovtun, Vinnytsia National Technical University, Ukraine;
Pavlo Kulakov, Uman National University of Horticulture, Ukraine;
Erivelton Nepomuceno, National University of Ireland, Ireland;
Petro Nykolyuk, Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, Ukraine;
Andri Riid, Tallinn University of Technology, Estonia;
Vadym Romanyke, Vinnytsia Trade and Economics Institute of State University of Trade and Economics, Ukraine;
Olexander Rotshtein, Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, Ukraine;
Tetiana Sichko, Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, Ukraine;
Yevhen Fedorov, Cherkasy State Technical University, Ukraine.

Ukrainian Journal of Information Systems and Data Science: international scientific journal / editor-in-chief Serhiy Shtovba. Vinnytsia: Vasyl' Stus Donetsk National University, 2023, vol. 1, issue 1. 86 p.

Ukrainian Journal of Information Systems and Data Science, volume 1, issue 1 is published by the decision of the Academic Council of Vasyl' Stus Donetsk National University, minutes No. 10 of June 30, 2023.

Language editors of the issue are **Olga Soldatova** and **Oksana Kovtun**.

The issue was designed by the editorial board. The issue was signed for publication on December 28, 2023.

Contacts:

Vasyl' Stus Donetsk National University,
600-richchia str., 21, Vinnytsia, 21021,
Ukraine

Phone: +380-68-256-10-56

<https://jujisds.donnu.edu.ua>

© Authors of the articles, 2023

© Vasyl' Stus Donetsk National University, 2023

ЗМІСТ

МОДЕЛІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Олександр Ротштейн, Тетяна Нескородева, Денис Кательніков

Застосування нечіткої когнітивної карти для моделювання російсько-української війни

1-20

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.1

ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Павло Кулаков, Володимир Кучерук, Роман Ліщук, Вікторія Маньковська, Анна Кулакова

Алгоритм виявлення входження тварини на групову доїльну установку

21-35

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.2

Петро Ніколюк

[Ретрагована стаття] Вплив інтелектуального світлофорного регулювання на пропускну здатність міського перехрестя

37-51

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.3

МАШИННЕ НАВЧАННЯ

Анастасія Нескородева

Нейромережеві методи автоматичного визначення пози людини, яка виконує вправи з художньої гімнастики

53-65

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.4

ІНЖЕНЕРІЯ ЗНАНЬ

Сергій Штовба, Роман Резнік

Покращення точності нечіткої бази Мамдані за допомогою суперечливих правил

67-86

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.5

CONTENTS

DECISION-MAKING MODELS

Olexander Rotshtein, Tetiana Neskoro dieva, Denis Katielnikov

Application of a fuzzy cognitive map for the simulation of the Russia-Ukraine war

1-20

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.1

INTERNET OF THINGS SYSTEMS

Pavlo Kulakov, Volodymyr Kucheruk, Roman Lishchuk, Wiktor ia Mankovska, Anna Kulakova

Algorithm for detecting the animal entry into the group milking plant

21-35

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.2

Petro Nikolyuk

[Retracted article] The impact of intelligent traffic signal control on the capacity of an urban-controlled intersection

37-51

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.3

MACHINE LEARNING

Anastasiia Neskoro dieva

Neural network methods for automatic person pose estimation in rhythmic gymnastics exercises

53-65

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.4

KNOWLEDGE ENGINEERING

Serhiy Shtovba, Roman Reznik

Improving the accuracy of the Mamdani fuzzy rule base with double-consequent rules

67-86

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.5

Застосування нечіткої когнітивної карти для моделювання російсько-української війни

Олександр Ротштейн

професор, д-р техн. наук
ORCID: 0000-0002-4048-3014
o.rotshtein@donnu.edu.ua

Донецький національний університет імені Василя Стуса

Тетяна Нескородєва

доцент, д-р техн. наук
ORCID: 0000-0003-2474-7697
t.neskorodieva@donnu.edu.ua

Донецький національний університет імені Василя Стуса

Денис Кательніков

доцент, канд. техн. наук
ORCID: 0000-0002-4150-9650
fuzzy2dik@gmail.com

Вінницький національний технічний університет

Ключові слова:

російсько-українська війна,
нечітка когнітивна карта,
сценарне моделювання,
ядерна загроза,
ранжування факторів впливу,
парні ефекти.

Російсько-українська війна є актуальним об'єктом моделювання засобами дослідження операцій та системного аналізу. Найважливішим аспектом є моделювання загрози застосування ядерної зброї, яка пов'язана з потенційними можливостями Росії. Російсько-українська війна розглядається як динамічна система, змінними якої є фактори, що впливають на втрати російської армії та загрозу застосування ядерної зброї. Для моделювання використовується нечітка когнітивна карта, тобто орієнтований граф, вершини якого – це змінні моделі, а ваги дуг – це сили позитивних та негативних впливів змінних одна на одну. Як фактори, що впливають на втрати російської армії та загрозу ядерного удару, обрані такі: опір української армії, підтримка України зброєю, економічні санкції проти Росії, опозиція російської влади та інстинкт її самозбереження. Сили впливу факторів один на одного та на можливість застосування ядерної зброї оцінюються експертно за допомогою нечітких термів, яким відповідають числові величини. Для налаштування нечіткої когнітивної карти використовується генетичний алгоритм. Генетичний алгоритм знаходить такі сили факторів впливу, які мінімізують розбіжність між результатами моделювання та експертними оцінками. Налаштована нечітка когнітивна карта використовується для сценарного моделювання російсько-української війни за схемою «що буде, якщо» та для ранжування факторів за ступенем їх впливу на рівень ядерної загрози. У цій роботі показано, що нечіткі когнітивні карти є аналогом диференціальних рівнянь, які традиційно використовуються для моделювання динаміки втрат у воєнних конфліктах. Перевага нечіткої когнітивної карти полягає у можливості використання експертної інформації для обліку взаємопов'язаних факторів, що впливають на динаміку втрат та рівень ядерної загрози. Перспективним напрямом подальших досліджень є розширення запропонованої моделі на основі детальної класифікації факторів, що впливають на розвиток російсько-української війни.

Вступ

У ніч на 24 лютого 2022 року Кремль оголосив про проведення «спеціальної воєнної операції в Україні», розв'язавши повноцінну агресивну війну з Україною. Весь світ згуртувався у протистоянні агресивним планам Кремля, виявивши небувалу солідарність із українцями. Спроба швидкого захоплення сусідньої країни провалилася. У відповідь на російську агресію західні країни почали постачання озброєння Україні та оголосили Росії економічні санкції. Це призводить до зростання втрат російської армії та виникнення антивоєнних настроїв у російському суспільстві. Росія має ядерну зброю, застосування якої, на думку провідних політичних експертів, є можливим, якщо не вдасться досягти цілей агресії за допомогою звичайної (конвекціональної) зброї. Факторами, які стримують ядерну загрозу, є опозиція російської влади, викликана економічними санкціями, та інстинкт її самозбереження, тобто страх відповідного ядерного удару з боку Заходу.

Воєнні та бойові дії – це традиційний та історично перший об'єкт моделювання в науці, яка займається дослідженням операцій [1]. Із математичними методами кількісного обґрунтування рішень у цій галузі можна ознайомитися в оглядах [2, 3]. Судячи з прикладних розробок [4], на стратегічному рівні прийняття рішень найбільшого поширення набули диференціальні рівняння Ф. Ланчестера [5], які моделюють динаміку зміни втрат кожної зі сторін, що воюють, залежно від параметрів бойової ефективності зброї та темпу введення резервів. Моделі Ф. Ланчестера мають такі недоліки:

- параметри бойової ефективності, що входять до рівнянь, спираються на статистичні дані, які отримати важко, і достовірність яких може бути сумнівною. Аналогічні проблеми виникають у статистичній теорії надійності систем [6], де відсутність інтенсивностей відмов нових елементів викликає недовіру до розрахунків показників надійності [7];
- фактори (технічні, політичні, економічні та інші), що впливають на динаміку втрат, явно не входять до рівнянь Ф. Ланчестера. Тому під час моделювання різних сценаріїв розвитку бойових дій неможливо варіювати фактори керованих змінних;
- рівняння не пристосовані до роботи з думками експертів, які є чи не єдиним джерелом інформації для моделювання в умовах невизначеності.

Альтернативою диференціальних рівнянь, що моделюють динаміку системи, є нечіткі когнітивні карти (НKK), що набули широкого поширення після виходу робіт [8, 9]. Із застосуванням НKK можна ознайомитися, наприклад, у [10, 11, 12]. НKK являє собою орієнтований граф зі зваженими дугами. Вершини графа – це змінні, які враховуються у моделі, а ваги дуг – це сили впливів змінних одна на одну. Покрокова динаміка значень змінних обчислюється за допомогою рекурентного співвідношення, що нагадує звичайний марківський ланцюг [1]. На відміну від марківського ланцюга, що використовує ймовірність станів і переходів між ними, НKK використовує рівні значень змінних та сили їх впливів, які описуються функціями належності нечітких множин [13]. Застосування в НKK нечіткої математики забезпечує зручність моделювання динаміки систем з якісними змінними, що вимірюються експертно. До того ж дотримується *принцип несумісності (incompatibility) високої складності з високою точністю* [13]. Цікаво зазначити, що моделі, аналогічні НKK, розглядалися в книзі [14] задовго до публікацій [8, 9], однак у численних роботах з НKK книга [14] не згадується.

Доцільність застосування НКК для моделювання воєнних конфліктів впливає з таких аналогій:

- зв'язок рівнянь Ф. Ланчестера [5] з методом динаміки середніх, що безпосередньо впливає з марківських процесів, показана в роботі [1];
- згідно з [1], метод динаміки середніх, що застосовується для моделювання бойових дій, безпосередньо пов'язаний з моделями «хижак – жертва» в динаміці популяцій [15];
- можливість моделювання динаміки популяцій за допомогою НКК показана в [16].

Отже, застосування НКК – це природний напрям розвитку теорії моделювання воєнних дій, заснованої на рівняннях Ф. Ланчестера.

Мета цієї статті – показати застосування НКК для моделювання військово-політичних систем на прикладі російсько-української війни. Враховуючи потенційні можливості однієї з воюючих сторін, основний акцент у моделюванні робиться на прогнозування рівня ядерної загрози та ранжування факторів, що впливають на це. Корисність та необхідність ранжування факторів (причин), що впливають на деяку цільову функцію (наслідок), зазначається в роботі [17] – одній із перших монографій структурного аналізу систем в умовах невизначеності.

Під час написання статті використовувався досвід застосування НКК як засобу емпіричного моделювання надійності, безпеки та ризику в людино-машинних системах [18, 19, 20, 21]. Стаття складається із двох розділів: у першому розділі наводяться основні поняття та алгоритми, необхідні для застосування НКК, у другому розділі – результати моделювання.

Методика моделювання

Загальні відомості

Відповідно до Б. Коско [8], НКК є орієнтованим графом, дуги якого є зваженими нечіткими термами [13]. Вершини графа, які названі *концептами*, відповідають змінним, які враховуються в моделі, а ваги дуг відображають *сили впливів зміни змінних-причин на зміну змінних-наслідків*. Терміном *когнітивний* підкреслюється, що вихідними даними для моделювання є суб'єктивні думки експерта про сили впливів, виражені словами типу *підвищується* або *знижується*. Термін *нечіткі* вказує на те, що НКК використовують різні рівні *підвищення* та *зниження*, які задаються числами з інтервалів $[0, 1]$ і $[-1, 0]$, що відповідає термам *слабо*, *середньо*, *сильно* з теорії нечітких множин [13].

Концепти

Нехай $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ - відома множина концептів, тобто змінних, які використовуються у моделі. Кожен концепт $C_i \in C$ будемо вважати лінгвістичною змінною [13], яка задана на універсальній множині $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ та оцінюється функцією належності $\mu_T(x_i)$ значення $x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ до нечіткого терму T , де $\underline{x}_i$ ($\overline{x}_i$) нижня (верхня) межа інтервалу допустимих значень концепту C_i .

Зауваження. У роботах з НКК, наприклад, [10, 11, 12], концепт оцінюється числом з інтервалу $[0, 1]$, яке відображає ступінь належності до деякого нечіткого терму. У цій роботі концепт C_i оцінюється числом $x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$, яке визначається одним зі способів: (а) експертом

безпосередньо або (b) шляхом дефазифікації експертної оцінки концепту у вигляді нечіткого терму T .

Зв'язки між концептами

Вага w_{ij} дуги, що з'єднує концепти C_i і C_j , вказує на силу впливу C_i на C_j . Нехай концепти C_i і C_j характеризуються змінними x_i та x_j , а внаслідок експерименту вдається побудувати залежність $x_j = \varphi(x_i)$. Тоді вага w_{ij} визначається як похідна $w_{ij} = dx_j/dx_i$, яка може бути однією з трьох видів:

$w_{ij} > 0$, якщо підвищення (зниження) величини x_i призводить до підвищення (зниження) величини x_j (позитивний вплив C_i на C_j);

$w_{ij} < 0$, якщо підвищення (зниження) величини x_i призводить до зниження (підвищення) величини x_j (негативний вплив C_i на C_j);

$w_{ij} = 0$, якщо значення x_j не залежить від значення x_i (відсутність впливу C_i на C_j).

Силу впливу (w_{ij}) будемо оцінювати експертно за допомогою лінгвістичних термів та шкали термометра (табл. 1). Якщо враховуються думки кількох експертів, то величина w_{ij} оцінюється як зважена середня оцінка кожного з експертів.

Таблиця 1. Оцінка сили впливу

Шкала термометра	Лінгвістичні оцінки	Числові значення
	Позитивна максимальна	1
	Позитивна вище за середньої	0.75
	Позитивна середня	0.5
	Позитивна нижче середньої	0.25
	Відсутнє	0
	Негативна нижче середньої	-0.25
	Негативна середня	-0.5
	Негативна вище середньої	-0.75
	Негативна максимальна	-1

Практична можливість експертної оцінки w_{ij} безпосередньо пов'язана із чудовою, як зазначав В. М. Глушков [23], здатністю людського ока виявляти лінійні залежності у задачах екстраполяції.

Рекурентне співвідношення

Для опису коливального процесу у НКК використовуються такі поняття:

- $(n \times n)$ – *матриця сил впливів* концептів C_i один на одного, у якій діагональні елементи дорівнюють нулю, тобто:

$$W_0 = \begin{bmatrix} 0 & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & 0 & \dots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

- *Початковий стан* НКК, який визначається вектором:

$$\mathbf{X}^{(0)} = [x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}], \quad (2)$$

елементи якого дорівнюють значенням концептів на кроці $k=0$.

- *Стационарний стан* НКК, який визначається вектором:

$$\mathbf{X}^{(l)} = [x_1^{(l)}, x_2^{(l)}, \dots, x_n^{(l)}] \quad (3)$$

на такому кроці l , коли внаслідок взаємодії між концептами НКК входить у сталий режим, за якого $|x_i^{(l)} - x_i^{(l-1)}| < \varepsilon$, де ε – мале додатне число, $i=1, 2, \dots, n$.

Зауваження. Стационарний стан, до якого сходиться коливальний процес у НКК, може відповідати одному з видів стійкості [24]: фокус, орбіта чи хаотичний аттрактор.

Для отримання рекурентного співвідношення, що моделює динаміку НКК, будемо використовувати збільшення значень концептів на кроках $k=0, 1, 2, \dots$. Значення концепту C_i на кроці $(k+1)$ залежить від значень концептів C_j ($j=1, 2, \dots, n$) на попередньому кроці k . Позначимо цю залежність як:

$$x_i^{(k+1)} = \Psi(x_1^{(k)}, \dots, x_j^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}). \quad (4)$$

Із (4) випливає взаємозв'язок приростів (Δ) значень концептів на сусідніх кроках k і $(k+1)$:

$$\Delta x_i^{(k+1)} = \frac{\partial x_i^{(k+1)}}{\partial x_1^k} \Delta x_1^{(k)} + \dots + \frac{\partial x_i^{(k+1)}}{\partial x_j^k} \Delta x_j^{(k)} + \dots + \frac{\partial x_i^{(k+1)}}{\partial x_n^k} \Delta x_n^{(k)}. \quad (5)$$

Частинні похідні (5) відповідають силам впливів концептів один на одного $\frac{\partial x_i^{(k+1)}}{\partial x_j^k} = w_{ji}$.

Тому співвідношення (5) можна записати у вигляді:

$$\Delta x_i^{(k+1)} = \sum_{j=1}^n \Delta x_j^k w_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

$$\Delta x_i^{(k+1)} = x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}, \quad \Delta x_i^{(k)} = x_i^{(k)} - x_i^{(k-1)}. \quad (7)$$

З урахуванням (6) та (7) отримуємо рівняння динаміки покрокової зміни значень концептів:

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \sum_{j=1}^n (x_j^{(k)} - x_j^{(k-1)}) w_{ji}. \quad (8)$$

Співвідношення (8) можна подати в такій матричній формі:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} \oplus (X^{(k)} \ominus X^{(k-1)})W_0, \quad (9)$$

де « $\oplus$ » та « $\ominus$ » – операції поелементного додавання та віднімання векторів, які виконуються за схемою:

$$[a, b] \oplus [c, d] = [a + c, b + d],$$

$$[a, b] \ominus [c, d] = [a - c, b - d].$$

У (9) передбачається, що за $k=0$:

$$X^{(1)} = X^{(0)} \oplus X^{(0)}W_0.$$

Прогнозування значення вихідної змінної

Розглянемо систему «входи – вихід», у якій концепт C_n – це вихідна змінна, інші концепти $C_1, C_2, \dots, C_{n-1}$ – це вхідні змінні, що впливають одна на одну. Тоді прогнозування значення вихідної змінної здійснюється за таким алгоритмом:

Крок 1. Установити початковий стан НКК (2):

$$X^{(0)} = [x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_{n-1}^{(0)}, x_n^{(0)} = 0], \quad x_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i], \quad (10)$$

Крок 2. За рекурентним співвідношенням (9) обчислити вектор (3) значень концептів у стаціонарному стані.

Крок 3. В отриманому векторі (3) зафіксувати значення $x_n^{(l)}$ та вважати його прогнозом $\widehat{x}_n$ виходу для поточного вхідного вектора (10).

Ранги концептів-входів характеризують їх важливість у сенсі впливу на концепт-вихід. Методика ранжування концептів НКК запропонована у [18]. Індекс важливості вхідного концепту C_j відповідає величині $x_n^{(l)} = \widehat{x}_n$, отриманій для вектора (10), у якому значення концепту C_j задано на верхньому рівні, інші концепти-входи задано на нижніх рівнях. Аналогічно обчислюються індекси спільного впливу кількох вхідних концептів.

Налаштування НКК

Налаштування НКК аналогічне до знаходження невідомих параметрів звичайного рівняння регресії методом найменших квадратів [20]. У разі НКК невідомими параметрами є сили впливів (1). Вони задаються експертно, тому не гарантується збіг прогнозів з експериментальними даними. Суть налаштування полягає в тому, щоб покращити експертні оцінки сил впливів (1) з урахуванням спостережень за вихідними величинами.

Вважатимемо, що внаслідок спостережень вдається зібрати дані, які представлені в табл. 2, де x_{ip} – значення концепту C_i у спостереженні p , $i=1, 2, \dots, n$; $p=1, 2, \dots, N$, N – кількість спостережень. Передбачається, що значення x_{ip} у табл. 2 отримані методом експертних оцінок. Параметрами НКК, які налаштовуються за результатами спостережень,

є ваги дуг $w_{ij} \in [\underline{w}_{ij}, \overline{w}_{ij}]$, де $\underline{w}_{ij}$ та $\overline{w}_{ij}$ – нижня та верхня межі інтервалу допустимих значень w_{ij} .

Таблиця 2. Спостереження «входи – вихід»

№	Входи				Вихід
	C_1	C_2	...	C_{n-1}	C_n
1	x_{11}	x_{21}	...	$x_{n-1,1}$	x_{n1}
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
p	x_{1p}	x_{2p}	...	$x_{n-1,p}$	x_{np}
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
N	x_{1N}	x_{2N}	...	$x_{n-1,N}$	x_{nN}

Позначимо через $\widehat{x}_n = F(\mathbf{X}_0, \mathbf{W}_0)$ модель залежності «входи – вихід», яка відповідає алгоритму прогнозування. За цією моделлю та інформацією з табл. 2 знайдемо відхилення:

$$\varepsilon_p = x_{np} - \widehat{x}_{np}, \quad p = 1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

де x_{np} – значення виходу в p -му спостереженні;

$\widehat{x}_{np}$ – прогноз виходу за значень входів з p -го спостереження, тобто $\widehat{x}_{np} = F(x_{1p}, x_{2p}, \dots, x_{n-1,p}, x_{np} = 0, \mathbf{W}_0)$.

Дотримуючись прийнятого в регресійному аналізі методу найменших квадратів, задачу налаштування НКК з урахуванням спостережень сформулюємо так: знайти таку матрицю сил впливів $\mathbf{W}_0 = [w_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n]$, елементи якої задовольняють обмеження $w_{ij} \in [\underline{w}_{ij}, \overline{w}_{ij}]$ і мінімізують суму квадратів відхилень (11), тобто:

$$S(\mathbf{W}_0) = \sum_{p=1}^N (x_{np} - F(\mathbf{X}_p, \mathbf{W}_0))^2 \xrightarrow{\mathbf{W}_0} \min, \quad (12)$$

де $\mathbf{X}_p = [x_{1p}, x_{2p}, \dots, x_{n-1,p}, x_{np} = 0], p = 1, 2, \dots, N$.

Нижче продемонструємо методику вибору інтервалів допустимих значень ваг дуг та генетичний алгоритм розв'язання задачі (12) на прикладі НКК російсько-української війни.

Результати моделювання НКК воєнного конфлікту

Концепти, що використовуються у НКК російсько-української війни, представлені у табл. 3 зі зазначенням інтервалів можливих значень змінних. Список концептів обраний експертно і відображає думку авторів про об'єкт моделювання. Побудова докладної ієрархії факторів, що впливають на рівень воєнного протистояння між Росією та Україною, є самостійним науковим завданням, яке в цій роботі не розглядається.

Граф НКК показано на рис. 1. Ваги дуг графа, що відбивають сили впливів концептів, вибрано експертно з урахуванням табл. 1. Матриця (1) сил впливів має вигляд:

$$W_0 = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \end{matrix} & \left| \begin{array}{ccccccc} 0 & 0 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0.75 \\ 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.55 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 & -0.25 & 0 & 0.75 & 0 \end{array} \right| \end{matrix} \quad (13)$$

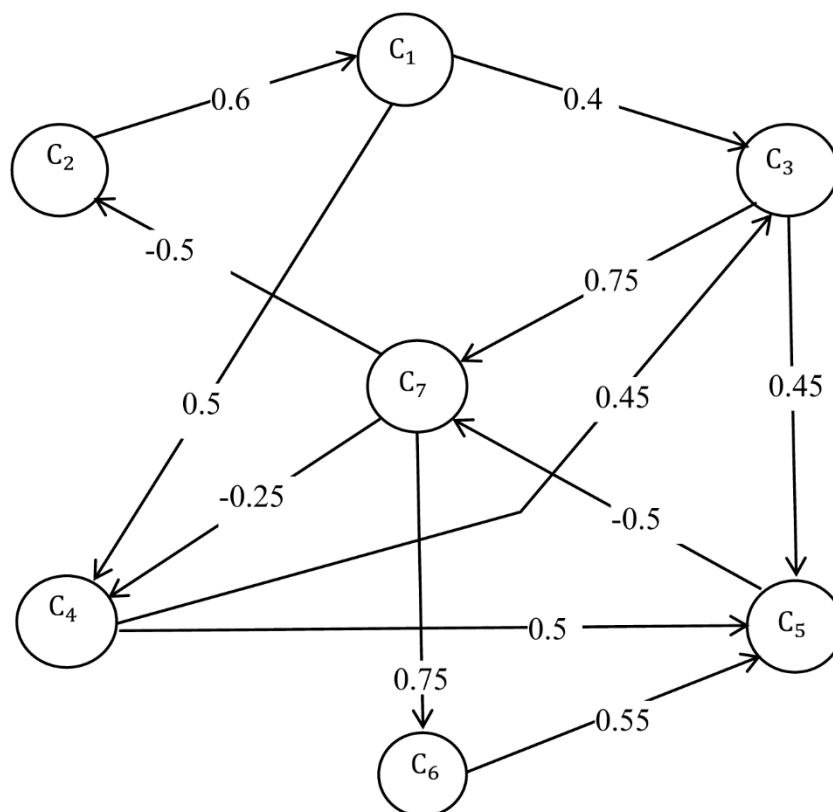


Рисунок 1. НКК воєнного конфлікту

Таблиця 3. Концепти моделі конфлікту

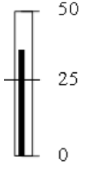
Концепт	Зміст	Інтервал для оцінки
C_1	Опір української армії	[0, 50]
C_2	Підтримка української армії зброєю	[0, 50]
C_3	Втрати російської армії	[0, 50]
C_4	Економічні санкції на Росію	[0, 50]
C_5	Опозиція російської влади	[0, 50]
C_6	Інстинкт самозбереження російської влади	[0, 50]
C_7	Загроза ядерного удару	[-25, 25]

Для експертної оцінки змінних, що відповідають концептам із табл. 2, будемо використовувати шкали, представлені в табл. 4 і 5.

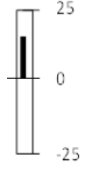
Зауваження. Числові значення, які розташовані навпроти лінгвістичних оцінок у табл. 1, 2 та 5, відповідають максимумам функцій належності нечітких термів [13].

Матриця (13) спільно з рекурентним співвідношенням (9) дає змогу спостерігати покрокову зміну значень концептів із табл. 3 для заданого початкового вектора (2).

Таблиця 4. Оцінка рівня концептів $C_1, C_2, \dots, C_6$

Шкала	Лінгвістичні оцінки	Числа
	Високий	50
	Вище середнього	37.5
	Середній	25
	Нижче середнього	12.5
	Низький	0

Таблиця 5. Оцінка рівня концепту C_7

Шкала	Лінгвістичні оцінки	Числа
	Максимальний	25
	Підвищений	12.5
	Стабільний	0
	Знижений	-12.5
	Мінімальний	-25

У прикладі на рис. 2 за початкового стану НКК $X^{(0)} = [40 \ 25 \ 15 \ 20 \ 10 \ 5 \ 0]$ отримуємо такий стаціонарний стан: $X^{(l)} = [52 \ 20 \ 55 \ 43 \ 63 \ 12 \ 10]$. У цьому векторі значення $\hat{x}_7 = 10$ може інтерпретуватися як деяке підвищення ризику ядерної загрози.

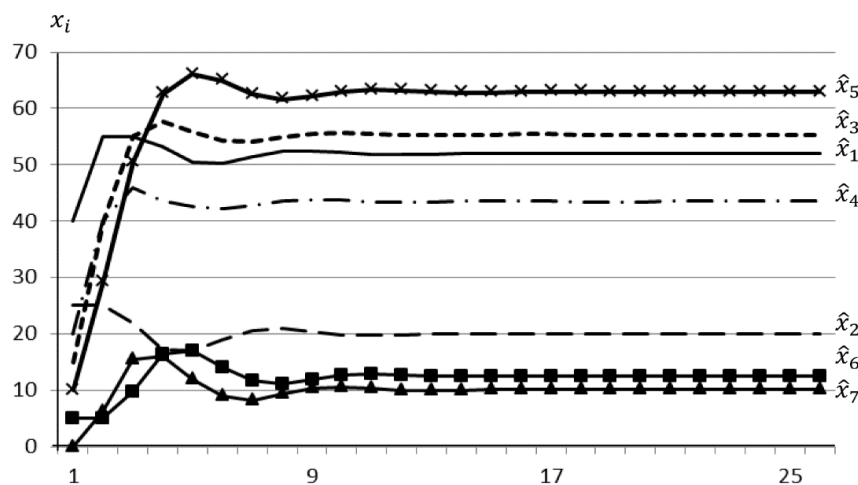


Рисунок 2. Приклад динаміки зміни значень концептів за початкового вектора $X^{(0)} = [40 \ 25 \ 15 \ 20 \ 10 \ 5 \ 0]$

Зауваження. Застосування рекурентного співвідношення (9) може призвести до того, що накопичені значення концептів у стаціонарному стані виходять за інтервали допустимих значень. Оскільки це не впливає на якісний характер висновків, процедура нормування з [20] у цій статті не використовується.

Налаштування НКК

Інтервали ваг дуг. Параметрами НКК, які налаштовуються за результатами спостережень, є ваги дуг $w_{ij} \in [\underline{w}_{ij}, \overline{w}_{ij}]$. Під час вибору інтервалів $[\underline{w}_{ij}, \overline{w}_{ij}]$ орієнтуємося на такі припущення:

- вид впливу $w_{ij} > 0$, $w_{ij} < 0$ або $w_{ij} = 0$ визначається експертно і під час налаштування НКК не змінюється;
- сила впливу w_{ij} оцінюється експертом з точністю до одного лінгвістичного терму (див. табл. 1), тобто ± 0.2 ;
- сили позитивних $w_{ij} > 0$ та негативних $w_{ij} < 0$ впливів змінюються в інтервалах $[0.05, 0.95]$ та $[-0.95, -0.05]$ відповідно.
- З урахуванням цих припущень інтервали ваг дуг НКК вибираються за схемою (табл. 6): $0.3 \in [0.1, 0.5]$; $-0.3 \in [-0.5, -0.1]$; $0.1 \in [0.05, 0.3]$; $-0.1 \in [-0.3, -0.05]$; $0.8 \in [0.6, 0.95]$; $-0.8 \in [-0.95, -0.6]$.

Таблиця 6. Інтервали зміни ваг дуг

Вага	$\underline{w_{ij}}$	$\overline{w_{ij}}$
w_{13}	0.05	0.45
w_{14}	0.3	0.7
w_{21}	0.3	0.7
w_{35}	0.05	0.45
w_{37}	0.55	0.95
w_{43}	0.05	0.45
w_{45}	0.3	0.7
w_{57}	-0.7	-0.3
w_{65}	0.55	0.95
w_{72}	-0.7	-0.3
w_{74}	-0.45	-0.05
w_{76}	0.55	0.95

Генетичний алгоритм. Для розв'язання нелінійної задачі оптимізації (12) пропонується генетичний алгоритм, заснований на таких поняттях та операціях [25]: хромосома – закодований варіант розв'язку; популяція – початкові варіанти розв'язку; фітнес-функція – функція для розрахунку критерію відбору варіантів; схрещування – операція генерування хромосом-нащадків з хромосом-батьків; мутація – випадкова зміна елементів хромосоми.

Загальна структура генетичного алгоритму наведена нижче. В ній через $P(t)$ позначено батьківські хромосоми, а через $C(t)$ – хромосоми-нащадки на t -й ітерації алгоритму.

begin

```

t = 0; задати початкове значення P(t);
< оцінити P(t) за допомогою функції відповідності >
while (поки не виконані умови завершення) do
    < схрестити P(t) і отримати C(t) >
    < зробити мутацію C(t) >
    < оцінити C(t) за допомогою фітнес-функції >
    < обрати P(t+1) з P(t) і C(t) >
    t = t + 1;

```

end

end.

Хромосома визначається як рядок із ненульових елементів матриці $\mathbf{W}_0 = [w_{ij}]$, $w_{ij} = R[\underline{w_{ij}}, \overline{w_{ij}}]$, де $R[\underline{x}, \overline{x}]$ – операція вибору випадкового числа, рівномірно розподіленого на інтервалі $[\underline{x}, \overline{x}]$. Наприклад, для НКК на рис. 1 генератором початкової популяції хромосом є рядок:

$$[w_{13}, w_{14}, w_{21}, w_{35}, w_{37}, w_{43}, w_{45}, w_{57}, w_{65}, w_{72}, w_{74}, w_{76}],$$

$$\begin{aligned} \text{де } w_{13} &= R[0.05, 0.45], & w_{14} &= R[0.3, 0.7], \\ w_{21} &= R[0.3, 0.7], & w_{35} &= R[0.05, 0.45], \\ w_{37} &= R[0.55, 0.95], & w_{43} &= R[0.05, 0.45], \\ w_{45} &= R[0.3, 0.7], & w_{57} &= R[-0.7, -0.3], \\ w_{65} &= R[0.55, 0.95], & w_{72} &= R[-0.7, -0.3], \\ w_{74} &= R[-0.45, -0.05], & w_{76} &= R[0.55, 0.95]. \end{aligned}$$

Звідси приклади хромосом:

$$[0.40, 0.36, 0.54, 0.44, 0.64, 0.13, 0.64, -0.44, 0.81, -0.38, -0.19, 0.67], \quad (13)$$

$$[0.43, 0.69, 0.66, 0.41, 0.85, 0.26, 0.65, -0.63, 0.84, -0.40, -0.31, 0.65]. \quad (15)$$

Схрещування пари хромосом-батьків породжує хромосому-нащадка. Операція схрещування виконується випадковим обміном генами (елементами) хромосом-батьків. Для цього кожному гену хромосоми-нащадка ставиться у відповідність випадкове число $\xi_1 = R[0,1]$. Якщо $\xi_1 \leq 0.5$, цей ген береться в першого з батьків, інакше ген береться у другого з батьків. Нехай хромосоми-батьки задаються рядками (14) і (15), а випадкові числа ξ_1 відповідають рядку $[0.23, 0.54, 0.80, 0.14, 0.71, 0.58, 0.78, 0.06, 0.04, 0.06, 0.55, 0.30]$. Тоді внаслідок схрещування (14) і (15) отримуємо хромосому-нащадка:

$$[0.40, 0.69, 0.66, 0.44, 0.85, 0.26, 0.65, -0.44, 0.81, -0.38, -0.31, 0.67]., \quad (16)$$

Мутації може піддаватися кожен ген (16). Для цього кожному гену ставиться у відповідність випадкове число $\xi_2 = R[0,1]$ і задається коефіцієнт мутації q (в даному випадку $q=0.1$). Якщо $\xi_2 \leq q$, цей ген замінюється випадковим числом з інтервалу допустимих значень.

Нехай рядок випадкових чисел ξ_2 має вигляд:

$$[0.05, 0.66, 0.71, 0.01, 0.18, 0.83, 0.59, 0.68, 0.13, 0.43, 0.43, 0.78].$$

У хромосомі (16) піддаються мутації тільки перший і четвертий гени, і після цього хромосома-нащадок набуває вигляду:

$$[0.28, 0.69, 0.66, 0.08, 0.85, 0.26, 0.65, -0.44, 0.81, -0.38, -0.31, 0.67],$$

$$\text{де } 0.28 = R[0.05, 0.45], 0.08 = R[0.05, 0.45].$$

Фітнес-функцією є критерій (12) зі знаком мінус.

Відбір хромосом-батьків для схрещування здійснюється не випадково. Пріоритет надається найкращим розв'язанням. Чим більша фітнес-функція, тим більшою є ймовірність відбору хромосоми для схрещення [25]. Протягом виконання генетичного алгоритму розмір популяції залишається постійним. Тому після схрещувань та мутацій з отриманої популяції необхідно видалити хромосоми, що мають найгірше значення фітнес-функції.

Результати налаштування НКК

Для налаштування початкового варіанта НКК (рис. 1) використовувалися дані «фактори, що впливають – ядерна загроза» з табл. 7. Ці дані формувалися експертно із застосуванням лінгвістичних оцінок з табл. 4 та 5, а потім трансформувалися у числові значення. Внаслідок розв'язання задачі оптимізації (12) отримано ваги дуг графа НКК, які представлені в табл. 8. Порівняння експертних значень рівня ядерної загрози (x_7) і результатів моделювання ($\widehat{x}_7$) до і після налаштування НКК для 7 сценаріїв показано в табл. 9. Середнє абсолютне відхилення (MAD) та середня квадратична помилка (MSE) становлять:

$$MAD = \frac{1}{7} \sum_{p=1}^7 |x_{7,p} - \widehat{x}_{7,p}| = \begin{cases} 3.99, & \text{до налаштування;} \\ 1.45, & \text{після налаштування;} \end{cases}$$

$$MSE = \frac{1}{7} \sum_{p=1}^7 (x_{7,p} - \widehat{x}_{7,p})^2 = \begin{cases} 20.90, & \text{до налаштування;} \\ 5.83, & \text{після налаштування.} \end{cases}$$

Таблиця 7. Дані для налаштування НКК

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
1	1	1	1	1	50	50	-25
2	5	5	5	5	40	40	-20
3	10	10	10	10	10	30	-10
4	20	20	20	20	20	20	0
5	30	30	30	30	10	10	10
6	40	40	40	40	5	5	20
7	50	50	50	50	1	1	25

Таблиця 8. Ваги дуг до та після налаштування

Вага	До налаштування	Після налаштування
w_{13}	0.4	0.2
w_{14}	0.5	0.65
w_{21}	0.6	0.4
w_{35}	0.45	0.25
w_{37}	0.75	0.55
w_{43}	0.45	0.25
w_{45}	0.5	0.3
w_{57}	-0.5	-0.35
w_{65}	0.55	0.75
w_{72}	-0.5	-0.7
w_{74}	-0.25	-0.15
w_{76}	0.75	0.65

Таблиця 9. Експертні оцінки та результати моделювання

№	x_7	До налаштування		Після налаштування	
		$\widehat{x}_7$	$ x_7 - \widehat{x}_7 $	$\widehat{x}_7$	$ x_7 - \widehat{x}_7 $
1	-25	-30.00	5.00	-25.01	0.01
2	-20	-21.22	1.22	-17.86	2.14
3	-10	-3.87	6.13	-4.38	5.62
4	0	0.97	0.97	0.00	0
5	10	13.72	3.72	10.20	0.2
6	20	23.40	3.40	17.86	2.14
7	25	32.47	7.47	25.00	0

Отже, застосування НКК з налаштованими вагами дуг дає змогу значно покращити показники MAD і MSE для розв'язання задачі оптимізації (12). Під час налаштування НКК використовувався генетичний алгоритм, який докладно описаний у [20, 21]. Динаміка зміни критерію оптимізації (12) зі збільшенням числа ітерацій (M) показана на рис. 3.

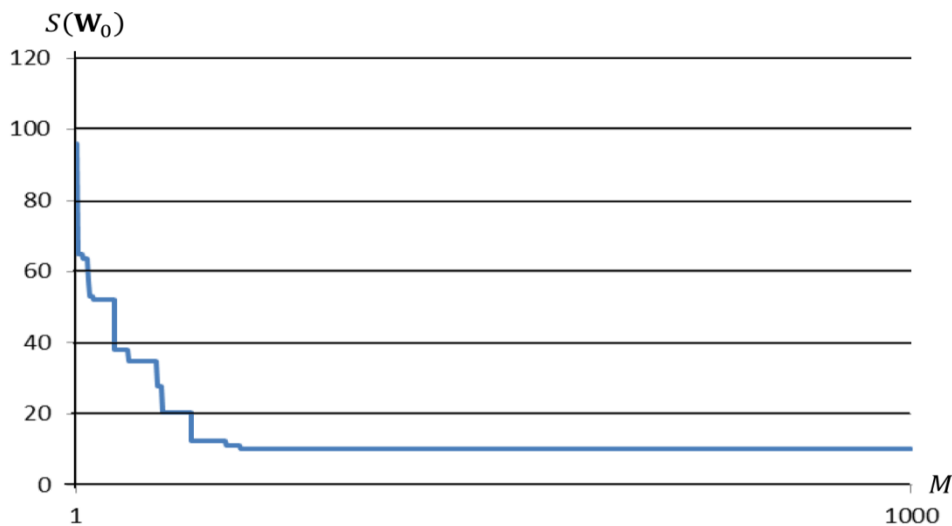


Рисунок 3. Динаміка зміни критерію оптимізації

Ранжування факторів, які впливають ядерну загрозу

Індекси важливості концептів $C_1, C_2, \dots, C_6$ за рівнем їх впливу на концепт C_7 збігаються зі значеннями x_7 , які обчислюються за допомогою алгоритму розділу 1.5 за таких початкових векторів (10):

$$X^{(0)} = [50, 0, 0, 0, 0, 0, 0] \text{ — для впливу концепту } C_1,$$

$$X^{(0)} = [0, 50, 0, 0, 0, 0, 0] \text{ — для впливу концепту } C_2,$$

...

$$X^{(0)} = [0, 0, 0, 0, 0, 50, 0] \text{ — для впливу концепту } C_6.$$

Для кожного з цих векторів на рис. 4 показано покрокову зміну значень концепту C_7 до входження до стаціонарного режиму. Отримані значення $\widehat{x}_7$ подано на рис. 5 у вигляді діаграми, яка показує відносну важливість факторів, $(C_1, C_2, \dots, C_6)$, що впливають на рівень ядерної загрози (C_7). З рис. 5 видно, що найбільше підвищення ядерної загрози пов'язане зі втратами російської армії (C_3), а найбільше зниження цієї загрози викликають опозиція російської влади (C_5) та інстинкт її самозбереження (C_6).

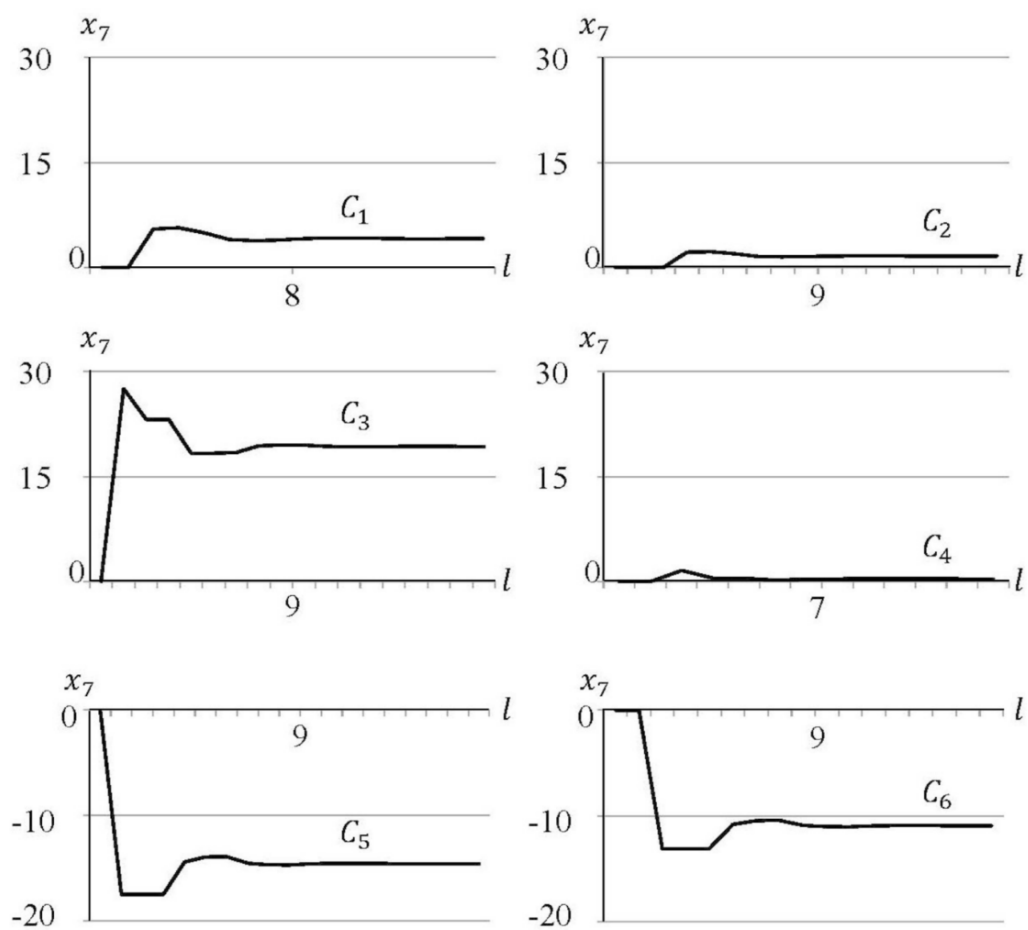


Рисунок 4. Покрокова зміна величини концепту C_7 під час обчислення індексів важливості концептів $C_1, C_2, \dots, C_6$

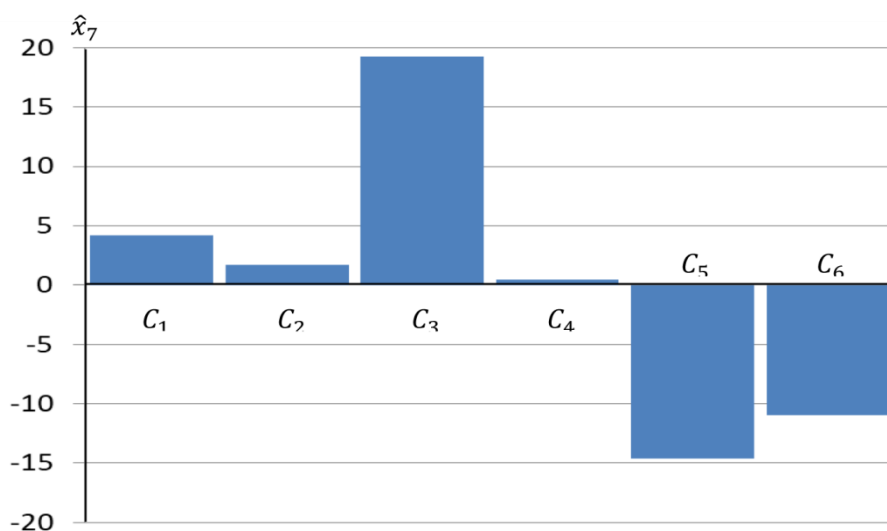


Рисунок 5. Діаграма парних впливів на концепт C_7

Для оцінки парних впливів факторів на концепт C_7 використовувалися такі початкові вектори:

$X^{(0)} = [50, 50, 0, 0, 0, 0, 0]$ – для сумісного впливу концептів C_1 і C_2 ,

$X^{(0)} = [50, 0, 50, 0, 0, 0, 0]$ – для сумісного впливу концептів C_1 і C_3 ,

...

$X^{(0)} = [0, 0, 0, 0, 50, 50, 0]$ – для сумісного впливу концептів C_5 і C_6 .

Діаграма найбільш важливих парних впливів представлена на рис. 6. Із нього видно, що найбільше підвищення ядерної загрози пов'язане зі спільним впливом українського опору (C_1) та російських втрат (C_3), а найбільше зниження цієї загрози викликають російська опозиція (C_5) та інстинкт самозбереження російської влади (C_6).

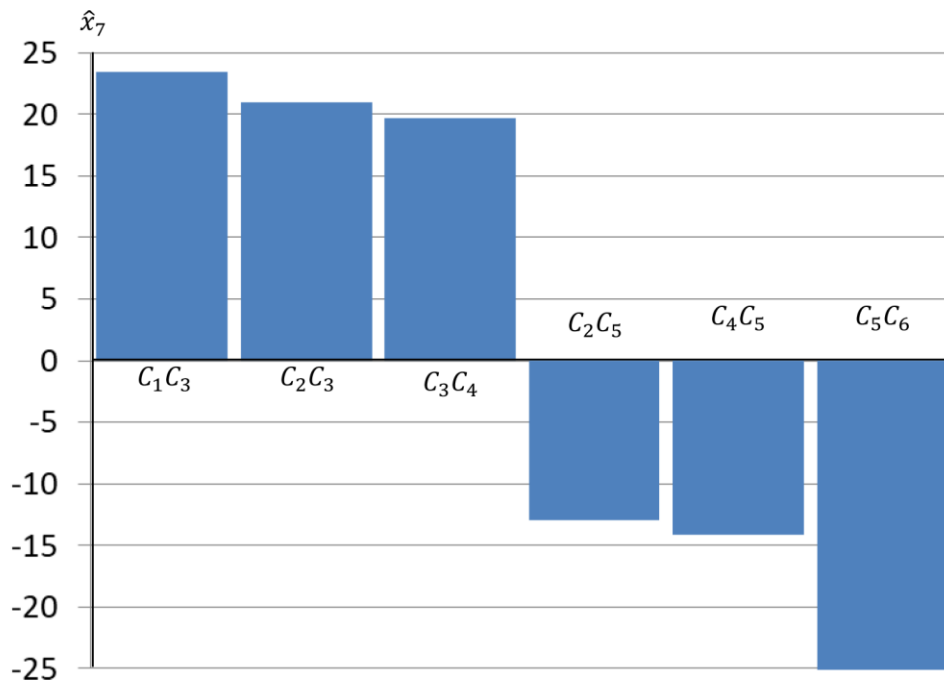


Рисунок 6. Діаграма парних впливів на концепт C_7

Ранжування факторів, які впливають втрати російської армії

Оскільки основним фактором, що впливає на рівень ядерної загрози, є втрати російської армії (C_3), нас цікавить ранжування факторів, що впливають на концепт C_3 . Індекси важливості концептів $C_1, C_2, C_4, \dots, C_7$ за ступенем їх впливу на концепт C_3 збігаються зі стаціонарними значеннями $\hat{x}_3$, які обчислюються за таких початкових векторів:

$X^{(0)} = [50, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$ – для впливу концепту C_1 ,

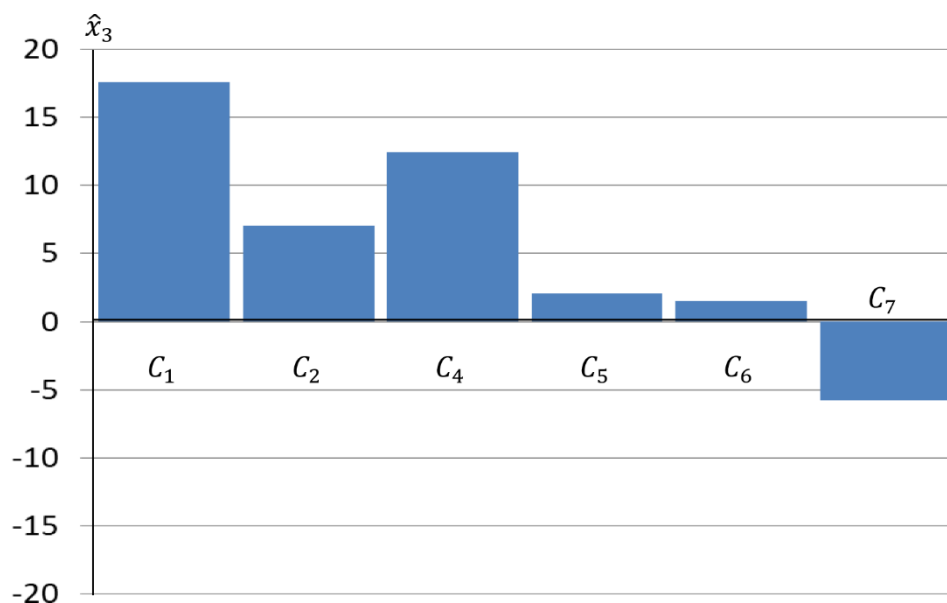
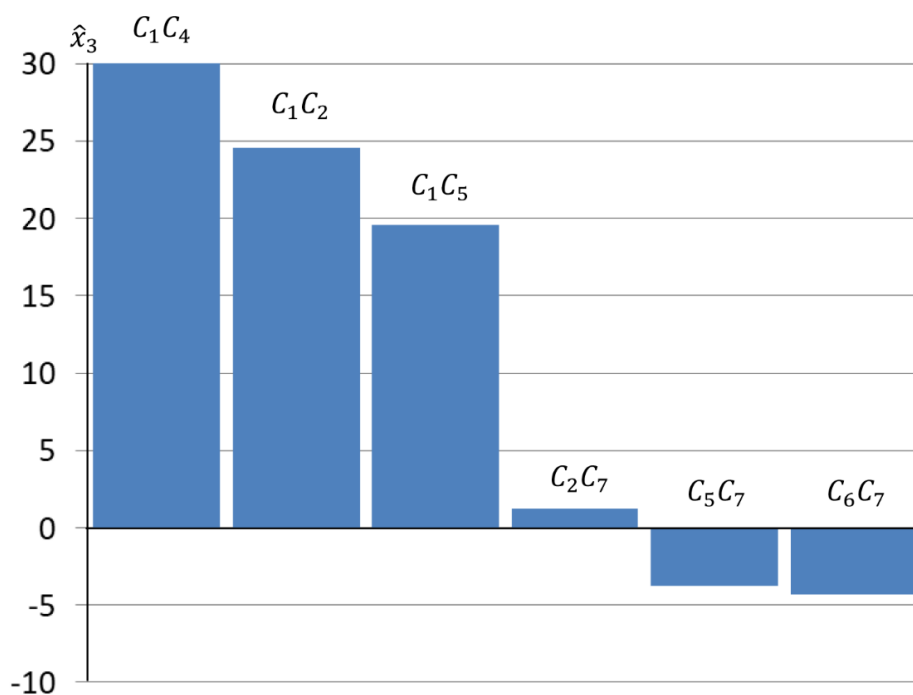
$X^{(0)} = [0, 50, 0, 0, 0, 0, 0]$ – для впливу концепту C_2 ,

$X^{(0)} = [0, 0, 0, 50, 0, 0, 0]$ – для впливу концепту C_4 ,

...

$X^{(0)} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 50]$ – для впливу концепту C_7 .

Отримані значення x_3 подано на рис. 7 у вигляді діаграми важливості впливу факторів $C_1, C_2, C_4, \dots, C_7$ на втрати російської армії (C_3). З рис. 7 видно, що найбільше підвищення російських втрат пов'язане з українським опором (C_1) та економічними санкціями (C_4), а найбільше зниження втрат викликає ядерну загрозу (C_7). Аналогічно отримано діаграму парних впливів факторів на концепт (C_3), яка показана на рис. 8.

Рисунок 7. Діаграма парних впливів на концепт C_3 Рисунок 8. Діаграма парних впливів на концепт C_3

Висновки

Російсько-українська війна є актуальним об'єктом моделювання засобами дослідження операцій та системного аналізу. Найважливішим аспектом моделювання є прогнозування загрози застосування ядерної зброї, яка обумовлена можливостями однієї зі сторін війни.

У цій роботі показано, що НКК є аналогом диференціальних рівнянь, які традиційно використовуються для моделювання динаміки втрат у воєнних конфліктах. Перевага НКК, порівняно з диференціальними рівняннями, полягає у можливості використання експертної інформації для безпосереднього врахування військово-технічних, економічних, політичних

та інших взаємопов'язаних факторів, що впливають на динаміку втрат та рівень ядерної загрози.

Нами запропоновано модель російсько-української війни у вигляді НКК з урахуванням факторів, пов'язаних з учасниками війни і країнами, що підтримують Україну. Для налаштування НКК використано експертну навчальну вибірку з семи сценаріїв, що відображають різні рівні підвищення-зниження ядерної загрози. За результатами моделювання за запропонованою НКК отримано індекси важливості факторів за рівнем їх впливу на підвищення-зниження рівня ядерної небезпеки та втрат російської армії.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розширення запропонованої НКК на основі детальної класифікації факторів, що впливають на розвиток російсько-української війни. НКК відображає типові елементи, властивості та відношення усіх учасників конфлікту – її можна розглядати як деяку схему, що є аналогом традиційних інженерних схем: структурних, функціональних, електричних принципових тощо. Отже, з'являється можливість перенесення добре розроблених інженерних методик у порівняно нову для застосування математики область формалізованого опису та моделювання військово-політичних об'єктів.

Література

1. Зайченко, А. П. (2001). *Дослідження операцій: підручник*. Київ, ВІПОЛ, 688 с.
2. Novikov, D. A. (2013). Hierarchical models of warfare. *Autom Remote Control*, 74(10), 1733–1752. DOI: 10.1134/S0005117913100135.
3. Shumov, V. V. (2020). Mathematical models of combat and military operations. *Computer Research and Modeling*, 12(4): 907–920. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-4-907-920.
4. McLucas, A. C., & Elsayah, S. (2019). System dynamics modeling to inform defense strategic decision-making. In *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 1–33). Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-27737-5_657-1.
5. Lanchester, F. W. (1916). *Aircraft in warfare: The dawn of the fourth arm*. Constable limited, 243 p.
6. Barlow, R. E., Proschan, F. (1975). *Statistical theory of reliability and life testing: probability models*. Florida State Univ Tallahassee, 327 p. DOI: 10.2307/1402970.
7. Barnard, A. (2012). Ten things you should know about HALT & HASS. In *Proceedings – Annual Reliability and Maintainability Symposium*. DOI: 10.1109/rams.2012.6175457.
8. Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24(1), 65–75. DOI: 10.1016/s0020-7373(86)80040-2.
9. Wierman, M. J., Dobransky, M. K. (1992). A review of: “Neural networks and fuzzy systems:” A dynamic systems approach to machine intelligence. B. Kosko, P. Hall, E. Cliffs (eds.). New Jersey, 1991. XXVII + 449 pages. *International Journal of General Systems*, 20(4), 398–402. DOI: 10.1080/03081079208945045.
10. Stylios, C. D., & Groumpos, P. P. (2004). Modeling complex systems using fuzzy cognitive maps. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 34(1), 155–162. DOI: 10.1109/tsmca.2003.818878.

11. Fuzzy cognitive maps for applied sciences and engineering (2014). *Intelligent Systems Reference Library*. E. I. Papageorgiou (ed.). Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-39739-4.
12. Mazzuto, G., Ciarapica, F. E., Stylios, C., & Georgopoulos, V. C. (2018). Fuzzy cognitive maps designing through large dataset and experts' knowledge balancing. *2018 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. DOI: 10.1109/fuzz-ieee.2018.8491657.
13. Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. *Information Sciences*, 8(3), 199–249. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
14. Nevison, C. H., & Roberts, F. S. (1977). Discrete mathematical models with applications to social, biological, and environmental problems. *The American Mathematical Monthly*, 84(10), 834. DOI: 10.2307/2322080.
15. Вольтерра, В. (1976). *Математическая теория борьбы за существование*. Москва, Наука, 288 с.
16. Dickerson, J. A., & Kosko, B. (1994). Virtual worlds as fuzzy cognitive maps. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2), 173–189.
17. De Larminat, P. (Ed.). (2010). *Analysis and Control of Linear Systems*. Wiley-ISTE. DOI: 10.1002/9780470612521.
18. Rothstein, A. P. (2019). Risk analysis: fuzzy cognitive maps vs fault trees. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 58(2), 200–211. DOI: 10.1134/s1064230719020163.
19. Rotshtein, A., Katielnikov, D., & Kashkanov, A. (2019). A fuzzy cognitive approach to ranking of factors affecting the reliability of man–machine systems. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55(6), 958–966. DOI: 10.1007/s10559-019-00206-8.
20. Rotshtein, A. P., & Katielnikov, D. I. (2021). Fuzzy cognitive map vs regression. *Cybernetics and Systems Analysis*, 57(4), 605–616. DOI: 10.1007/s10559-021-00385-3.
21. Rotshtein, A., Katielnikov, D., Pustyl'nik, L., & Polin, B. A. (2022). Reliability analysis of man-machine systems using fuzzy cognitive mapping with genetic tuning. *Risk Analysis*, 43(5), 958–978. Portico. DOI: 10.1111/risa.13959.
22. Axelrod, R. (Ed.). (2015). *Structure of decision: the cognitive maps of political elites*. Princeton University Press, 405 p. DOI: 10.1515/9781400871957.
23. Глушков, В. М. (1974). *Введение в АСУ*. Киев, Техника, 320 с.
24. Бутенин, Н. В., Неймарк, Ю. И., & Фуфаев, Н. Л. (1982). *Введение в теорию нелинейных колебаний*. Москва, Наука, 384 с.
25. Gen, M., & Cheng, R. (1996). *Genetic algorithms and engineering design*. John Wiley & Sons, 411 p. DOI: 10.1002/9780470172254.

Рукопис отримано – 31/05/2023; прийнято до публікації – 26/06/2023.

- © Донецький національний університет імені Василя Стуса, 2023
- © Олександр Ротштейн, 2023
- © Тетяна Нескородева, 2023
- © Деніс Кательніков, 2023

Application of a fuzzy cognitive map for the simulation of the Russia-Ukraine war

Olexander Rotshtein, Tetiana Neskorodieva, Denis Katielnikov

Abstract

The Russia-Ukraine war is an actual object of modelling by techniques of operations research and system analysis. The most important aspect is modelling the threat of nuclear weapon attack, which is related to the potential ability of the Russian Federation. The Russia-Ukraine war is considered as a dynamic system, whose variables are factors affecting the losses of the Russian army and the threat of nuclear weapons attack. A fuzzy cognitive map is used for modelling. A fuzzy cognitive map is a directed graph, the vertices of which are variables of the model, and the weights of the arcs are the forces of positive and negative effects of variables on each other. The factors affecting the losses of the Russian army and the threat of a nuclear strike are selected as follows: resistance of the Ukrainian army, support of Ukraine with weapons, economic sanctions against Russia, opposition of the Russian government and its instinct for self-preservation. The forces of influence of factors on each other and on the possibility of using nuclear weapons are evaluated by experts with the help of fuzzy terms to which numerical quantities correspond. A genetic algorithm is used for tuning the fuzzy cognitive map. The genetic algorithm finds out the forces of influence of factors that minimize the distance between the simulation results and expert assessments. The obtained fuzzy cognitive map is used for scenario modelling of the Russia-Ukraine war according to the what-if analysis and for ranking the factors according to the degree of their influence on the level of nuclear threat. This work shows that fuzzy cognitive maps are an analogue of differential equations, which are traditionally used to model the loss dynamics in military conflicts. The fuzzy cognitive map advantage lies in the possibility of using expert information to account for interrelated factors affecting the loss dynamics and the nuclear threat level. A promising direction for further research is the extension of the proposed model for proceeding with the detailed classification of factors influencing the progress of the Russia-Ukraine war.

Keywords: Russia-Ukraine war, fuzzy cognitive map, scenario modelling, nuclear threat, ranking of influencing factors, pair effects.

References

1. Zaichenko, A. P. (2001). *Doslidzhennia operatsii*. Kyiv: VIPOL, 688 p. [In Ukrainian].
2. Novikov, D. A. (2013). Hierarchical models of warfare. *Autom Remote Control*, 74(10), 1733–1752. DOI: 10.1134/S0005117913100135.
3. Shumov, V. V. (2020). Mathematical models of combat and military operations. *Computer Research and Modeling*, 12(4): 907–920. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-4-907-920.
4. McLucas, A. C., & Elsayah, S. (2019). System dynamics modeling to inform defense strategic decision-making. In *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 1–33). Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-27737-5_657-1.
5. Lanchester, F. W. (1916). *Aircraft in warfare: The dawn of the fourth arm*. Constable limited, 243 p.
6. Barlow, R. E., Proschan, F. (1975). *Statistical theory of reliability and life testing: probability models*. Florida State Univ Tallahassee, 327 p. DOI: 10.2307/1402970.
7. Barnard, A. (2012). Ten things you should know about HALT & HASS. In *Proceedings – Annual Reliability and Maintainability Symposium*. DOI: 10.1109/rams.2012.6175457.
8. Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24(1), 65–75. DOI: 10.1016/s0020-7373(86)80040-2.
9. Wierman, M. J., Dobransky, M. K. (1992). A review of: “Neural networks and fuzzy systems:” A dynamic systems approach to machine intelligence. B. Kosko, P. Hall, E. Cliffs (eds.). New Jersey, 1991. XXVII + 449 pages. *International Journal of General Systems*, 20(4), 398–402. DOI: 10.1080/03081079208945045.
10. Stylios, C. D., & Groumpos, P. P. (2004). Modeling complex systems using fuzzy cognitive maps. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 34(1), 155–162. DOI: 10.1109/tsmca.2003.818878.
11. Fuzzy cognitive maps for applied sciences and engineering (2014). *Intelligent Systems Reference Library*. E. I. Papageorgiou (ed.). Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-39739-4.

12. Mazzuto, G., Ciarapica, F. E., Stylios, C., & Georgopoulos, V. C. (2018). Fuzzy cognitive maps designing through large dataset and experts' knowledge balancing. *2018 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. DOI: 10.1109/fuzz-ieee.2018.8491657.
13. Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. *Information Sciences*, 8(3), 199–249. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
14. Nevison, C. H., & Roberts, F. S. (1977). Discrete mathematical models with applications to social, biological, and environmental problems. *The American Mathematical Monthly*, 84(10), 834. DOI: 10.2307/2322080.
15. Volterra, V. (1976). *Matematicheskaya teoriya borbyi za suschestvovanie*. Moscow, Nauka, 288 p. [In Russian].
16. Dickerson, J. A., & Kosko, B. (1994). Virtual worlds as fuzzy cognitive maps. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2), 173–189.
17. De Larminat, P. (Ed.). (2010). *Analysis and control of linear systems*. Wiley-ISTE. DOI: 10.1002/9780470612521.
18. Rothstein, A. P. (2019). Risk analysis: fuzzy cognitive maps vs fault trees. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 58(2), 200–211. DOI: 10.1134/s1064230719020163
19. Rotshtein, A., Katielnikov, D., & Kashkanov, A. (2019). A fuzzy cognitive approach to ranking of factors affecting the reliability of man–machine systems. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55(6), 958–966. DOI: 10.1007/s10559-019-00206-8.
20. Rotshtein, A. P., & Katielnikov, D. I. (2021). Fuzzy cognitive map vs regression. *Cybernetics and Systems Analysis*, 57(4), 605–616. DOI: 10.1007/s10559-021-00385-3.
21. Rotshtein, A., Katielnikov, D., Pustynnik, L., & Polin, B. A. (2022). Reliability analysis of man-machine systems using fuzzy cognitive mapping with genetic tuning. *Risk Analysis*, 43(5), 958–978. Portico. DOI: 10.1111/risa.13959.
22. Axelrod, R. (Ed.). (2015). *Structure of decision: the cognitive maps of political elites*. Princeton University Press, 405 p. DOI: 10.1515/9781400871957.
23. Glushkov, V. M. (1974). *Vvedenie v ASU*. Kyiv, Tehnika, 320 p. [In Russian].
24. Butenin, N. V., Neymark, Yu. I., & Fufaev, N. L. (1982). *Vvedenie v teoriyu nelineynykh kolebaniy*. Moscow, Nauka, 384 p. [In Russian].
25. Gen, M., & Cheng, R. (1996). *Genetic algorithms and engineering design*. John Wiley & Sons, 411 p. DOI: 10.1002/9780470172254.

УДК 631.3.05

Алгоритм виявлення входження тварини на групову доїльну установку

Павло Кулаков

професор, д-р техн. наук
ORCID: 0000-0002-0167-2218
kulakovpi@gmail.com

Уманський національний університет садівництва
Донецький національний університет імені Василя Стуса

Володимир Кучерук

професор, д-р техн. наук
ORCID: 0000-0002-6422-7779
vladimirkucheruk@gmail.com

Уманський національний університет садівництва
Донецький національний університет імені Василя Стуса

Роман Ліщук

доцент, канд. техн. наук
ORCID: 0000-0002-2051-5365
roma0lir@gmail.com

Уманський національний університет садівництва

Вікторія Маньковська

доцент, канд. техн. наук
ORCID: 0000-0003-0552-5482
viktoryasergiivna@gmail.com

Уманський національний університет садівництва

Анна Кулакова

ORCID: 0000-0002-2970-7566
anna.kulakova1735@gmail.com

Донецький національний університет імені Василя Стуса

Ключові слова:

алгоритм,
інформаційна система,
тваринницька ферма,
оптимальна фільтрація,
ідентифікація,
входження тварини.

Із попередніх досліджень відомо, що у випадку помилок радіочастотної ідентифікації тварин під час заходу на групову доїльну установку є високий ризик втрати інформації про показники технологічного процесу доїння, яка стосується усіх тварин групи. Це зумовлено тим, що номер доїльного станка групової доїльної установки суворо відповідає номеру тварини у черзі на установку. У разі виникнення помилки радіочастотної ідентифікації втрачається інформація про факт входження тварини, внаслідок цього сервер інформаційної системи отримує некоректну інформацію про відповідність номерів тварин у стаді номерам доїльних станків групової доїльної установки. Це призводить до того, що результати вимірювання зоотехнічних параметрів тварин та параметрів технологічного процесу доїння помилково співвідносять зі стадними номерами інших тварин. Для запобігання таких інформаційних втрат на групових доїльних установках використовують засоби підрахунку тварин у потоці. Тому важливим фактором забезпечення достовірності інформації про параметри технологічного процесу виробництва молока на групових доїльних установках є точний підрахунок тварин під час їх руху до доїльних станків. Сучасні засоби підрахунку тварин

засновані на перериванні потоку інфрачервоного випромінювання тваринами під час руху і не завжди забезпечують їх точний підрахунок. Для виявлення помилок радіочастотної ідентифікації рухомих тварин на групових доїльних установках запропоновано алгоритм на основі оптимальної лінійної фільтрації вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта та засіб виявлення входження тварин з метою їх підрахунку у потоці. Пропонований алгоритм виявляє більше помилок радіочастотної ідентифікації, відповідно підвищується достовірність інформації про параметри технологічного процесу виробництва коров'ячого молока на групових доїльних установках.

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.2

Вступ

У системах радіочастотної ідентифікації обмін даними між зчитувачем та транспондером здійснюється за допомогою радіозв'язку. У пам'яті транспондера зберігається унікальний код, який він передає за допомогою вбудованого радіопередавача коли потрапляє у робочу зону зчитувача [1]. Системи радіочастотної ідентифікації тварин, широко використовуються у агропромисловому комплексі [2], зокрема на сучасних молочних фермах у складі інформаційних систем, які призначені для визначення активності тварин [3], їх локалізації [4], обліку, аналізу й контролю параметрів тварин та параметрів технологічного процесу виробництва молока [5, 6].

У роботі [7] проаналізовано вплив помилок радіочастотної ідентифікації тварин під час їх руху на результати отримання інформації про параметри технологічного процесу виробництва молока, та встановлено, що внаслідок виникнення помилок ідентифікації часто втрачається інформація, яка стосується усіх тварин групи на групових доїльних установках. Під час використання зчитувачів великої відстані на групових доїльних установках не відбувається ідентифікація в середньому 3% рухомих тварин. За відсутності засобів виявлення входження тварини ймовірність того, що внаслідок помилок ідентифікації буде втрачена інформація про параметри доїння для типової групової доїльної установки «Ялинка-2×8», дорівнює 0.26 [7].

Для зменшення впливу помилок радіочастотної ідентифікації тварин під час руху на результати роботи інформаційних систем тваринницьких ферм використовують спеціалізовані засоби виявлення проходження усіх тварин на групову доїльну установку, зокрема і тих тварин, чия ідентифікація не відбулась [7, 8]. Такі засоби реалізуються на основі ультразвукових або оптичних сенсорів наявності об'єкта [9], принцип дії яких заснований на перериванні потоку випромінювання. Під час проходження тварини через робочу зону зчитувач системи радіочастотної ідентифікації отримує код її транспондера, після цього тварина проходить через робочу зону сенсора наявності об'єкта. Такий сенсор складається з випромінювача та приймача ультразвуку або оптичного випромінювання. У разі потрапляння тварини в робочу зону сенсора відбувається переривання потоку випромінювання, внаслідок чого на виході приймача формується імпульс певної тривалості, наявність якого і є ознакою проходження тварини [10].

Важливим фактором отримання достовірної інформації про параметри технологічного процесу виробництва молока на групових доїльних установках є точний підрахунок тварин під час їх руху до доїльних станків. Тому підвищення ефективності алгоритмів входження тварин на групову доїльну установку є актуальним завданням.

Постановка завдання

На рис. 1 наведено схему, яка пояснює вплив помилки радіочастотної ідентифікації рухомих тварин на отримання інформації про параметри технологічного процесу виробництва молока під час використання групових доїльних установок [7]. Після входження тварин за відсутності помилки ідентифікації тварина з номером $n=1$ у черзі, яка має транспондер з кодом N_{1T} , буде знаходитись у доїльному станку 1, тварина з номером $n=2$, яка має транспондер з кодом N_{2T} , буде знаходитись у доїльному станку 2 тощо. У цьому випадку не буде втрат інформації про параметри технологічного процесу виробництва молока.

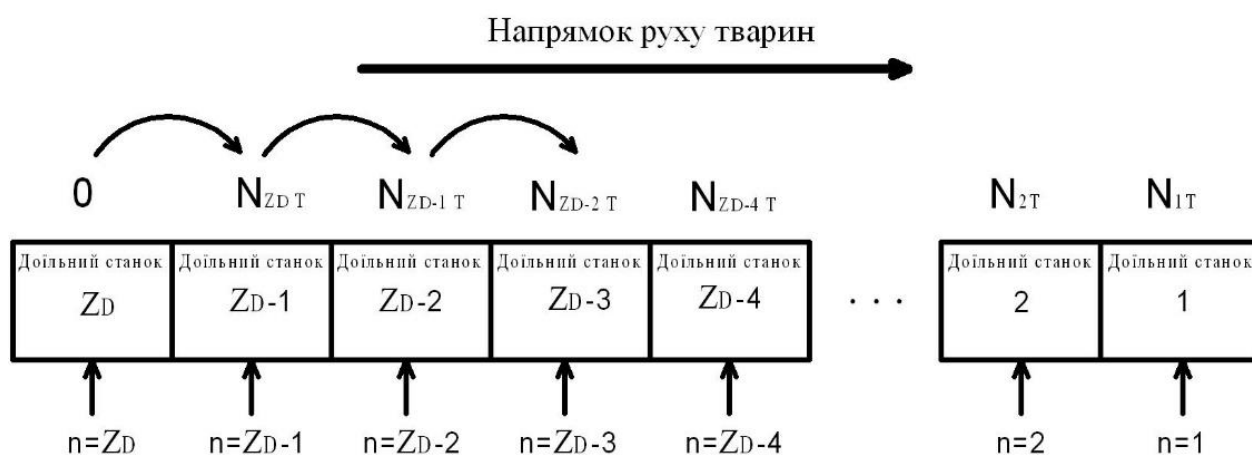


Рисунок 1. Вплив помилки радіочастотної ідентифікації на результати вимірювання та контролю зоотехнічних параметрів тварин на групових доїльних установках

Якщо під час проходження тварини з номером $n = Z_D - 3$ через робочу зону зчитувача транспондер не буде ідентифікований, тоді сервер інформаційної системи не зможе встановити присутність цієї тварини у доїльному станку $Z_D - 3$. Внаслідок цього наступна тварина у черзі з номером $n = Z_D - 2$ та з кодом транспондера $N_{Z_D-2 T}$ буде визначена як така, що знаходиться у доїльному станку $Z_D - 3$. Відповідно кожна наступна тварина з номером у черзі, більшим за $n = Z_D - 2$, буде визначена як така, що знаходиться у доїльному станку $n-1$, хоча насправді вона знаходиться у доїльному станку n . Остання тварина групи з номером $n = Z_D$ в черзі буде знаходитись у доїльному станку Z_D , але значення коду її транспондера та стадний номер не будуть визначені сервером. У цьому випадку неможливо алгоритмічно визначити номер доїльного станка, у якому знаходиться не ідентифікована тварина. Навіть за однієї помилки ідентифікації у групі спотворюється інформація про кілька

параметрів технологічного процесу отримання молока. Алгоритмічно виявити, помилка ідентифікації якої саме тварини зумовила втрату даних усієї групи, неможливо.

Отже, за відсутності засобів підрахунку тварин на групових доїльних установках є великий ризик втрати інформації про параметри технологічного процесу виробництва молока внаслідок помилок ідентифікації. За наявності таких засобів втрати інформації мінімізуються, тому подальший розвиток цих засобів та алгоритмів їх роботи є важливим та актуальним завданням. Завданням дослідження є удосконалення алгоритму виявлення входження тварини на групову доїльну установку шляхом використання оптимальної лінійної фільтрації вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта.

Результати досліджень

На рис. 2 наведено схему руху потоку тварин вздовж антени зчитувача системи радіочастотної ідентифікації та сенсора наявності об'єкта. Кожному коду транспондера, який отриманий за допомогою зчитувача, відповідає імпульсний вихідний сигнал сенсора наявності об'єкта. Якщо радіочастотна ідентифікація однієї або декількох тварин з певних причин не відбулася, факт їх проходження все одно встановлюється. Отже, за засобом виявлення проходження тварини фіксується неідентифікована тварина та визначається її номер у потоці на основі відповідних підрахунків. На групових доїльних установках це дає можливість запобігти втраті інформації про всю групу тварин.

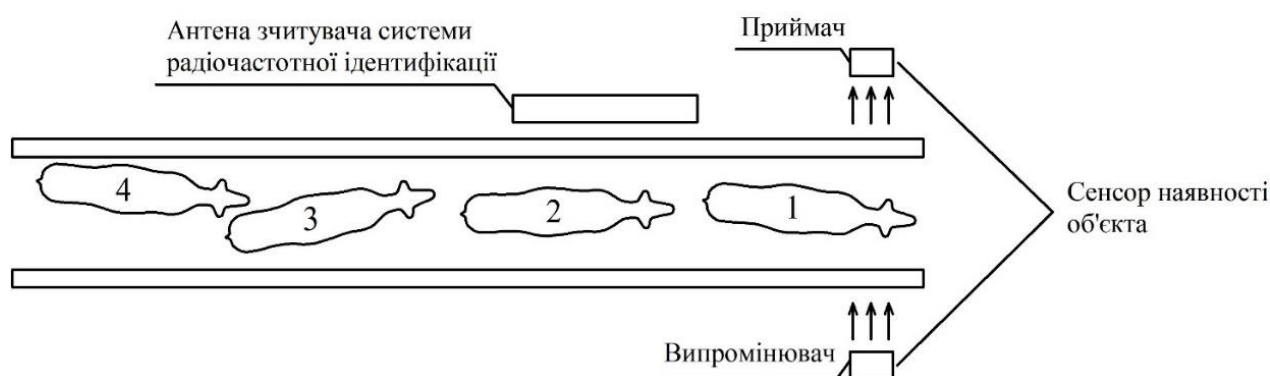


Рисунок 2. Рух потоку тварин вздовж антени зчитувача системи радіочастотної ідентифікації та сенсора наявності об'єкта

Рух тварин у потоці має випадковий характер, що зумовлено особливостями поведінки тварин. Вони можуть зупинятися, штовхатися, рухатись у зворотному напрямку, здійснювати хаотичні рухи, рухатись поперек потоку, присідати, піднімати або опускати голову. Типова часова діаграма вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта під час руху тварин у потоці наведена на рис. 3.

У роботах [11, 12] на основі експериментальних досліджень встановлено, що швидкість руху тварин у потоці становить 0,4–0,6 м/с, а середня довжина тварини складає 2,6 м. Під час проходження однієї тварини через робочу зону сенсора наявності об'єкта він формує сигнал, тривалість якого визначається виразом:

$$T_C = \frac{l_C}{v_C},$$

де l_C – довжина тварини;

v_C – швидкість руху тварини.

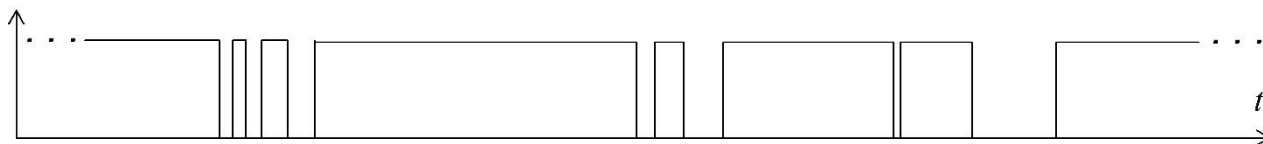


Рисунок 3. Типова часова діаграма вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта під час руху тварин у потоці

Внаслідок того, що характер руху окремих тварин у потоці залежить від великої кількості випадкових факторів, які слабо корельовані, і серед них немає домінантних факторів, на підставі першої граничної теореми можна припустити, що тривалість імпульсного вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта є випадковою величиною, яка розподілена за нормальним законом з математичним очікуванням T_{CM} та середньоквадратичним відхиленням σ_{CM} . Відповідно мінімальну $T_{C\ MIN}$ та максимальну $T_{C\ MAX}$ межі тривалості проходження однією твариною робочої зони доцільно встановити за правилом трьох сигм.

Взаємне розташування тварин під час їх руху у потоці впливає на достовірність ідентифікації їх проходження. У засобах [13, 14] для виявлення проходження тварини використовують такі критерії. Якщо рух тварин у потоці відбувається рівномірно, з проміжками між тваринами (див. тварин 1 та 2 на рис. 2), то кожній тварині відповідає окремий імпульсний вихідний сигнал сенсора наявності об'єкта. У цьому випадку ознакою проходження тварини є виконання умови:

$$T_C \in [T_{C\ MIN}; T_{C\ MAX}].$$

Якщо тварини у потоці рухаються одна за одною без проміжку, або вони суміщені, як тварини 3 та 4 на рис. 2, тоді ознакою проходження n_C тварин повз робочу зону сенсора наявності об'єкта є виконання співвідношення:

$$T_C \in [k_C n_C T_{C\ MIN}; k_C n_C T_{C\ MAX}],$$

де k_C – коефіцієнт, за допомогою якого враховується можливе суміщення тварин під час їх руху в потоці та різне значення швидкості руху окремих тварин.

Внаслідок того, що коефіцієнт k_C не є сталим, а має випадковий характер, можливе виникнення помилки виявлення проходження тварини у разі суміщення тварин під час руху або у разі руху однієї тварини упритул до іншої. З огляду на випадковий характер руху

тварин у потоці вихідний сигнал сенсора наявності об'єкта можна розглядати як суміш двох сигналів – корисного імпульсного сигналу $s_M(t)$ та випадкового некорельованого імпульсного сигналу $s_N(t)$. Шляхом виявлення сигналу $s_M(t)$ ідентифікується проходження тварини. Некорельована послідовність $s_N(t)$ має рівномірний енергетичний спектр, що дає підстави розглядати її як білий шум.

Для підвищення достовірності виявлення проходження тварини під час її руху в потоці пропонується використати оптимальну лінійну фільтрацію. Розглянемо принцип роботи оптимального лінійного фільтра, який максимізує відношення сигнал-шум між піковим значенням корисного сигналу та середньоквадратичним значенням шумового сигналу.

Як відомо, комплексний енергетичний спектр сигналу $s_M(t)$ визначається виразом:

$$S_M(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_M(t) e^{-j\omega t} dt,$$

де ω – циклічна частота спектральних складових;

j – уявна одиниця.

Шумовий сигнал $s_N(t)$ має характер білого шуму з рівномірним енергетичним спектром:

$$W_N(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_N(t) e^{-j\omega t} dt = W_0.$$

Пікове значення сигналу на виході оптимального фільтра у момент часу t_0 визначається узагальненим виразом:

$$s_P(t_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_M(\omega) K_{OPT}(\omega) e^{j(\omega t_0 + \varphi_M(\omega) + \varphi_K(\omega))} d\omega,$$

де $S_M(\omega)$ – модуль комплексного енергетичного спектру корисного сигналу;

$K_{OPT}(\omega)$ – модуль комплексної передатної характеристики фільтра;

$\varphi_M(\omega)$ – фазова характеристика спектру корисного сигналу;

$\varphi_K(\omega)$ – фазо-частотна характеристика оптимального фільтра.

Середньоквадратичне значення шумового сигналу на виході оптимального фільтра визначається виразом:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{W_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K_{OPT}^2(\omega) d\omega}.$$

Відповідно відношення сигнал-шум між піковим значенням корисного сигналу та середньоквадратичним значенням шумового сигналу дорівнює

$$R_{SN} = \frac{|s_P(t_0)|}{\sigma_N} = \frac{\left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_M(\omega) K_{OPT}(\omega) e^{j(\omega t_0 + \varphi_M(\omega) + \varphi_K(\omega))} d\omega \right|}{\sqrt{\frac{W_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K_{OPT}^2(\omega) d\omega}}. \quad (1)$$

Відповідно до нерівності Коші–Буняковського:

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} S_M(\omega) K_{OPT}(\omega) e^{j(\omega t_0 + \varphi_M(\omega) + \varphi_K(\omega))} d\omega \right|^2 \leq \int_{-\infty}^{+\infty} S_M^2(\omega) d\omega \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} K_{OPT}^2(\omega) d\omega.$$

З урахуванням цієї нерівності вираз (1) можна представити у такому вигляді:

$$R_{SN} = \frac{\left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_M(\omega) K_{OPT}(\omega) e^{j(\omega t_0 + \varphi_M(\omega) + \varphi_K(\omega))} d\omega \right|}{\sqrt{\frac{W_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K_{OPT}^2(\omega) d\omega}} \leq \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} S_M^2(\omega) d\omega}{2\pi W_0}}. \quad (2)$$

З виразу (2) випливає, що відношення сигнал-шум досягає максимуму, якщо нерівність трансформувати у рівність. Це відбудеться, якщо будуть виконані умови:

$$\omega t_0 + \varphi_M(\omega) + \varphi_K(\omega) = 0;$$

$$K_{OPT}(\omega) = A_0 S_M(\omega),$$

де A_0 – постійний коефіцієнт.

Звідси випливає, що передатна функція оптимального лінійного фільтра має вигляд:

$$K_{OPT}(j\omega) = A_0 S_M(\omega) e^{-j\omega t_0} e^{-j\varphi_M(\omega)}. \quad (3)$$

Комплексно-спряжена відносно $S_M(\omega)$ функція визначається виразом:

$$S_M^*(\omega) = S_M(\omega) e^{-j\varphi_M(\omega)}.$$

З огляду на це вираз (3) можна представити у вигляді:

$$K_{OPT}(j\omega) = A_0 S_M^*(\omega) e^{-j\omega t_0}.$$

Сигнал на виході оптимального лінійного фільтра визначається так:

$$s_F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_M(\omega) K_{OPT}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Під час проходження тварини корисний вихідний сигнал сенсора наявності об'єкта являє собою прямокутний імпульс певної тривалості T_C , яка залежить від швидкості руху і довжини тварини. Функція, яка описує цей сигнал, є такою:

$$s_M(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ A, & 0 \leq t \leq T_C, \\ 0, & t > T_C \end{cases}$$

де A – рівень вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта.

Як відомо, передатна функція лінійного оптимального фільтра для прямокутного імпульсу визначається виразом:

$$K_{OPT}(j\omega) = \frac{A_0}{j\omega} (1 - e^{-j\omega T_{OPT}}), \quad (4)$$

де T_{OPT} – тривалість імпульсу, узгоджена з оптимальним лінійним фільтром.

Розглянемо рис. 4, на якому наведено структурну схему лінійного оптимального фільтра для прямокутного імпульсу тривалістю T_{OPT} , який має передатну функцію, що визначається виразом (4).

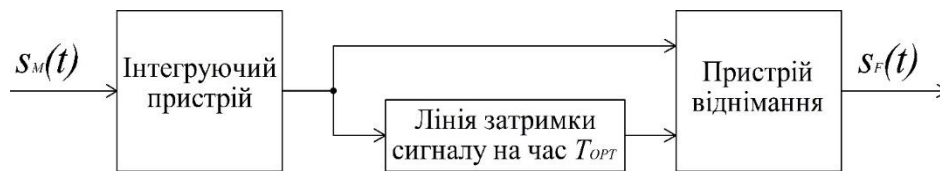


Рисунок 4. Структурна схема лінійного оптимального фільтра для прямокутного імпульсу тривалістю T_{OPT}

Інтегруючий пристрій здійснює інтегрування вхідного сигналу $s_M(t)$ та передає його на входи пристрою віднімання та лінії затримки сигналу на час T_{OPT} . На виході пристрою віднімання формується вихідний сигнал $s_F(t)$, який дорівнює різниці між інтегральною функцією вхідного сигналу та затриманою на час T_{OPT} інтегральною функцією вхідного сигналу. Якщо оптимальний фільтр узгоджений зі вхідним сигналом, тобто $T_C = T_{OPT}$, вихідний сигнал фільтра визначається виразом:

$$s_F(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ At, & 0 \leq t < T_{OPT}; \\ A(T_{OPT} - t), & T_{OPT} \leq t < 2T_{OPT}; \\ 0, & t \geq 2T_{OPT}. \end{cases} \quad (5)$$

Пікове значення вихідного сигналу фільтра за $T_C = T_{OPT}$ дорівнює:

$$s_{FOPT} = A \cdot T_{OPT}. \quad (6)$$

Відношення сигнал-шум у вихідному сигналі оптимального лінійного фільтра за $T_C = T_{OPT}$ має максимальне значення та визначається виразом:

$$R_{SN OPT} = \frac{s_{P OPT}}{\sigma_N} = \frac{A \cdot T_{OPT}}{\sigma_N}. \quad (7)$$

Позначимо через T_L тривалість вхідного сигналу оптимального лінійного фільтра, яка менша, ніж T_{OPT} . Якщо $T_C = T_L < T_{OPT}$, вихідний сигнал оптимального лінійного фільтра визначається виразом:

$$s_F(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ At, & 0 \leq t < T_L; \\ AT_L, & T_L \leq t < T_{OPT}; \\ A(T_L - t), & T_{OPT} \leq t < T_{OPT} + T_L; \\ 0, & t \geq T_{OPT} + T_L. \end{cases} \quad (8)$$

Пікове значення вихідного сигналу фільтра у цьому випадку:

$$s_{FL} = A \cdot T_L. \quad (9)$$

Якщо тривалість вхідного сигналу менша, ніж тривалість узгодженого сигналу, тоді відношення сигнал-шум у вихідному сигналі оптимального лінійного фільтра становить:

$$R_{SN L} = \frac{s_{PL}}{\sigma_N} = \frac{A \cdot T_L}{\sigma_N}. \quad (10)$$

Позначимо через T_H тривалість вхідного сигналу оптимального лінійного фільтра, яка більша ніж T_{OPT} . У випадку $T_C = T_H > T_{OPT}$ вихідний сигнал оптимального лінійного фільтра визначається виразом:

$$s_F(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ At, & 0 \leq t < T_{OPT}; \\ AT_{OPT}, & T_{OPT} \leq t < T_H; \\ A(T_H - t), & T_H \leq t < T_{OPT} + T_H; \\ 0, & t \geq T_{OPT} + T_H. \end{cases} \quad (11)$$

А пікове значення вихідного сигналу оптимального фільтра дорівнює:

$$s_{FH} = A \cdot T_{OPT}. \quad (12)$$

Якщо тривалість вхідного сигналу більша, ніж тривалість узгодженого сигналу, тоді відношення сигнал-шум у вихідному сигналі оптимального лінійного фільтра становить:

$$R_{SN H} = \frac{s_{PH}}{\sigma_N} = \frac{A \cdot T_{OPT}}{\sigma_N}. \quad (13)$$

Часові діаграми роботи оптимального лінійного фільтра для прямокутного імпульсу за різних значень тривалості вхідного сигналу наведені на рис. 5.

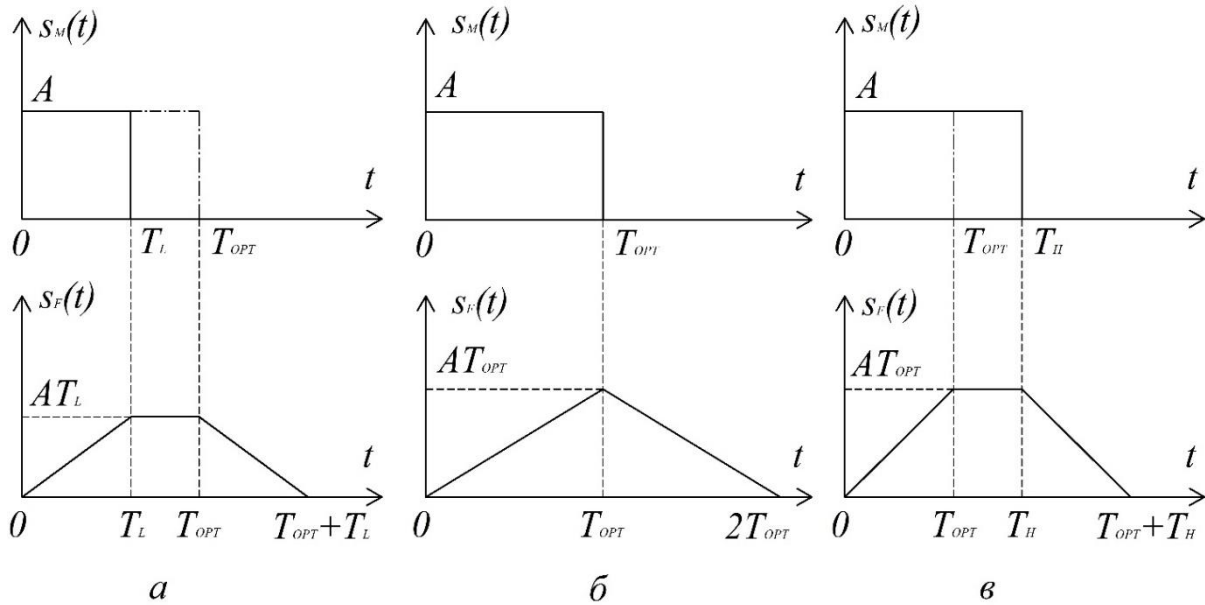


Рисунок 5. Часові діаграми роботи оптимального лінійного фільтра для прямокутного імпульсу: а) випадок $T_C = T_L < T_{OPT}$; б) випадок $T_C = T_{OPT}$; в) випадок $T_C = T_H > T_{OPT}$

Як випливає з аналізу виразів (5)–(13) та рис. 4, за $T_C = T_L < T_{OPT}$ вихідний сигнал оптимального фільтра являє собою трапецієвидну функцію, пікове значення якої менше, ніж за $T_C = T_{OPT}$ та $T_C > T_{OPT}$. За $T_C = T_{OPT}$ та $T_C > T_{OPT}$ пікове значення вихідного сигналу оптимального фільтра досягає максимального значення та дорівнює $A \cdot T_{OPT}$. З огляду на це максимум відношення сигнал-шум у вихідному сигналі оптимального фільтра досягається, коли $T_C = T_{OPT}$ і залишається таким самим за $T_C > T_{OPT}$. Отже, для досягнення максимального значення відношення сигнал-шум під час ідентифікації проходження тварини необхідно забезпечити виконання співвідношення $T_{OPT} = T_{C \text{ MIN}}$.

Реалізація лінійного оптимального фільтра для ідентифікації проходження тварини забезпечується за допомогою методів цифрової обробки сигналів у режимі реального часу. В певні моменти часу $t_1, t_2, t_3 \dots$ визначаються миттєві значення вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта $s_M(t_1), s_M(t_2), s_M(t_3) \dots$ і за ними генерується інтерполююча функція

$$s_{AF}(t). \text{ Після цього обчислюються значення функцій } s_{IAF}(t) = \int_0^t s_{AF}(t) dt \text{ та}$$

$$s_{DIAF}(t) = s_{IAF}(t - T_{C \text{ MIN}}).$$

Ознакою наявності сигналу, який відповідає проходженню тварини, є виконання рівності $A \cdot T_{C \text{ MIN}} = s_{IAF}(t) - s_{DIAF}(t)$.

Як випливає з аналізу виразу (11) та рис. 4, за $T_C = T_H > T_{OPT}$ вихідний сигнал

оптимального лінійного фільтра досягає максимального значення $A \cdot T_{OPT} = A \cdot T_{C MIN}$ протягом такого відрізка часу: $T_{CH} = T_H - T_{C MIN}$.

На основі результатів вимірювання часу T_{CH} ідентифікується проходження двох і більше тварин, якщо вони рухаються у потоці з суміщенням або без проміжку між ними. Якщо виконується співвідношення $T_{CH} \in [T_{C MIN}; T_{C MAX}]$, тоді приймається рішення про ідентифікацію проходження однієї тварини.

Якщо T_{CH} перевищує значення $T_{C MAX}$, а це відбувається під час руху тварин у потоці з суміщенням або без проміжку між ними, рішення про ідентифікацію проходження $n_C \geq 2$ тварин приймається у випадку виконання співвідношення $T_{CH} \geq n_C T_{CM}$. Кількість тварин, проходження яких ідентифіковано, у цьому випадку визначається виразом:

$$n_C = \left\lceil \frac{T_{CH}}{T_{CM}} \right\rceil.$$

Після цього вищезазначені процедури починають виконуватися спочатку. Наслідком максимізації відношення сигнал-шум завдяки оптимальному лінійному фільтру є підвищення достовірності ідентифікації проходження тварини, порівняно з наявними способами.

Експериментальні дослідження

Авторами створено макетний зразок для перевірки запропонованого алгоритму. Експериментальні дослідження макетного зразка проводилися на груповій доїльній установці типу «Ялинка-2×8», яка призначена для одночасного доїння 16 тварин. Експериментальне стадо складалося із 327 тварин. Для радіочастотної ідентифікації тварин використано панельний зчитувач PNL-4060-3 компанії Allflex та сенсор наявності об'єкта WE-T3AD компанії Highly Electric. Оптимальний лінійний фільтр реалізований програмно, на основі мікроконтролера ATmega8 виробництва Microchip Technology, Inc. Acquires Atmel.

У процесі проведення експерименту на одному проході доїльної установки був встановлений прилад БЦР-01 виробництва компанії ТОВ «Паллар» [14], до складу якого входить засіб підрахунку тварин у потоці, який не використовує оптимальну лінійну фільтрацію вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта. На другому проході був встановлений макетний дослідний зразок, який реалізований на основі оптимальної лінійної фільтрації вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта. Дослідження проводилися протягом 4 діб; доїння на фермі проводилося двічі на добу. Під час використання приладу БЦР-01 виявлялося 60–70% неідентифікованих тварин, за допомогою запропонованого макетного зразка вдалося виявити 80–90% неідентифікованих тварин.

Висновки

Для підрахунку тварин у потоці запропоновано алгоритм та розроблено макетний зразок засобу виявлення входження тварини на групову доїльну установку з використанням

оптимальної лінійної фільтрації вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта. Впровадження розробленого алгоритму забезпечує підвищення точності підрахунку тварин. Внаслідок цього збільшується кількість виявлених помилок радіочастотної ідентифікації та зменшується кількість втраченої інформації про параметри технологічного процесу виробництва коров'ячого молока на групових доїльних установках.

Під час використання наявних засобів виявлення проходження тварини внаслідок підрахунку тварин у потоці на групових установках вдається виявити 60–70% неідентифікованих тварин. Внаслідок проведених експериментів встановлено, що використання запропонованого макетного зразка дає змогу збільшити цей показник до 80–90%.

Внесок авторів

Павло Кулаков є автором ідеї створення алгоритму виявлення входження тварини на групову доїльну установку із застосуванням лінійної оптимальної фільтрації вихідного сигналу сенсора наявності об'єкта; Володимир Кучерук апаратно реалізував макетний зразок засобу виявлення проходження тварини; Роман Ліщук розробив програмне забезпечення для макетного зразка; Вікторія Маньковська та Анна Кулакова виконали експериментальні дослідження макетного зразка.

Література

1. RFID journal LLC. URL: <http://www.rfidjournal.com>
2. Saha, H. N., Chakraborty, S., & Roy, R. (2021). Integration of RFID and sensors in agriculture using IOT. In *AI, edge and IoT-based smart agriculture* (pp. 361–372). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-823694-9.00004-9.
3. Ranches, J., De Oliveira, R. A., Vedovatto, M., Palmer, E. A., Moriel, P., & Arthington, J. D. (2021). Use of radio-frequency identification technology to assess the frequency of cattle visits to mineral feeders. *Tropical Animal Health and Production*, 53(3). DOI: 10.1007/s11250-021-02784-2.
4. Achour, B., Belkadi, M., Saddaoui, R., Filali, I., Aoudjit, R., & Laghrouche, M. (2022). High-accuracy and energy-efficient wearable device for dairy cows' localization and activity detection using low-cost IMU/RFID sensors. *Microsystem Technologies*, 28(5), 1241–1251. DOI: 10.1007/s00542-022-05288-7.
5. Noinan, K., Wicha, S., & Chaisricharoen, R. (2022). The IoT-based weighing system for growth monitoring and evaluation of fattening process in beef cattle farm. In *7th International Conference on Digital Arts, Media and Technology, DAMT 2022 and 5th ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering, NCON 2022* (pp. 384–388). IEEE. DOI: 10.1109/ECTIDAMTNCON53731.2022.9720346.
6. Ding, X., Chen, L., & Gong, Y. (2019). An application of information collection method based on RFID and WSN technology in cow breeding. In *Proceedings of 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC 2019*, (pp. 2663–2666). IEEE. DOI: 10.1109/IAEAC47372.2019.8998074.

7. Кучерук, В. Ю., Паламарчук Є. А., Кулаков П. І. (2014). Підвищення достовірності ідентифікації тварин у інформаційно-вимірювальних системах контролю зоотехнічних параметрів. *Методи та прилади контролю якості*, 2(33), 115–122.
8. Кулаков, П. І. (2015). *Елементи теорії вимірювального контролю параметрів біотехнічної системи доїння*. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 220 с.
9. Lancaster, P., Gyawali, P., Mavrogiannis, C., Srinivasa, S. S., & Smith, J. R. (2022). Optical proximity sensing for pose estimation during in-hand manipulation. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (Vol. 2022 – October, pp. 11818–11825). DOI: 10.1109/IROS47612.2022.9981692.
10. Polikarpus, A., Grasso, F., Pacelli, C., Napolitano, F., & De Rosa, G. (2014). Milking behaviour of buffalo cows: Entrance order and side preference in the milking parlour. *Journal of Dairy Research*, 81(1), 24–29. DOI: 10.1017/S0022029913000587.
11. Shepley, E., Lensink, J., & Vasseur, E. (2020). Cow in motion: A review of the impact of housing systems on movement opportunity of dairy cows and implications on locomotor activity. *Applied Animal Behaviour Science*, 230. DOI: 10.1016/j.applanim.2020.105026.
12. Su, L., Zhang, Y., Wang, J., Yin, Y., Zong, Z., & Gong, C. (2020). Segmentation method of dairy cattle gait based on improved dynamic time warping algorithm. *Nongye Jixie Xuebao Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 51(7), 52–59. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.007.
13. ПАТ “Брацлав” 01/05/2023. URL: <https://www.bratslav.com/>
14. Pallar LTD Co. & Musson Co. Корпоративний сайт компаній “Паллар ЛТД” та “Муссон”. 01/05/2023. URL: www.pallar.com.ua

Рукопис отримано – 30/05/2023; прийнято до публікації – 26/06/2023.

- © Донецький національний університет імені Василя Стуса, 2023
- © Павло Кулаков, 2023
- © Володимир Кучерук, 2023
- © Роман Ліщук, 2023
- © Вікторія Маньковська, 2023
- © Анна Кулакова, 2023

Algorithm for detecting the animal entry into the group milking plant

Pavlo Kulakov, Volodymyr Kucheruk, Roman Lishchuk, Wiktoria Mankovska, Anna Kulakova

Abstract

Based on the results of previous studies, it is known that in the case of errors in the radio frequency identification of animals during movement, when they enter the group milking plant, the information about the indicators of the technological process of milking, which concerns all animals in the group, is under high risk of lost. This circumstance is because the number of the milking machines of the group milking plant strictly corresponds to the number of animals in the queue for the plant. When a radio frequency identification error occurs, information about the fact of the animal's entry is lost, as a result, the server of the information system receives incorrect information about the correspondence of the animal's numbers in the herd to the numbers of the milking machines of the group milking plant. This leads to the fact that the results of measuring zootechnical parameters of animals and parameters of the technological process of milking are obtained with a false correspondence to herd numbers of animals. To prevent such information losses at group milking plants some means of counting the animals in the stream are used. Therefore, an important factor for obtaining reliable information about the parameters of the milk production technological process at group milking plants is the accurate counting of the animals during their movement to the milking machines. Existing means of counting animals are based on the interruption of the flow of infrared radiation by animals during movement and do not always ensure their accurate counting. To detect the errors in the radio frequency identification of moving animals on group milking plants, an algorithm based on optimal linear filtering of the output signal of the object presence sensor and a means of detecting the entry of animals to count them in the stream is proposed. As a result of the implementation of this algorithm, an increase in the accuracy of animal counting is ensured. The proposed algorithm detects more errors of radio frequency identification that leads to an increase in the reliability of the obtained information relative to the parameters of cow's milk production technological process at group milking plants.

Keywords: information system, livestock farm, optimal filtering, identification, animal entry.

References

1. RFID journal LLC. URL: <http://www.rfidjournal.com>
2. Saha, H. N., Chakraborty, S., & Roy, R. (2021). Integration of RFID and sensors in agriculture using IOT. In *AI, edge and IoT-based smart agriculture* (pp. 361–372). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-823694-9.00004-9.
3. Ranches, J., De Oliveira, R. A., Vedovatto, M., Palmer, E. A., Moriel, P., & Arthington, J. D. (2021). Use of radio-frequency identification technology to assess the frequency of cattle visits to mineral feeders. *Tropical Animal Health and Production*, 53(3) DOI: 10.1007/s11250-021-02784-2.
4. Achour, B., Belkadi, M., Saddaoui, R., Filali, I., Aoudjit, R., & Laghrouche, M. (2022). High-accuracy and energy-efficient wearable device for dairy cows' localization and activity detection using low-cost IMU/RFID sensors. *Microsystem Technologies*, 28(5), 1241-1251. DOI: 10.1007/s00542-022-05288-7.
5. Noinan, K., Wicha, S., & Chairsicharoen, R. (2022). The IoT-based weighing system for growth monitoring and evaluation of fattening process in beef cattle farm. In *7th International Conference on Digital Arts, Media and Technology, DAMT 2022 and 5th ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering, NCON 2022* (pp. 384–388). IEEE. DOI: 10.1109/ECTIDAMTNCN53731.2022.9720346.
6. Ding, X., Chen, L., & Gong, Y. (2019). An application of information collection method based on RFID and WSN technology in cow breeding. In *Proceedings of 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC 2019*, (pp. 2663–2666). IEEE. DOI: 10.1109/IAEAC47372.2019.8998074.
7. Kucheruk, V. Yu., Palamarchuk, Ye. A., Kulakov, P. I. (2014). Pidvyshchennia dostovirnosti identyfikatsii tvaryn u informatsiino-vymiriuvalnykh systemakh kontroliu zootekhnichnykh parametriv. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*, 2(33), 115–122 [in Ukrainian].

8. Kulakov, P. I. (2015). *Elementy teorii vymiriuvalnoho kontroliu parametriv biotekhnichnoi systemy doinnia*. Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University, 220 p. [in Ukrainian].
9. Lancaster, P., Gyawali, P., Mavrogiannis, C., Srinivasa, S. S., & Smith, J. R. (2022). Optical proximity sensing for pose estimation during in-hand manipulation. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (Vol. 2022 – October, pp. 11818–11825). DOI: 10.1109/IROS47612.2022.9981692.
10. Polikarpus, A., Grasso, F., Pacelli, C., Napolitano, F., & De Rosa, G. (2014). Milking behaviour of buffalo cows: Entrance order and side preference in the milking parlour. *Journal of Dairy Research*, 81(1), 24–29. DOI: 10.1017/S0022029913000587.
11. Shepley, E., Lensink, J., & Vasseur, E. (2020). Cow in motion: A review of the impact of housing systems on movement opportunity of dairy cows and implications on locomotor activity. *Applied Animal Behaviour Science*, 230. DOI: 10.1016/j.applanim.2020.105026.
12. Su, L., Zhang, Y., Wang, J., Yin, Y., Zong, Z., & Gong, C. (2020). Segmentation method of dairy cattle gait based on improved dynamic time warping algorithm. *Nongye Jixie Xuebao Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 51(7), 52–59. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.007.
13. PJSC “Bratslav”. 01/05/2023. URL: <https://www.bratslav.com/>
14. Pallar LTD Co. & Musson Co. Corporate website of the companies “Паллар ЛТД” and “Муссон”. 01/05/2023. URL: www.pallar.com.ua

Вплив інтелектуального світлофорного регулювання на пропускну здатність міського перехрестя

Петро Ніколюк

професор, д-р фіз.-мат. наук
ORCID: 0000-0002-0286-297X
p.nikolyuk@donnu.edu.ua

Донецький національний університет імені Василя Стуса

Ключові слова:

інтелектуальне перехрестя,
п'єзокристалічний сенсор,
цикл роботи світлофора,
пропускна здатність перехрестя,
модель міського перехрестя,
AnyLogic

Міські транспортні мережі працюють у різних режимах. Знання цих режимів і переходів між ними є важливим фактором, що визначає ефективність роботи міської транспортної мережі. Перевантаження цієї мережі приводить до заторів. Уже протягом кількох десятиліть міський трафік транспортних засобів зіштовхнувся з проблемою заторів. Особливо актуальною ця проблема є у великих містах-мегаполісах, де кількість транспортних засобів стрімко зростає, а пропускна здатність транспортних мереж залишається практично незмінною. Ключовим елементом і головною причиною заторів є перехрестя міських доріг, де сходяться потоки автомобілів з різних напрямків. Першим кроком у технології регулювання міського трафіку є організація світлофорного регулювання. Зазвичай тривалість фаз зеленого та червоного світла є сталими і не враховують поточної завантаженості автомобілями різних напрямків. У цьому дослідженні йдеться про перехрестя зі світлофорним регулюванням інтелектуального типу. Таке регулювання принципово відрізняється від стандартного світлофорного регулювання. Інтелектуальна регуляція проїзду транспортних засобів через окреме регульоване перехрестя здійснюється з допомогою комп'ютерної програми, що враховує завантаженість напрямків на перехресті та здійснює відповідну корекцію протяжності фаз горіння червоного та зеленого світла з метою максимізації пропускної здатності. Пропонована процедура дасть змогу оптимізувати пропускну здатність кожного окремого перехрестя, що приведе до переходу міського трафіку на якісно новий рівень. Водночас кількість заторів на міських транспортних магістралях різко зменшиться. Система працює в режимі реального часу, тому динамічно регулює фази горіння світлофора, синхронізовані із завантаженістю різних напрямків на перехресті. Тривалість проїзду кожного автомобіля вибраним маршрутом скоротиться, подорож стане більш комфортною та безпечною.

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.3

Повідомлення про ретракцію – <https://doi.org/10.31558/2786-9482.2024.2.5>

Вступ

Проблема трафіку у великому місті стає все більш актуальною, оскільки кількість транспортних засобів на вулицях зростає, а пропускна здатність міських транспортних артерій залишається практично незмінною [1, 2]. Насамперед проблема пов'язана із

заторами на перехрестях, де сходяться потоки транспортних засобів із різних напрямків. Як результат такого негативного явища спостерігається різке зростання часу проїзду кожного автомобіля до пункту призначення. Спостерігається також забруднення навколишнього повітряного басейну продуктами горіння автомобільного палива.

Певною мірою вирішенню цієї проблеми сприятиме застосування мережі «інтелектуальних» світлофорів. На кожному перехресті монтується система сенсорів (або відеокамер), що дає можливість контролювати завантаженість доріг в околі кожного перехрестя. Потоки даних із різних напрямків перехрестя надходять у блок світлофорного регулювання, де відбувається аналіз отриманих сигналів і вибір фаз горіння зеленого і червоного світла. Дослідження того, на основі якої початкової інформації і у який спосіб формувати режим роботи кожного світлофора у транспортній мережі міста, і є *метою* цієї статті.

Огляд літератури

Будемо вважати, що протяжність горіння зеленої фази світлофора встановлюється пропорційною до завантаженості транспортними засобами у вибраному напрямку. Отже, горіння зеленої фази світлофора синхронізується із кількістю транспортних засобів у напрямку горіння вказаного світла. Як результат, пропускна здатність перехрестя суттєво зросте, і відповідно затори зникнуть або стануть меншими. Організувавши оптимальний рух через такий об'єкт, досягнемо більш високої ефективності трафіку по всьому місту. Для ефективної організації міського трафіку транспортні засоби потрібно реєструвати. Одним із ефективних способів реєстрації потоків транспортних засобів є використання п'єзокристаличних сенсорів, вмонтованих у полотно дороги в околі самого перехрестя. Так, компанія International Road Dynamics Inc. розробила досить ефективну конструкцію п'єзоелектричного сенсора дорожнього руху RoadTrax BL [3, 4]. Найбільш придатними для поставленої задачі є п'єзокристаличні та індуктивні сенсори, що монтуються в дорожнє полотно. Але п'єзоелектричні сенсори більш чутливі, тому доцільно вибрати саме їх.

У дослідженні [5] наведені технічні характеристики п'єзокристаличного сенсора іншої конструкції типу 12-DOF. Це високоякісний високочутливий сенсор для реєстрації величини тисків у широкому діапазоні. Пристрій працює на частотах в околі 11 кГц з похибкою не більше 1%.

Теоретичні аспекти оптимізації трафіку на окремому перевантаженому перехресті досліджені в роботах [6, 7]. У них розглядається так звана дискретно-часова модель для хрестоподібного перехрестя, що записується у вигляді системи рівнянь такого виду:

$$J_D = \sum_{k=0}^N (q_1(k) + q_2(k)) + \frac{a_1 + a_2}{2} \cdot T \cdot \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$q_1(k+1) \geq \max(q_1(k) + d_1 \cdot T \cdot (u(k) - u_L), a_1 \cdot T(1 - u(k))); \quad (2)$$

$$q_2(k+1) \geq \max((q_2(k) + d_2 \cdot T(u_H - u(k))), 0); \quad (3)$$

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}; \quad (4)$$

$$q_i(0) = q_{i,\text{int}}, \quad i = 1, 2; N = 0, 1, \dots, N-1, \quad (5)$$

де J_D – модельна величина, що являє собою кількість транспортних засобів на переважаному перехресті, що не перетнули його;

N – кількість циклів перемикавання світлофора;

k – нумератор циклів;

$q_1(k), q_2(k)$ – кількість транспортних засобів на перехресті в k -му циклі переключення світлофора на горизонтальному та вертикальному напрямках хрестоподібного перехрестя відповідно;

a_1, a_2 – кількість транспортних засобів, що прибули за одиницю часу на горизонтальний та вертикальний напрямки відповідно;

T – період перемикавання світлофора (цикл роботи);

$u(k)$ – співвідношення величин фаз горіння зеленого та червоного світла;

d_1, d_2 – кількість транспортних засобів, що перетнули перехрестя за одиницю часу у горизонтальному та вертикальному напрямках відповідно;

$$u_H = 1 - a_2/d_2, \quad u_L = a_1/d_1;$$

$u_{\min}, u_{\max}$ – мінімальне та максимальне значення;

$q_{i,\text{int}}$ – початкова величина транспортних засобів на перехресті для горизонтального та вертикального напрямів.

Цільова функція за вищенаведеної системи рівнянь представляється виразом (1). Вона являє собою кількість транспортних засобів, що не перетнули перехрестя. Зрозуміло, що таку величину треба мінімізувати. Керованими змінними є величини $u(k)$. Рівняння (2) і (3) представляють еволюцію з часом обох автомобільних черг. Рівняння (4) дає верхню і нижню границі в кожному циклі. Рівняння (5) представляє стартові (початкові) довжини автомобільних черг на перехресті. Загалом система рівнянь (1)–(5) являє собою задачу лінійного програмування. Графічний розв'язок цієї задачі представлений на рис. 1.

Дослідження методів обробки інформації з різноманітних джерел, як от сенсори, детектори, відеокамери і радары, проведено в роботі [9]. У ній розглядається технологія зв'язаних транспортних засобів (connected vehicles), яка дає можливість збирати та аналізувати зв'язки типу *транспортний засіб – інфраструктура* (V2I) та *транспортний засіб – транспортний засіб* (V2V). Врахування зв'язків такого типу дає змогу зменшити імовірність заторів, збільшити безпеку руху та зменшити витрати палива.

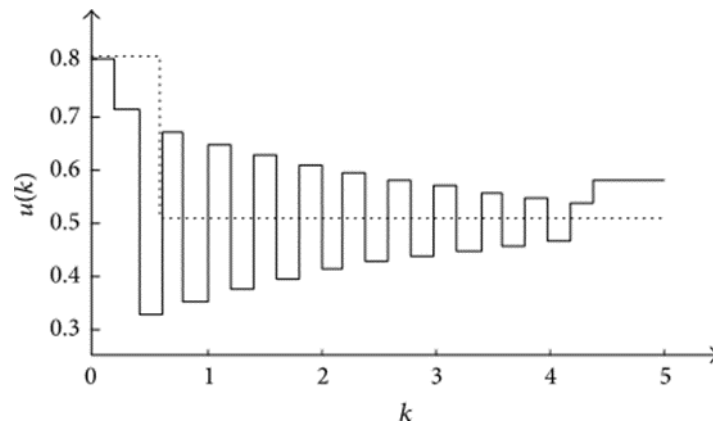


Рисунок 1. Розв'язок системи рівнянь (1)–(5):
суцільна лінія – точний розв'язок; пунктирна лінія – наближений [7]

Постановка задачі

На рис. 2 зображена схема фіксації автомобілів, що проїжджають перехрестя. На ній показані входні та вихідні сенсори, що реєструють проїзд автомобілів через перехрестя. Система передачі даних прив'язана до сенсорів, розташованих по периметру кожного перехрестя.

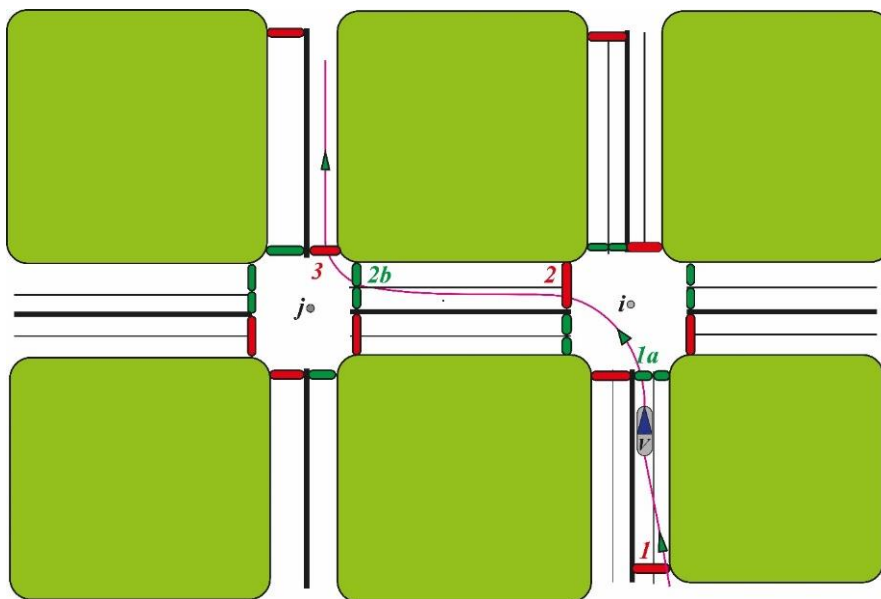


Рисунок 2. Маршрут транспортного засобу через два сусідні перехрестя

З аналітичного боку необхідно створити алгоритм та автоматизовану систему, що забезпечать ефективне перемикання світлофорних фаз, синхронізоване із завантаженістю дорожніх напрямків. Отже, йдеться про систему інтелектуальних перехресть. Під інтелектуальним перехрестям розуміється перехрестя, для якого протяжність зеленої фази горіння світлофора у певному напрямку пропорційна кількості транспортних засобів у цьому напрямку. Пропускна здатність такого перехрестя максимальна, порівняно з будь-яким іншим варіантом регуляції транспортних потоків через такий об'єкт.

Із технічного боку реєстрація транспортних засобів здійснюється з допомогою п'єзокристалічних сенсорів, які фіксують кількість транспортних засобів, що або в'їжджають на проїзну частину дороги між сусідніми перехрестями (вхідні сенсори), або виїжджають із цієї ділянки дороги (вихідні сенсори). Водночас вхідні та вихідні сенсори на сусідніх перехрестях працюють сумісно (див. рис. 2). Це дає змогу оптимізувати пропускну здатність не тільки окремих міських перехресть як автономних об'єктів, а також і аналогічну величину для всієї транспортної мережі міста.

Ідея рішення

Під час руху автомобіля по вулицях міста важливою перепорою стають, з одного боку, перехрестя, а з іншого – затори, які можуть виникати як на перехрестях, так і поза ними. Отже, причина виникнення заторів комплексна. Часто виникає ситуація, коли один напрямок перехрестя значно менш навантажений за перпендикулярний йому. Запобігати таким випадкам повинні інтелектуальні перехрестя.

У нашому випадку модернізація звичайного перехрестя до інтелектуального буде реалізовуватись завдяки інсталяції системи, що діє на основі принципу про те, що протяжність зеленої фази горіння світлофора напрямку пропорційна відповідній кількості транспортних засобів. Отже, інтелектуальне перехрестя здатне аналізувати трафік-ситуацію та за необхідності пролонговувати довжину зеленої фази для найбільш завантаженого напрямку. Як видно з вищенаведених міркувань, світлофорним комплексом на перехресті має керувати система, яка має:

- підраховувати кількість автомобілів на кожному з напрямків перехрестя;
- регулювати довжину сигналів на кожному зі світлофорів у строгій відповідності із трафік-ситуацією;
- досягати максимальної пропускну здатності.

Розвиваючи ідею далі, потенційно можливо об'єднати всі системи окремих перехресть так, щоб наступні перехрестя могли передбачати, де виникне затор, і запобігати цьому ще до того, як він утвориться. На абстрактному рівні систему світлофорів на інтелектуальному перехресті можна порівняти з роботою регулювальника, котрий миттєво реагує на стан трафіку, завдяки чому досягається максимальна пропускну здатність.

Кожне перехрестя оснащується двома типами сенсорів (рис. 3) – вхідними (input sensors) та вихідними (output sensors). Кількість вихідних сенсорів залежить від кількості смуг проїзної частини дороги одного напрямку (на рис. 3 таких сенсорів 3, відповідно до кількості смуг). На рис. 3 скругленими прямокутниками зображені транспортні засоби, маршрути яких пролягають у напрямку $i \rightarrow j$. Кожен вхідний та вихідний сенсори з'єднані з центром керування трафіком (на рисунку зображений лише один сигнальний провід, що виходить від одного із сенсорів).

Отже, кожна смуга оснащується власним вихідним сенсором. Для чого? Річ у тім, що автомобілі розташовуються по смугах відповідно до маршруту руху кожного з них. Наприклад, якщо автомобіль розташований у смузі, що примикає до осьової лінії дороги, то водій цього транспортного засобу може рухатись прямо, наліво або здійснювати

розворот на перехресті, але в жодному разі не повертати направо: такий маневр заборонений правилами дорожнього руху. Завдяки сумісній роботі вхідних та вихідних сенсорів є можливість реєструвати транспортні засоби, що в'їжджають на ділянку дороги між сусідніми перехрестями (див. рис. 2). Ідеться про те, що вхідний сенсор на перехресті i працює сумісно із комплектом вихідних сенсорів на перехресті j , і завдяки цьому кожна смуга ділянки дороги одного напрямку $i \rightarrow j$ знаходиться під контролем. Це дає можливість визначити як завантаженість ділянки дороги $i \rightarrow j$ загалом, так і завантаженість кожної окремої смуги на цій ділянці. Власне, будь-який маршрут складається із певної сукупності смуг на ділянках дороги одного напрямку, з'єднаних перехрестями. Отже, вся транспортна мережа міста знаходиться під контролем. Вираз *під контролем* означає, що є можливість визначати як динаміку руху транспортного засобу на кожній ділянці дороги загалом, так і на кожній окремій смузі руху цієї ділянки дороги. Отже, можна говорити про пропускну здатність як вибраної ділянки дороги $i \rightarrow j$, так і окремої смуги на цій ділянці. Мовою теорії графів, можна визначати вагу кожного ребра та всього маршруту загалом. Завдання полягає в тому, щоб знайти маршрут найменшої ваги.

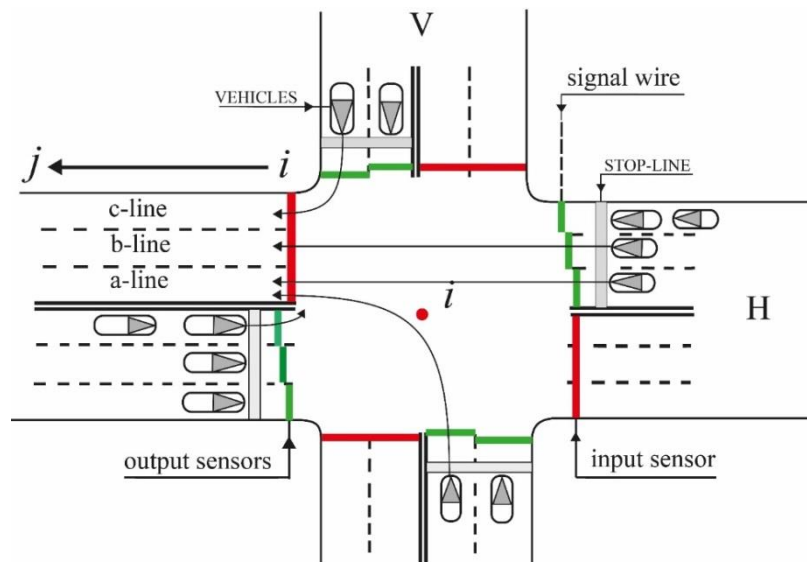


Рисунок 3. Інтелектуальне перехрестя зі вхідними та вихідними сенсорами

Автомобілі, що перетнули перехрестя i та рухаються в напрямку перехрестя j , перелаштовуються по смугах руху відповідно до їх подальшого маршруту. Якщо водій транспортного засобу має намір повернути на перехресті j направо, тоді він повинен зайняти праву смугу руху. Якщо маршрут транспортного засобу пролягає прямо в напрямку $i \rightarrow j$, то тоді водій повинен зайняти смугу b , тобто центральну смугу. Нарешті, якщо водій повертає на перехресті j направо, тоді він повинен зайняти праву смугу. Виникає питання: як реєструвати динаміку транспортних засобів по кожній зі смуг руху?

На кількісному рівні динаміка руху вздовж ділянки дороги $i \rightarrow j$ обумовлена співвідношенням між величиною транспортних засобів, що в'їхали за певний час, наприклад, один цикл переключення світлофора, та виїхали із цієї ділянки дороги.

Технічно процес організований так: вхідний сенсор на перехресті i реєструє автомобілі, які в'їжджають на ділянку дороги $i \rightarrow j$ з усіх можливих напрямків перехрестя i . Комплекс вихідних сенсорів на перехресті j реєструє автомобілі, що виїхали за межі цієї ділянки. Відношення цих величин якраз і свідчить про динаміку руху на конкретній ділянці дороги.

Моделювання роботи перехрестя

В основі всієї технології регулювання трафіку як вихідна комірка слугує окреме регульоване перехрестя. Модель інтелектуального перехрестя реалізована за допомогою програми імітаційного моделювання AnyLogic (рис. 4.) Робота моделі базується на імітації потоків транспортних засобів, що створюються за допомогою об'єктів типу carSource. Перехрестя оснащено світлофорами. Протяжність горіння зеленої фази цих світлофорів синхронізована зі ступенем завантаженості відповідних напрямків руху. Зображене на рис. 4 перехрестя дає змогу контролювати та оптимізувати пропускну здатність завдяки кореляції між протяжністю горіння зеленої фази у певному напрямку (горизонтальному чи вертикальному) та завантаженістю транспортними засобами на вказаному напрямку.

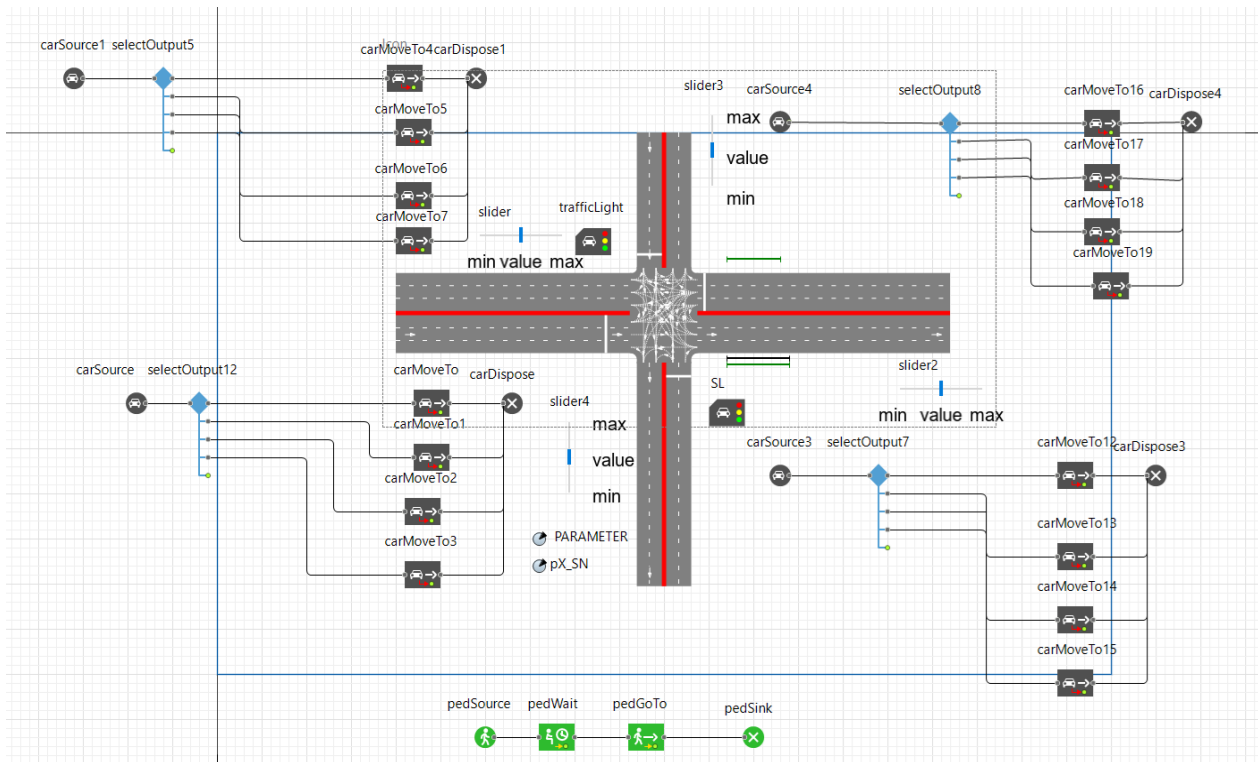


Рисунок 4. Модель інтелектуального хрестоподібного перехрестя в AnyLogic

Вважатимемо, що цикл роботи світлофора – це величина, що зазвичай складається з таких доданків:

$$T = trh + tgh + tyh + tp, \quad (6)$$

де trh – час горіння червоного світла у горизонтальному напрямку;

t_{gh} – час горіння зеленого світла у горизонтальному напрямку;

t_{yh} – час горіння жовтого світла також у горизонтальному напрямку;

t_p – час горіння зеленого світла для пішоходів.

Таке саме співвідношення можна записати стосовно вертикального напрямку перехрестя, тобто:

$$T = trv + tgv + tyv + tp, \quad (6)$$

де trv – час горіння червоного світла у вертикальному напрямку;

tgv – час горіння зеленого світла у вертикальному напрямку;

tyv – час горіння жовтого світла так само у вертикальному напрямку.

Важливим чинником покращення надійності та достовірності даних зі вхідних та вихідних сенсорів є інформація з GPS-пристроїв. Майже кожен водій працює якщо не з GPS-навігатором, то із мобільним телефоном чи смартфоном із програмою Google Maps. Це дає змогу використати GPS-дані як додаткову інформацію. Описана ситуація детально розглядається в роботах [10–14]. Хоча GPS-дані не дають точної інформації, але для нашої задачі такі дані важливі як допоміжні, щоб правильно інтерпретувати дані від дорожніх сенсорів. Для цього статистичний характер GPS-даних цілком прийнятний, і немає необхідності точно визначати положення кожного транспортного засобу – важливим є лише загальна кількість таких об'єктів, яка є мірою завантаженості дорожніх смуг міста. Чому важливо поєднати дані з п'єзокристаличних сенсорів із GPS-даними? Річ у тім, що основну роль відіграють саме дані, отримувані зі вхідних та вихідних сенсорів, які розташовані між сусідніми перехрестями. З іншого боку, програма передбачає використання водіями GPS-навігаторів. Тому цілком логічно використати GPS-інформацію повною мірою. На доцільність поєднання стаціонарних даних та мобільних, отримуваних із GPS-пристроїв чи смартфонів, вказується, зокрема, і в роботі [15]. Подібний алгоритм використання GPS-даних для прокладання оптимальних маршрутів детально розглядається також у [16, 17]. У них використовуються набори GPS-даних, що характеризуються географічною широтою, довготою та часовим маркером. GPS-точки у цій роботі генеруються з певною вибраною частотою імітатором, і на основі них прокладається оптимальний маршрут, а також обраховується середня швидкість кожного транспортного засобу.

Алгоритм регулювання трафіку на окремому перехресті, в якому використані змінні з формул (6) та (7) у вигляді java-програми, наведено нижче:

```
import java.util.Random;
import static java.lang.StrictMath.abs;
interface Lights{
    int REDH =0;
    int YELLOWH =1;
    int GREENH =2;
    int REDV =3;
    int YELLOWV =4;
    int GREENV =5;
    int GREENP = 6;
    int ERROR = -1;
}
```

```
class T implements Lights {
    private int delay;
    private static int light = REDH;
    T(int sec) {
        delay = 1000 * sec;
    }
    public int shift() {
        int count = (light++) % 7;
        try {
            switch (count) {
                case REDH:
                    Thread.sleep(delay);
                    break;
                case YELLOWH:
                    Thread.sleep(delay / 3);
                    break;
                case GREENH:
                    Thread.sleep(delay / 2);
                    break;
                case REDV:
                    Thread.sleep(delay);
                    break;
                case YELLOWV:
                    Thread.sleep(delay / 3);
                    break;
                case GREENV:
                    Thread.sleep(delay / 2);
                    break;
                case GREENP:
                    Thread.sleep(delay);
                    break;
            }
        } catch (Exception e) {
            return ERROR;
        }
        return count;
    }
}

class TrafficRegulator {
    static int T = 96;
    private static T t = new T(1);
    static Random gn1 = new Random();
    static Random gn2 = new Random();
    static Random gn3 = new Random();
    static Random gn4 = new Random();
    TrafficRegulator() {
    }
    public static void main(String[] args) {
        double k = Math.abs ((gn1.nextDouble() + gn2.nextDouble() ) /
            (gn3.nextDouble() + gn4.nextDouble()));
        double tg = 35.0;
        double tp = 23.0;
        double tyh = 2.0;
        double tgp = 15.0;
        double tgh = k * tg;
        double trh = (double) (T - tyh - tgh - tp);
    }
}
```

```

double tgv = abs(2.0 * tg - tgh);
double trv = (double)T - trh;
int tyv = 2;
for(int j = 0; j < 7; ++j) {
    switch(t.shift()) {
        case -1:
            System.out.println("Time error!");
            break;
        case 0:
            System.out.println("red horizontal!");
            System.out.format("%.1f%n", trh);
            break;
        case 1:
            System.out.println("yellow horizontal!");
            System.out.println(tyh);
            break;
        case 2:
            System.out.println("green horizontal!");
            System.out.format("%.1f%n", tgh);
            break;
        case 3:
            System.out.println("red vertical!");
            System.out.format("%.1f%n", trv);
            break;
        case 4:
            System.out.println("yellow vertical!");
            System.out.println(tyv);
            break;
        case 5:
            System.out.println("green vertical!");
            System.out.format("%.1f%n", tgv);
            break;
        case Lights.GREENP:
            System.out.println("green pedestrian!");
            System.out.println(tgp);
            break;
        default:
            System.err.println("Unknown light.");
            return;
    }
}
}
}

```

Зупинимось коротко на аналізі програми, яка регулює проїзд транспортних засобів через хрестоподібне перехрестя. Базовими змінними обрано величини типу *REDH* – червоне світло в горизонтальному напрямку. Принципово те, що програма аналізує завантаженість транспортними засобами напрямків перехрестя: чим більше завантажений напрямок – горизонтальний чи вертикальний, – тим довше горітиме зелене світло у відповідному напрямку. Звичайно, є обмеження на період перемикування світлофора, яке в цьому разі вибраний рівним 96 с. Для імітації реальної ситуації на перехресті у програмі включено 4 генератори випадкових величин, що імітують завантаженість перехрестя транспортними засобами. Ключовим є відношення кількості автомобілів на горизонтальному та

вертикальному напрямках. У програмі таке відношення задається коефіцієнтом k . Варіація величини k імітує якраз відношення у змінах завантажених. Відповідно до динаміки трафіку на перехрестях змінюється і видача програми, зокрема тривалість горіння зеленого світла у горизонтальному та вертикальному напрямках. Приклад видачі наведено нижче:

red horizontal!	29.6
yellow horizontal!	2.0
green horizontal!	41.4
red vertical!	66.4
yellow vertical!	2
green vertical!	28.6
green pedestrian!	15.0

Презентована програма дає можливість суттєво покращити пропускну здатність перехрестя завдяки «розумному» режиму їх роботи в плані протяжності горіння різних фаз, синхронізовану із завантаженистю різних напрямків перехрестя.

Шляхом регулювання з допомогою слайдерів навантаженості кожного із напрямків (див. рис. 4) з використанням результатів запропонованої програми досягаємо найвищої пропускну здатності перехрестя. Для оцінювання ефекту порівнюємо із ситуацією, коли перехрестя хоча і є регульованим, проте згаданої вище корекції не відбувається. Розрахунки показують, що у випадку інтелектуального перехрестя пропускну здатність зростає у 1.7–2.2 рази. Це довгий вагомий показник. Якщо кожне регульоване міське перехрестя збільшить свою пропускну здатність хоча б у 1.7 рази, то міський трафік загалом у місті перейде на якісно новий рівень. Це приведе до різкого зменшення заторів на міських вулицях.

Висновки

Запропоновано інтелектуальний алгоритм проїзду транспортних засобів через міські перехрестя, які є головною причиною заторів (колапсу) міського трафіку. Суть процедури інтелектуалізації полягає у тому, щоб протяжність горіння зеленої фази світлофора корелювала із завантаженистю транспортними засобами відповідного напрямку на перехресті. Власне, це є головним трендом представленого дослідження. Дослідження має практичну спрямованість, його результати можуть бути використані на реальних міських перехрестях з метою покращення умов проїзду як через окреме перехрестя, так і через усе місто. Внаслідок чого динаміка руху транспортних засобів через лабіринт міських вулиць покращиться, а кількість заторів – зменшиться. Як результат – час проїзду кожного автомобіля по вибраному маршруту зменшиться.

Література

1. Богуто, Д. Г., Волинець, В. І., Ніколюк, П. К., Ніколюк, П. П. (2017). Автоматизована система керування рухом транспортних засобів в межах міста. *Вісник Харківського університету, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*, 5(3). URL: <https://r.donnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/1072>

2. Богуто, Д. Г., Комаров, В. Ф., Ніколюк, П. К., Ніколюк, П. П. (2018). Інтелектуальний алгоритм управління міським трафіком. *Вісник Харківського університету, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*, 38(46). URL: <https://r.donnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/1073>
3. Piezoelectric RoadTrax BL–International Road Dynamics, Inc. URL: www.irdinc.com/sensors/piezoelectric-roadtrax-bl.html.
4. Sobral, T., Galvao, T., Bornes, J. (2019). Visualization of urban mobility data from intelligent transportation systems. *Sensors*, 19(332). DOI: 10.3390/s19020332.
5. Liu, J., Liang, C.-W., Li, M., Jian, K., Qin, L., Liu, J.-C. (2017). Principle Research on a Novel Piezoelectric 12-DOF force/acceleration sensor. *Journal of Sensors*, 2017. DOI: 10.1155/2017/2836365.
6. Cai, Y., Liu, Z., Sun, X., Chen, L., Wang, H., Zhang, Y. (2017). Vehicle detection based on deep dual-vehicle deformable part models. *Journal of Sensors*, 2017. DOI: 10.1155/2017/5627281.
7. Tan, J., Shi, X., Li, Z., Yang, K., Xie, N., Yu, H., Wang, L., Li, Z. (2017). Continuous and discrete-time optimal controls for an isolated signalized intersection. *Journal of Sensors*, 2017. DOI: 10.1155/2017/6290248.
8. Ioslovich, I., Haddad, J., Gutman, P.-O., Mahalel, D. (2011). Optimal traffic control synthesis for an isolated intersection. *Control Engineering Practice*, 19(8), 900–911. DOI: 10.1016/j.conengprac.2011.05.004.
9. Wang, P.-W., Yu, H.-B., Xiao, L., Wang, L. (2017). Online traffic condition evaluation method for connected vehicles based on multisource data fusion, *Journal of Sensors*. 2017. DOI: 10.1155/2017/7248189.
10. Quddus, M., & Washington, S. (2015). Shortest path and vehicle trajectory aided map-matching for low frequency GPS data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 328–339. DOI: 10.1016/j.trc.2015.02.017.
11. Dabiri, S., Heaslip, K. (2018). Inferring transportation modes from GPS trajectories using a convolutional neural network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 86, 360–371. DOI: 10.1016/j.trc.2017.11.021.
12. Wang, F., Chen, C. (2018). On data processing required to derive mobility patterns from passively-generated mobile phone data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 87, 58–74. DOI: 10.1016/j.trc.2017.12.003.
13. Ma, X., Yu, H., Wang, Y., Wang, Y., Gomez-Gardenes, J. (2015). Large-scale transportation network congestion evolution prediction using deep learning theory. *PLoS ONE*, 10(3). DOI: 10.1371/journal.pone.0119044.
14. Hashemi, M., Karimi, H. A. (2016). A weight-based map-matching algorithm for vehicle navigation in complex urban networks. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 20(6), 673–590. DOI: 10.1080/15472450.2016.1166058.
15. Rahmani, M., Koutsopoulos, H. N. (2014). Floating car and camera data fusion for non-parametric route travel time estimation. *Procedia Computer Science*, 37, 390–395. DOI: 10.1016/j.procs.2014.08.058.

16. Oshyaniv, M. F., Sundberg, M., Karlström, A. (2014). Consistently estimating link speed using sparse GPS data with measured errors. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 111(2), 829–838. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.01.117.
17. Wang, S., Jiang, X., Li, H., Hu, Z., Xu, C. (2023). Traffic safety assessment with integrated communication system of connected and automated vehicles at signalized intersections. *Transportation Research Record*. DOI: 10.1177/03611981231201107.

Рукопис отримано – 31/05/2023; прийнято до публікації – 26/06/2023.

© Донецький національний університет імені Василя Стуса, 2023

© Петро Ніколюк, 2023

[Retracted Article]**The impact of intelligent traffic signal control on the capacity of an urban-controlled intersection**

Petro Nikolyuk

Abstract

Urban transportation networks operate in different modes. Knowing these modes and the transitions between them is an important factor in determining the efficiency of the urban transportation network. Overloading this network leads to traffic jams. For several decades, urban traffic has been facing the problem of congestion. This problem is particularly acute in large metropolitan cities, where the number of vehicles is growing rapidly and the capacity of transport networks remains virtually unchanged. A key element and the main cause of traffic jams is the intersection of city roads, where traffic flows from different directions converge. The first step in urban traffic management technology is the organization of traffic lights. Usually, the duration of the green and red light phases is constant, which does not take into account the current traffic congestion in different directions. In this study, we are talking about intersections with intelligent traffic control. This type of control is fundamentally different from standard traffic light control. Intelligent traffic control of vehicles passing through a separately controlled intersection is carried out using a computer program that takes into account the traffic congestion at the intersection and makes appropriate adjustments to the length of the red and green light phases to maximize throughput. The proposed procedure will optimize the throughput of each individual intersection, which will eventually lead to the transition of urban traffic to a qualitatively new level. At the same time, the number of traffic jams on city highways will be drastically reduced. The system operates in real time and therefore dynamically adjusts the phases of the traffic light, synchronized with the load of different directions at the intersection. The duration of each car's journey along the selected route will be reduced, making the journey more comfortable and safe.

Keywords: intelligent intersection, piezoelectric crystal sensor, traffic light cycle, intersection capacity, urban intersection model, AnyLogic.

References

1. Bohuto, D. H., Volynets, V. I., Nikoliuk, P. K., Nikoliuk, P. P. (2017). Avtomatyzovana systema keruvannia rukhom transportnykh zasobiv v mezhakh mista. *Visnyk Kharkivskoho universytetu, seriia «Matematychni modeliuvannia. Informatsiini tekhnologii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia»*, 5(3). URL: <https://r.donnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/1072>. [in Ukrainian].
2. Bohuto, D. H., Komarov, V. F., Nikoliuk, P. K., Nikoliuk, P. P. (2018). *Intelektualnyi alhorytm upravlinnia miskym trafikom*. *Visnyk Kharkivskoho universytetu, seriia «Matematychni modeliuvannia. Informatsiini tekhnologii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia»*, 38(46). URL: <https://r.donnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/1073> [in Ukrainian].
3. Piezoelectric RoadTrax BL—International Road Dynamics, Inc. URL: www.irdinc.com/sensors/piezoelectric-roadtrax-bl.html.
4. Sobral, T., Galvao, T., Bornes, J. (2019). Visualization of urban mobility data from intelligent transportation systems. *Sensors*, 19(332). DOI: 10.3390/s19020332.
5. Liu, J., Liang, C.-W., Li, M., Jian, K., Qin, L., Liu, J.-C. (2017). Principle Research on a Novel Piezoelectric 12-DOF force/acceleration sensor. *Journal of Sensors*, 2017. DOI: 10.1155/2017/2836365.
6. Cai, Y., Liu, Z., Sun, X., Chen, L., Wang, H., Zhang, Y. (2017). Vehicle detection based on deep dual-vehicle deformable part models. *Journal of Sensors*, 2017. DOI: 10.1155/2017/5627281.
7. Tan, J., Shi, X., Li, Z., Yang, K., Xie, N., Yu, H., Wang, L., Li, Z. (2017). Continuous and discrete-time optimal controls for an isolated signalized intersection. *Journal of Sensors*, 2017. DOI: 10.1155/2017/6290248.

8. Ioslovich, I., Haddad, J., Gutman, P.-O., Mahalel, D. (2011). Optimal traffic control synthesis for an isolated intersection. *Control Engineering Practice*, 19(8), 900–911. DOI: 10.1016/j.conengprac.2011.05.004.
9. Wang, P.-W., Yu, H.-B., Xiao, L., Wang, L. (2017). Online traffic condition evaluation method for connected vehicles based on multisource data fusion, *Journal of Sensors*. 2017. DOI: 10.1155/2017/7248189.
10. Quddus, M., & Washington, S. (2015). Shortest path and vehicle trajectory aided map-matching for low frequency GPS data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 328–339. DOI: 10.1016/j.trc.2015.02.017.
11. Dabiri, S., Heaslip, K. (2018). Inferring transportation modes from GPS trajectories using a convolutional neural network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 86, 360–371. DOI: 10.1016/j.trc.2017.11.021.
12. Wang, F., Chen, C. (2018). On data processing required to derive mobility patterns from passively-generated mobile phone data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 87, 58–74. DOI: 10.1016/j.trc.2017.12.003.
13. Ma, X., Yu, H., Wang, Yun., Wang, Y., Gomez-Gardenes, J. (2015). Large-scale transportation network congestion evolution prediction using deep learning theory. *PLoS ONE*, 10(3). DOI: 10.1371/journal.pone.0119044.
14. Hashemi, M., Karimi, H. A. (2016). A weight-based map-matching algorithm for vehicle navigation in complex urban networks. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 20(6), 673–590. DOI: 10.1080/15472450.2016.1166058.
15. Rahmani, M., Koutsopoulos, H. N. (2014). Floating car and camera data fusion for non-parametric route travel time estimation. *Procedia Computer Science*, 37, 390–395. DOI: 10.1016/j.procs.2014.08.058.
16. Oshyaniv, M. F., Sundberg, M., Karlström, A. (2014). Consistently estimating link speed using sparse GPS data with measured errors. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 111(2), 829-838. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.01.117.
17. Wang, S., Jiang, X., Li, H., Hu, Z., Xu, C. (2023). Traffic safety assessment with integrated communication system of connected and automated vehicles at signalized intersections. *Transportation Research Record*. DOI: 10.1177/03611981231201107.

Покращення точності нечіткої бази Мамдані за допомогою суперечливих правил

Сергій Штовба

професор, д-р техн. наук
ORCID: 0000-0003-1302-4899
s.shtovba@donnu.edu.ua

Донецький національний університет імені Василя Стуса

Роман Резнік

ORCID: 0009-0007-4740-7093
reznik.r@donnu.edu.ua

Донецький національний університет імені Василя Стуса

Ключові слова:

нечітке виведення,
нечіткі правила Мамдані,
суперечливі правила,
селекція правил,
жадібний алгоритм,
точність.

Розглядається задача моделювання багатофакторних залежностей з неперервним виходом за допомогою нечітких баз знань. Однією із головних конкурентних переваг нечіткого моделювання є інтерпретабельність нечітких баз знань – користувачу, далекому від математичних методів, доволі легко можна зрозуміло пояснити, на підставі чого отримується той чи інший висновок. Для нечіткого моделювання залежностей з неперервним виходом найчастіше використовують бази знань Мамдані та Сугено. Нечіткі бази знань Сугено точніші, але мають низьку інтерпретабельність. Бази знань Мамдані мають високу інтерпретабельність, але низьку точність. Підвищити інтерпретабельність баз знань Сугено проблематично через те, що ця властивість обумовлена саме форматом правил. Задача підвищення точності бази знань Мамдані доволі легко формалізується, тому можна спробувати її вирішити у деякий алгоритмічний спосіб. Саме на підвищення точності нечіткої бази знань Мамдані і спрямована стаття. Способом підвищення точності нечіткої бази знань Мамдані обрано використання суперечливих правил. Під суперечливими правилами розуміються правила з однаковими антецедентами та різними консеквентами. За результатами проведених обчислювальних експериментів встановлено, що застосування суперечливих правил Мамдані через підвищення роздільної здатності лінгвістичної опису залежностей забезпечує кращу точність. Експерименти проведено на трьох синтетичних наборах даних і на одному реальному наборі для задачі Auto MPG. Селекція правил здійснена за жадібним алгоритмом. Використання суперечливих правил дає змогу на етапі структурної ідентифікації досягти кращої точності та компактності нечіткої моделі. Також встановлено, що логічне виведення за суперечливих правил можна коректно та результативно реалізувати за схемою A-FATI, тоді як у попередніх дослідженнях використовувалася спрощена схема B-FITA.

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.5

Вступ

Сьогодні нечіткі бази знань успішно застосовують для моделювання складних залежностей у різних областях – в медицині, економіці, інженерії тощо [1, 2]. Однією із головних конкурентних переваг нечітких баз знань є інтерпретабельність моделі –

користувачу, далекому від математичних методів, доволі легко можна пояснити на підставі чого отримується той чи інший висновок.

У статті розглядаються задачі ідентифікації залежностей з неперервним виходом. Для нечіткого моделювання таких залежностей найчастіше використовують бази знань з правилами у форматах Мамдані та Сугено. Нечіткі бази знань Сугено точніші, але мають низьку інтерпретабельність. Бази знань Мамдані, навпаки, мають високу інтерпретабельність, але низьку точність [3]. Підвищити інтерпретабельність баз знань Сугено проблематично через те, що ця властивість обумовлена саме форматом правил. Задача підвищення точності бази знань Мамдані доволі легко формалізується, тому можна спробувати її розв'язати у деякий алгоритмічний спосіб. Саме на підвищення точності нечіткої бази знань Мамдані і спрямована стаття. Способом підвищення точності нечіткої бази знань Мамдані обрано використання суперечливих правил.

Огляд літератури та мета дослідження

У нечіткій базі знань Мамдані антецеденти і консеквенти правил задано нечіткими термами. Як приклад, наведемо 2 такі правила: 1) якщо температура – *низька* та вітер – *сильний*, тоді витрати газу на опалення – *високі*; 2) якщо температура – *нижче середньої*, тоді витрати газу на опалення – *середні*. У наведених правилах нечіткі терми виділено курсивом. Використання у правилах лінгвістичних антецедентів та консеквентів обумовлює інтерпретабельність нечіткої бази знань Мамдані.

Проектування нечітких баз знань переважено здійснюють за критеріями точності, компактності та інтерпретабельності. Ця трійка критеріїв є конфліктною – неможливо створити нечітку базу знань, яка одночасно є найкращою за усіма цими критеріями. Розроблено багато підходів до проектування нечітких баз знань на основі деякого компромісу між цими критеріями, які описані у статтях [3, 4, 5, 6] та в інших публікаціях.

Точність нечіткої бази знань Мамдані зазвичай оцінюють за середньою квадратичною нев'язкою між експериментальними даними та виходом моделі. Компактність оцінюють за кількістю нечітких правил та сумарною довжиною антецедентів усіх правил [7, 8]. Інтерпретабельність також можна оцінити кількісно [9], але зручніше сформулювати множину обмежень на число термів та форму функцій належностей нечітких множин. Виконання цієї множини обмежень забезпечує інтерпретабельність нечіткої бази знань [8, 10]. Водночас вважається, що сукупність правил у нечіткій базі знань узгоджена, тобто в ній відсутні суперечливі правила з однаковими антецедентами та різними консеквентами.

Цілком логічна заборона на суперечливі правила спільно з іншою вимогою до інтерпретабельності, а саме з малою потужністю вихідної терм-множини, інколи призводять до низької точності. Пояснимо цей ефект на такому прикладі. Нехай вихідна зміна набуває значення з терм-множини {*Дуже низький*, *Низький*, *Середній*, *Високий*, *Дуже високий*}. Досліджувана залежність така, що в деякій зоні факторного простору вихідне нечітке значення *Середній* – замале, а нечітке значення *Високий* – завелике. Адекватним є значення між *Середнім* та *Високим*, але терма *Вище середнього* у терм-множині немає. У такому випадку проблемну зону факторного простору залишають без правила і

намагаються описати досліджувану залежність правилами для сусідніх зон. Внаслідок суперпозиції висновків після дефазифікації можна вийти на необхідне вихідне значення. Але підібрати таку вдалу сукупність правил інколи доволі складно.

Альтернативою використанню кількох правил із сусідніх зон є застосування суперечливих правил. Якщо в базі знань є пара суперечливих правил, наприклад, із консеквентами *Середній* та *Високий*, тоді результат логічного виведення за ними буде між *Середнім* та *Високим*. Цей висновок відповідатиме бажаному терму *Вище середнього*. Таке застосування суперечливих правил підвищує лінгвістичну роздільну здатність опису залежності, яку моделює база знань. Відповідно з'являються шанси підвищити точність нечіткої бази знань через використання суперечливих правил без розширення вихідної терм-множини.

Вперше ідея використання суперечливих нечітких правил запропонована в [11]. У тій статті усі суперечливі правила розподілено у дві нечіткі бази знань. У першу базу знань увійшли правила з консеквентами першого вибору, які отримані за деяким алгоритмом екстракції правил з навчальної вибірки. Друга база знань сформована із правил, кожне з яких є суперечливим до одного із правил із першої бази знань. Правила з другої бази знань мають консеквенти другого рангу, які отримані як проміжні результати того самого алгоритму екстракції правил. Логічне виведення здійснюється одночасно за обома базами знань з агрегуванням результату на рівні правил. Використовується спрощена схема дефазифікації за ядрами консеквентів. Алгоритмічно, сукупність таких процедур еквівалентна виведенню по одній спільній сингтонній базі знань, у якій кожна пара суперечливих правил замінена на одне сингтонне. У сингтонному правилі консеквентом є числове значення, яке знаходиться між ядрами нечітких консеквентів суперечливих правил. Тобто хоча за зовнішнім виглядом нечіткі бази знань у [11] мають суперечливі правила, алгоритмічно це не так.

Ідея суперечливих правил розвинута в [12]. Запропоновано додавати суперечливі правила лише до тих правил, де це дійсно потрібно, де це має сенс. Пару суперечливих правил у тій статті називають *double-consequent rule*. На формування пар суперечливих правил накладається змістовне обмеження, відповідно до якого значеннями консеквентів можуть бути лише сусідні терми. Наприклад, якщо консеквент першого суперечливого правила дорівнює *Низький*, тоді консеквент другого правила з цієї пари може бути лише *Середній*. Ця пара суперечливих правил змістовно еквівалентна одному правилу, консеквент якого дорівнює фіктивному терму *Нижче середнього*. Логічне виведення в [12] реалізовано за схемою В-FITA – *first infer, then aggregate*, коли спочатку висновок за кожним правилом дефазифікують, а потім числові значення за усіма правилами усереднюють. Лінгвістичні терми в [12] описано трикутними функціями належності. Це призводить до того, що числовий результат виводу за правилом з некрайнім термом у консеквенті завжди буде однаковим. Він не залежить від рівня активації правила, відповідно не залежить і від початкових даних. Для правил, консеквенти яких задано крайніми термами *Низький* або *Високий*, висновок залежить від ступеня активації. Зміни висновку за такими правилами обумовлені несиметричністю функцій належностей крайніх термів у межах діапазону значень вихідної змінної. Відповідно зрізання функції належності на різних рівнях

призведе до різних результатів дефаззифікації. Отже, під час логічного виведення за [12] кожен пару суперечливих нечітких правил без крайніх термів у консеквантах можна замінити на одне сингтонне правило. У своїй подальшій роботі [13] автори вказують на цю властивість і доводять, що висновок за парою суперечливих правил еквівалентний висновку за одним сингтонним правилом з консеквентом, що дорівнює середньому значенню ядер задіяних нечітких множин. Але автори не вказують, що алгоритмічно таке виведення відповідає підходу [11] з успадкуванням описаного вище недоліку. Зазначений ефект відсутній для пар суперечливих правил, консеквент одного з яких задано крайнім термом, але таких правил порівняно небагато.

У [12] згадується про можливість реалізації логічного виведення за схемою A-FATI – *first aggregate, then infer*, відповідно до якої спочатку формується вихідна нечітка множина як об'єднання нечітких висновків за усіма правилами, а потім здійснюється її дефаззифікація. Але автори відкинули цю реалізацію як неперспективну через можливість поглинання нечітких висновків за кількома правилами нечітким висновком за одним правилом з високим ступенем активації. Автори побоювалися, що нечіткі висновки саме за суперечливими правилами потраплять під поглинення, і відповідно внесок суперечливих правил буде анульованим. На наш погляд, ці побоювання надмірні.

У статті [14] пропонується набір процедур синтезу нечітких баз знань із використанням суперечливих правил. Зокрема, пропонуються жадібні методи селекції правил із двох списків кандидатів. Перший список кандидатів складається із несуперечливих правил, отриманих за одним із методів екстракції правил із даних, наприклад, за методом Ванга–Менделя [15]. Цей перший список і утворює початкову базу правил, яку покращують за допомогою правил із другого списку. Другий список кандидатів утворено правилами, які є суперечливими до першого списку правил. Правила з другого списку містять консеквенти з другим або третім рангом за методом Ванга–Менделя. Селекція правил здійснюється ітераційною заміною одного правила з поточної бази на суперечливе до нього правило з другого списку. В оптимізованій базі знань суперечливі правила не з'являються.

В усіх аналізованих статтях використовуються трикутні функції належності термів вхідних змінних, що утворюють нечітке розбиття за Руспіні [16]. За таких умов нечітка база знань має містити правилами з усіма можливими комбінаціями антецедентів. За відсутності хоча б одного правила утворюються зони факторного простору, в яких ступінь активації правил дорівнює нулю, що унеможлиблює результативне логічне виведення. Малі за обсягом бази знань з коректним виведенням на усьому факторному просторі можна отримати за нечітких множин із некомпактним носієм, наприклад, з гаусовими чи дзвоновими функціями належності, як це показано, наприклад, у [8, 10]. Але в цих та інших аналогічних роботах досліджуються узгоджені бази знань. Поза увагою дослідників залишилися компактні бази знань із суперечливими правилами. Саме дослідження впливу суперечливих правил на точність нечітких баз знань із гладкими функціями належності і є метою статті. Вплив суперечливих правил оцінимо за серією обчислювальних експериментів із синтезу нечітких баз знань Мамдані шляхом порівняння кривих навчання нечітких баз з узгодженими та з суперечливими правилами. Під кривою навчання

розуміється залежність точності нечіткої бази знань від кількості правил. Криву навчання нечіткої бази знань побудуємо за методикою з [17]. Дослідження проведемо за реалізації нечіткого виведення за схемою А-FATI.

Нечітка база знань Мамдані

Нечіткою базою знань називається сукупність нечітких правил <Якщо – тоді>, які описують певну предметну область. У базі знань Мамдані антецеденти і консеквенти задано нечіткими множинами. Цю базу знань можна трактувати як розбиття факторного простору на зони з нечіткими межами, в кожній з яких вихідна змінна набуває нечіткого значення. Кількість нечітких зон дорівнює числу правил. Нечітку базу знань Мамдані, що описує залежність $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, представимо так:

$$\text{якщо } (x_1 = \tilde{a}_{1j} \text{ та } x_2 = \tilde{a}_{2j} \text{ та ... та } x_n = \tilde{a}_{nj}), \text{ тоді } y = \tilde{d}_j, \quad j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

де $\tilde{d}_j$ – нечітке значення, яке обирається з терм-множини $\{\tilde{l}_1, \tilde{l}_2, \dots, \tilde{l}_m\}$, кожен елемент якої представлено нечіткою множиною $\tilde{l}_s = \int_{y \in [\underline{y}, \bar{y}]} \mu_{l_s}(y)/y, \quad s = \overline{1, m};$

N – кількість правил у базі знань.

Логічне виведення за нечіткою базою знань (1) здійснюють за процедурою з рис. 1. Ця процедура відповідає схемі А-FATI. Спочатку для поточного вхідного вектора $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ розраховують ступінь виконання антецедента j -го правила:

$$\mu_j(X^*) = \mu_j(x_1^*) \wedge \mu_j(x_2^*) \wedge \dots \wedge \mu_j(x_n^*), \quad j = \overline{1, N},$$

де $\wedge$ – t-норма, яку в алгоритмі Мамдані зазвичай реалізують операцією мінімуму.

Результат логічного виведення запишемо у формі такої бінечіткої множини:

$$\tilde{\tilde{y}}^* = \left(\frac{\mu_{d_1}(X^*)}{\tilde{d}_1}, \frac{\mu_{d_2}(X^*)}{\tilde{d}_2}, \dots, \frac{\mu_{d_N}(X^*)}{\tilde{d}_N} \right), \quad (2)$$

особливістю якої є те, що елементами її носія є нечіткі множини $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_N$. Для перетворення $\tilde{\tilde{y}}^*$ у звичайну нечітку множину виконаємо такі дії. Спочатку представимо результат виведення за j -м правилом бази знань у формі такої нечіткої множини:

$$\tilde{d}_j^* = \text{imp}(\tilde{d}_j, \mu_j(X^*)), \quad j = \overline{1, N}, \quad (3)$$

де imp позначає імплікацію, яку реалізують операцією мінімуму.

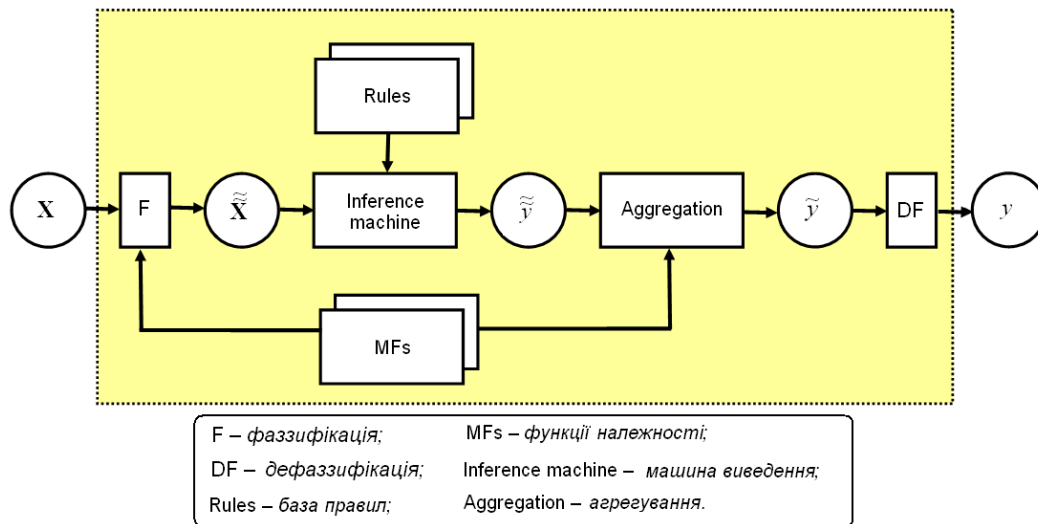


Рисунок 1. Логічне виведення за нечіткою базою знань Мамдані

Геометричною інтерпретацією імплікації є зрізання графіка функції належності $\mu_{d_j}(y)$ по рівню $\mu_j(X^*)$, що запишемо так:

$$\tilde{d}_j^* = \int_{y \in [y^-, y^+]} \min(\mu_j(X^*), \mu_{d_j}(y)) / y.$$

Висновок за усіма правилами знаходимо агрегуванням нечітких множин (3):

$$\tilde{y}^* = \text{agg}(\tilde{d}_1^*, \tilde{d}_2^*, \dots, \tilde{d}_N^*),$$

де agg – агрегування нечітких множин, яке реалізують операцією максимуму. Ілюстрацією цієї формули є рис. 2, де здійснюється агрегування трьох нечітких множин.

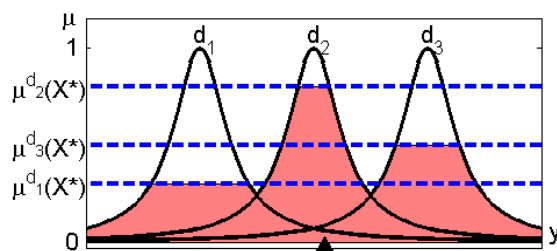


Рисунок 2. Імплікація, агрегування та дефазифікація в алгоритмі Мамдані

Чітке значення виходу y^* , яке відповідає вхідному вектору X^* , визначається через дефазифікацію нечіткої множини $\tilde{y}^*$ за методом центру тяжіння.

У базі знань (1) можуть бути і суперечливі правила з однаковими антецедентами та різними консеквентами, наприклад:

якщо ($x_1 = \text{низький}$ та $x_2 = \text{середній}$), тоді $y = \text{середній}$;

якщо ($x_1 = \text{низький}$ та $x_2 = \text{середній}$), тоді $y = \text{високий}$.

Наявність суперечливих правил не впливає на процедуру логічного виведення. Спільний антецедент пари суперечливих правил продукує 2 нечіткі консеквенти, які так само увійдуть до бінечіткої множин (2), як і у випадку узгоджених правил.

Селекція правил бази знань Мамдані для нечіткої ідентифікації багатофакторних залежностей

Ідентифікація багатофакторних залежностей за допомогою нечіткої бази знань Мамдані здійснюється у 2 етапи. На першому етапі – на етапі структурної ідентифікації формується у деякий спосіб нечітка база знань – обираються терм-множини, задаються їх функції належності та синтезуються правила бази знань. На другому етапі – на етапі параметричної ідентифікації – налаштовуються параметри функцій належності [8, 18]. Наше дослідження стосується першого етапу – етапу структурної ідентифікації, а саме відбору правил до нечіткої бази знань.

Під час формування правил нечіткої бази доцільно забезпечити коректний баланс між компактністю та точністю. Необхідною умовою такого балансу є потрапляння бази знань на парето-фронт у координатах “складність моделі – точність моделі”. Алгоритми точного визначення парето-фронту мають щонайменше експоненціальну складність, тому їх використання доцільне лише за невеликої кількості правил-кандидатів. Для задач малої розмірності можна використовувати повний перебір, як це показано в роботі [17]. Для задач великої розмірності вибір правил можна здійснити за жадібним алгоритмом, який дуже швидко знаходить раціональні розв’язки – формує більш-менш прийнятний набір правил. Для покращення розв’язків застосовують пряму та зворотні схеми жадібного алгоритму – за прямою схемою починають із порожньої бази знань і ітераційно додають по одному найкращому правилу. За зворотної схеми починають із повною базою знань, з якої на кожному кроці вилучають найгірше правило.

Для дослідження ефекту від застосування суперечливих правил проведемо серію експериментів. У кожному експерименті для деякої залежності експертно сформуємо множину правил-кандидатів. Із цієї множини правил-кандидатів синтезуємо нечіткі бази знань різного обсягу і оцінимо їх точність за середньо-квадратичною нев’язкою *RMSE*. За цими даними побудуємо криві навчання у формі залежності *RMSE* від кількості правил. Криві навчання побудуємо для двох випадків – для баз знань з узгодженими правилами та із суперечливими правилами.

Експериментальні дослідження

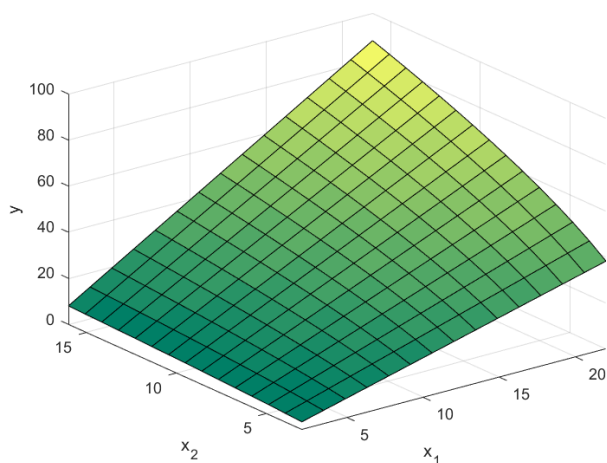
Експерименти проведемо на трьох синтетичних наборах даних та на даних задачі про паливну ефективність автомобіля Auto-MPG. Синтетичні набори даних синтезуємо для таких еталонних двофакторних залежностей:

$$y = x_1 \sqrt{x_2}, \quad x_1 \in [2, 22], \quad x_2 \in [3, 16], \quad (4)$$

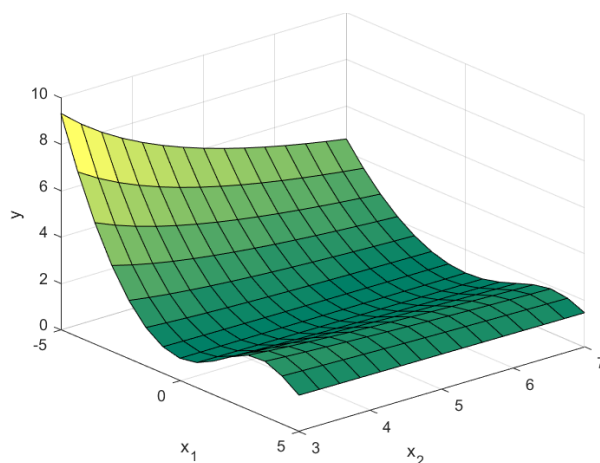
$$y = \frac{x_1^2 + x_2}{0.1e^{x_1} + x_2}, \quad x_1 \in [-5, 5], \quad x_2 \in [3, 7], \quad (5)$$

$$y = x_1^2 - x_2^3 \tan(0.1x_1), \quad x_1 \in [-2, 3], \quad x_2 \in [1, 5]. \quad (6)$$

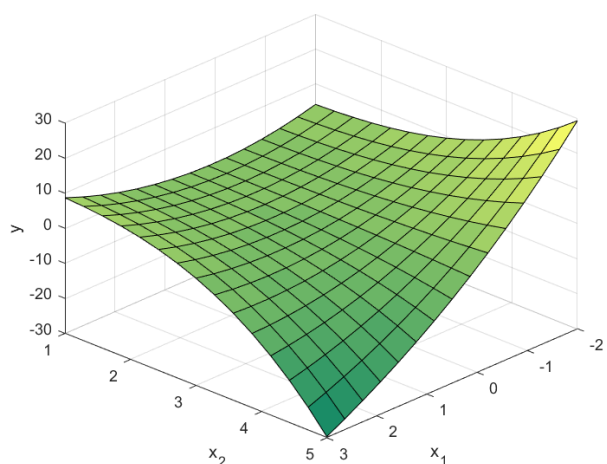
У задачі про паливну ефективність врахуємо 2 такі фактори: x_1 – маса автомобіля та x_2 – тривалість розгону до швидкості 60 миль за годину. Вихідною змінною є паливна ефективність (y) – відстань у милях, яку долає автомобіль на одному галоні палива. Поверхні еталонних залежностей наведено на рис. 3.



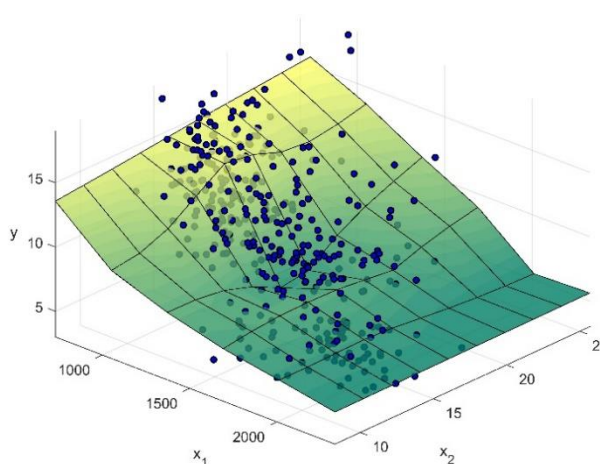
залежність (4)



залежність (5)



залежність (6)



залежність Auto MPG

Рисунок 3. Поверхні еталонних залежностей

Експерименти проведемо за такою методикою.

1. Спостерігаючи за тривимірним графіком еталонної залежності, сформуємо повну базу несуперечливих нечітких правил-кандидатів.

2. Доповнимо сформовану базу знань Мамдані суперечливими правилами – для правил із крайнім термом у консеквенті додамо одне суперечливе правило з сусіднім термом, а для інших – по 2 суперечливі правила з сусідніми термами. Найменше кандидатів виходить, коли у списку несуперечливих правил кожен некрайній терм фігурує в консеквенті лише одного правила. Найбільше кандидатів виходить, коли в списку несуперечливих правил кожен крайній терм фігурує в консеквенті лише одного правила.

3. Згенеруємо тестову вибірку зі 100 точок з використанням аналітичних залежностей (4)–(6); для задачі Auto MPG для тестування використаємо усі дані з датасету.

4. Побудуємо криві навчання у формі залежності $RMSE$ від кількості правил (N), використовуючи жадібний алгоритм відбору правил нечіткої бази знань. Експерименти проведемо для $N = \overline{1, N_{\max}}$, де $N_{\max}$ – максимальна кількість несуперечливих правил.

Відбір правил здійснимо окремо за кожним списком за двома жадібними алгоритмами – адитивним та субтрактивним. Адитивний жадібний алгоритм стартує з порожньої бази знань і на кожній ітерації додає одне правило, яке найсильніше зменшує нев'язку $RMSE$. У поточній базі знань до кожного правила може бути додано лише одне суперечливе правило. Субтрактивний жадібний алгоритм розпочинає з повної бази знань, і на кожній ітерації вилучає те правило, без якого $RMSE$ зростає на мінімально можливий рівень. Результуючу криву навчання визначаємо за мінімальним значенням $RMSE$ адитивної та субтрактивної кривих навчання.

У випадку суперечливих правил-кандидатів застосовуємо таке обмеження: в нечіткій базі знань для кожного правила може бути лише один суперечливий аналог. У адитивному алгоритмі це обмеження враховується ітераційним вилученням зайвих суперечливих правил-кандидатів. У випадку застосування субтрактивного жадібного алгоритму до початку його роботи нечітку базу очищають від трійок суперечливих правил, залишаючи до кожного правила лише одне суперечливе. Очистка також здійснюється за жадібним підходом.

Списки узгоджених правил для аналізованих залежностей наведено в табл. 1–4. Для лінгвістичного опису вхідних змінних у залежності (4) застосуємо 4 терми, а для вихідної змінної – 5. Відповідно максимальна кількість узгоджених нечітких правил становить $N_{\max} = 4 \cdot 4 = 16$. Додаючи до них допустимі суперечливі правила, отримуємо, що кількість правил-кандидатів становить $C_{\max} = 43$. Для лінгвістичного опису змінних x_1 , x_2 та y в залежності (6) застосуємо 4, 3 та 5 термів відповідно. Для цієї залежності $N_{\max} = 4 \cdot 3 = 12$, а $C_{\max} = 29$. Для лінгвістичного опису змінних x_1 , x_2 та y в залежності (6) застосуємо 4, 5 та 4 терми відповідно. Для цієї залежності $N_{\max} = 4 \cdot 5 = 20$, а $C_{\max} = 58$. Для лінгвістичного опису змінних x_1 , x_2 та y в задачі Auto MPG застосуємо 4, 3 та 4 терми відповідно. Для цієї залежності $N_{\max} = 4 \cdot 3 = 12$, а $C_{\max} = 31$. Функції

належності нечітких термів наведено на рис. 4–7. В усіх базах знань використовуються гаусові функції належності.

Таблиця 1. Перелік узгоджених правил-кандидатів для нечіткого моделювання залежності (4)

№	Якщо		Тоді
	x_1	x_2	y
1	Низький	Низький	Низький
2	Низький	Середній	Низький
3	Низький	Високий	Низький
4	Низький	Дуже високий	Низький
5	Середній	Низький	Нижче середнього
6	Середній	Середній	Нижче середнього
7	Середній	Високий	Нижче середнього
8	Середній	Дуже високий	Нижче середнього
9	Високий	Низький	Нижче середнього
10	Високий	Середній	Середній
11	Високий	Високий	Середній
12	Високий	Дуже високий	Середній
13	Дуже високий	Низький	Середній
14	Дуже високий	Середній	Середній
15	Дуже високий	Високий	Вище середнього
16	Дуже високий	Дуже високий	Високий

Таблиця 2. Перелік узгоджених правил-кандидатів для нечіткого моделювання залежності (5)

№	Якщо		Тоді
	x_1	x_2	y
1	Низький	Низький	Високий
2	Низький	Середній	Вище середнього
3	Низький	Високий	Середній
4	Середній	Низький	Низький
5	Середній	Середній	Низький
6	Середній	Високий	Низький
7	Високий	Низький	Низький
8	Високий	Середній	Низький
9	Високий	Високий	Низький
10	Вище середнього	Низький	Нижче середнього
11	Вище середнього	Середній	Нижче середнього
12	Вище середнього	Високий	Нижче середнього

Таблиця 3. Перелік узгоджених правил-кандидатів для нечіткого моделювання залежності (6)

№	Якщо		Тоді
	x_1	x_2	y
1	Низький	Низький	Середній
2	Низький	Нижче середнього	Вище середнього
3	Низький	Середній	Вище середнього
4	Низький	Вище середнього	Вище середнього
5	Низький	Високий	Високий
6	Середній	Низький	Середній
7	Середній	Нижче середнього	Середній
8	Середній	Середній	Середній
9	Середній	Вище середнього	Середній
10	Середній	Високий	Середній
11	Високий	Низький	Середній
12	Високий	Нижче середнього	Середній
13	Високий	Середній	Середній
14	Високий	Вище середнього	Середній
15	Високий	Високий	Низький
16	Дуже високий	Низький	Вище середнього
17	Дуже високий	Нижче середнього	Вище середнього
18	Дуже високий	Середній	Середній
19	Дуже високий	Вище середнього	Середній
20	Дуже високий	Високий	Низький

Таблиця 4. Перелік узгоджених правил-кандидатів для нечіткого моделювання залежності Auto MPG

№	Якщо		Тоді
	x_1	x_2	y
1	Легкий	Швидкий	Середня
2	Легкий	Середній	Висока
3	Легкий	Повільний	Висока
4	Легше середнього	Швидкий	Нижче середньої
5	Легше середнього	Середній	Середня
6	Легше середнього	Повільний	Середня
7	Середній	Швидкий	Нижче середньої
8	Середній	Середній	Нижче середньої
9	Середній	Повільний	Середня
10	Важкий	Швидкий	Низька
11	Важкий	Середній	Низька
12	Важкий	Повільний	Низька

Експерименти з суперечливими правилами проведемо до повного наповнення бази знань. Повна база знань матиме N_{max} пар суперечливих правил.

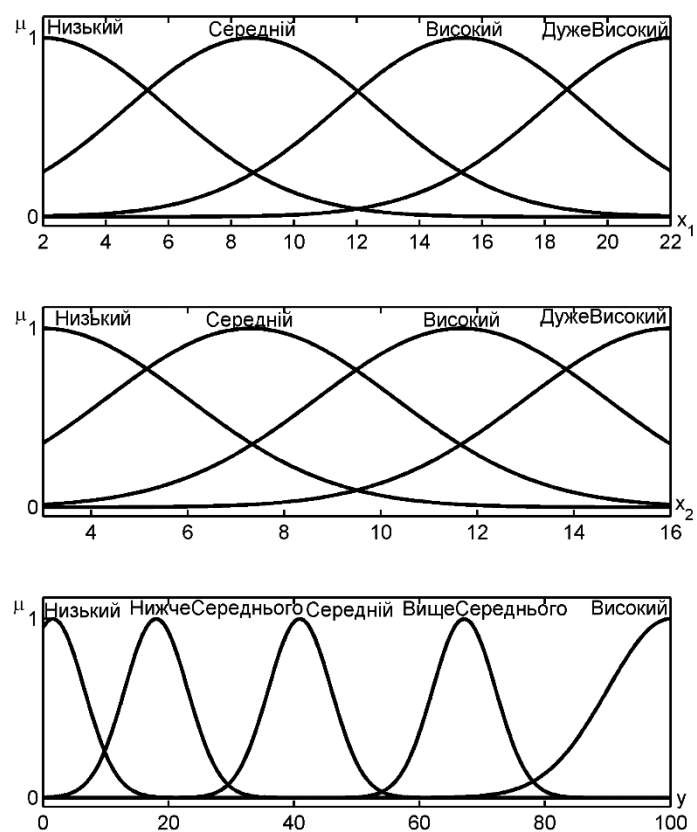


Рисунок 4. Функції належності залежності (4)

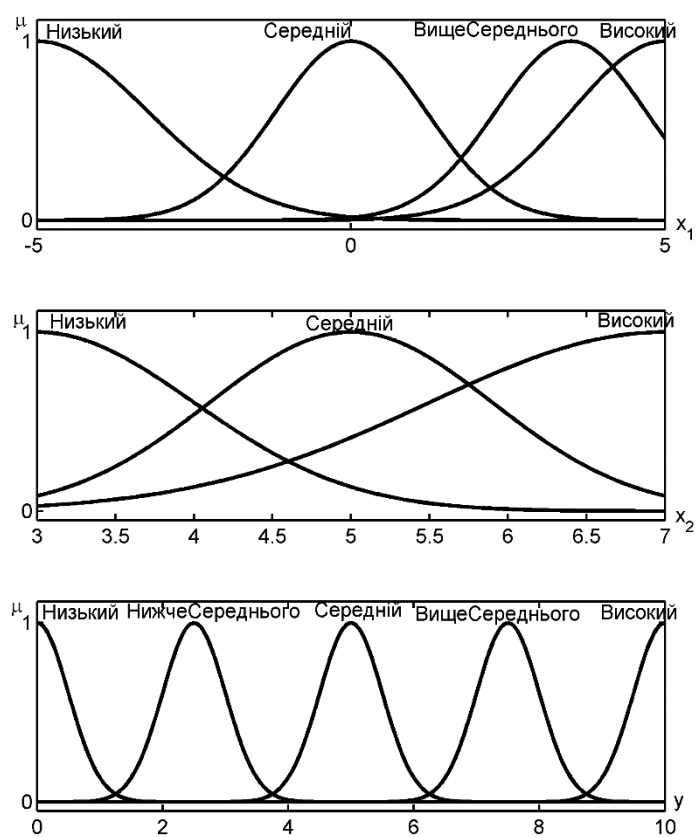


Рисунок 5. Функції належності залежності (5)

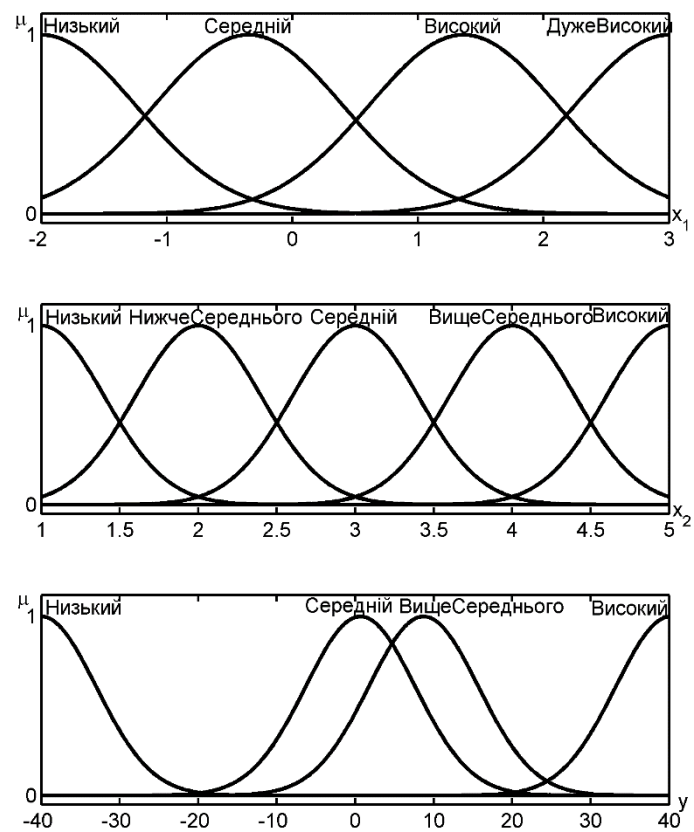


Рисунок 6. Функції належності залежності (6)

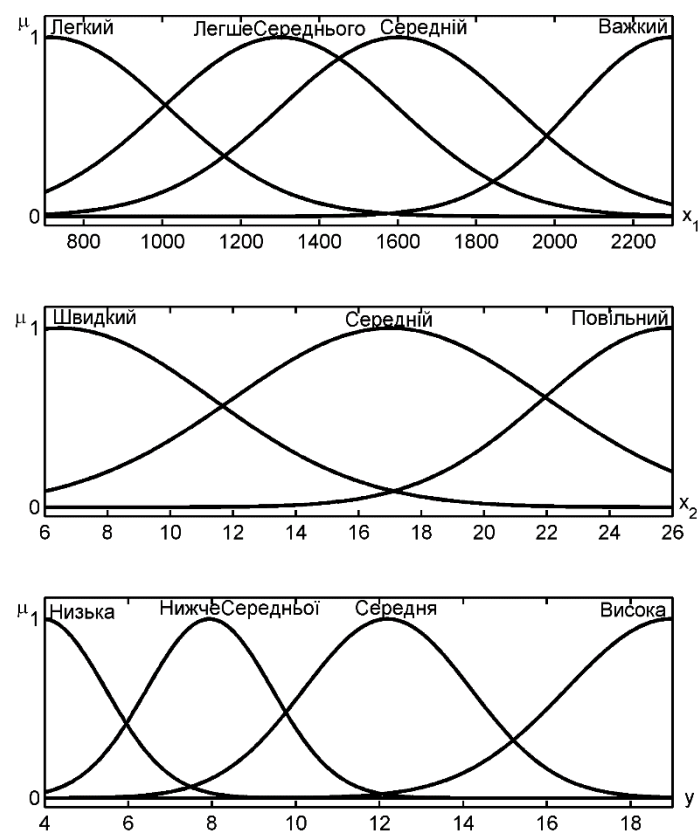


Рисунок 7. Функції належності залежності Auto MPG

Результати експериментів наведено в табл. 5. У ній використовуються такі нові позначення:

N_{DC} – кількість пар суперечливих правил у базі знань;

Typical best – найточніша база знань без суперечливих правил;

The same with DC – найточніша база знань із суперечливими правилами, з таким же обсягом, як і *Typical best*;

Short with DC – найточніша база знань із суперечливими правилами, обсяг якої не перевищує N_{max} ;

Best with DC – найточніша база знань із суперечливими правилами.

Таблиця 5. Результати експериментів

Залежність	Нечітка база знань	RMSE	N	N_{DC}	N_{max}	C_{max}
(4)	<i>Typical best</i>	4.3	8	0	16	43
	<i>The same with DC</i>	3.71	8	0		
	<i>Short with DC</i>	2.65	15	4		
	<i>Best with DC</i>	2.65	15	4		
(5)	<i>Typical</i>	1.06	3	0	12	29
	<i>The same with DC</i>	0.95	3	1		
	<i>Short with DC</i>	0.846	8	1		
	<i>Best with DC</i>	0.846	8	1		
(6)	<i>Typical</i>	3.29	11	0	20	58
	<i>The same with DC</i>	3.47	11	2		
	<i>Short with DC</i>	2.41	20	5		
	<i>Best with DC</i>	2.25	40	20		
Auto MPG	<i>Typical</i>	2.05	8	0	12	31
	<i>The same with DC</i>	1.83	8	3		
	<i>Short with DC</i>	1.83	11	5		
	<i>Best with DC</i>	1.83	11	5		

В усіх експериментах нечіткі бази знань із суперечливими правилами кращі за точністю, ніж звичайні нечіткі бази знань. Лише для залежності (6) обсяг найкращої бази знань з суперечливими правилами – *Best with DC* перевищує N_{max} . В інших випадках обсяг *Best with DC* не перевищує N_{max} – максимальну кількість несуперечливих прави. В усіх експериментах *Short with DC* – нечіткі бази знань обсягом меншим за N_{max} – виявилися кращими за аналогічні бази знань із суперечливими правилами. Для усіх експериментів покращення точності є суттєвим.

В експериментах з узгодженими бази знань виявилось, що кількість правил у найточніших із них становить від 25% до 67% від N_{max} . Суперечливі нечіткі бази знань (*Short with DC*) правил містять більше – від 75% до 100% від N_{max} . Якщо порівнювати найкращі нечіткі бази знань однакового обсягу – *Typical best* та *The same with DC*, – то виявляється, що лише для залежності (6) з суперечливими правилами вийшло гірше.

Криві навчання подано на рис. 8–11. За баз знань великого обсягу з кількістю правил, близькою до N_{max} , криві навчання суперечливих баз знань явно кращі. Для баз знань

середнього обсягу в 3 випадках із 4 перевага у суперечливих баз знань є відчутною. Для баз знань малого обсягу криві навчання приблизно однакові, що цілком очікувано.

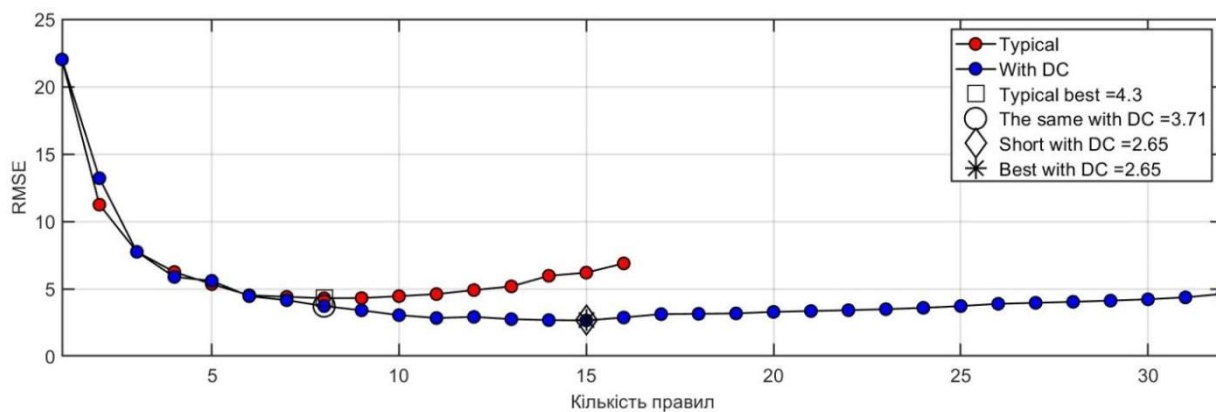


Рисунок 8. Криві навчання для залежності (4)

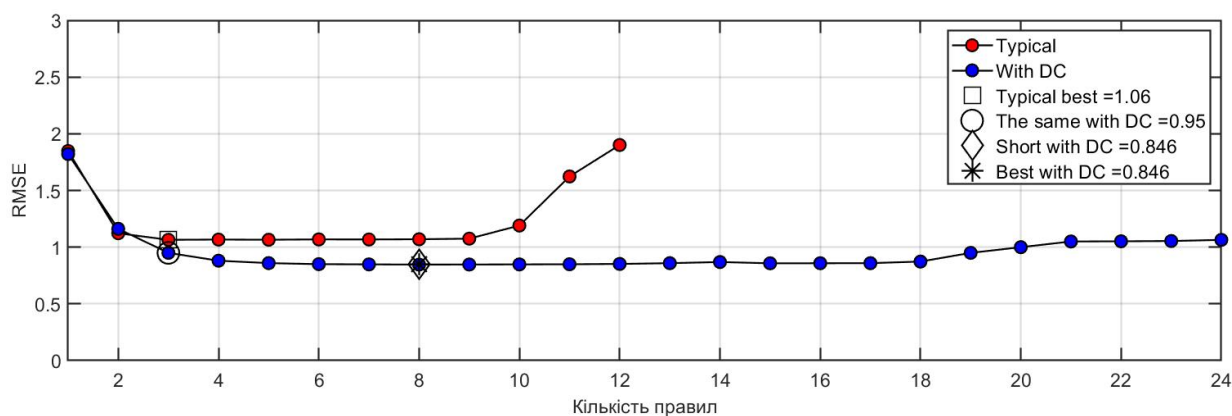


Рисунок 9. Криві навчання залежності (5)

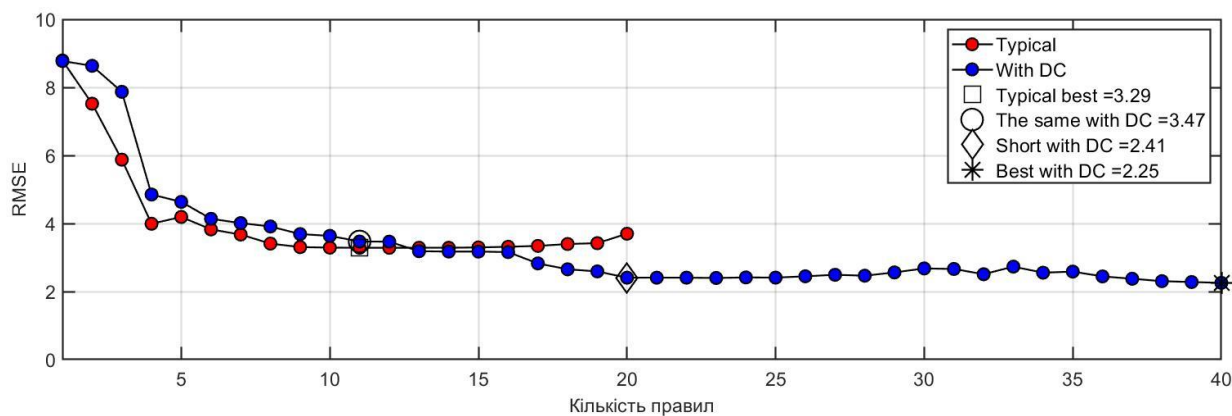


Рисунок 10. Криві навчання залежності (6)

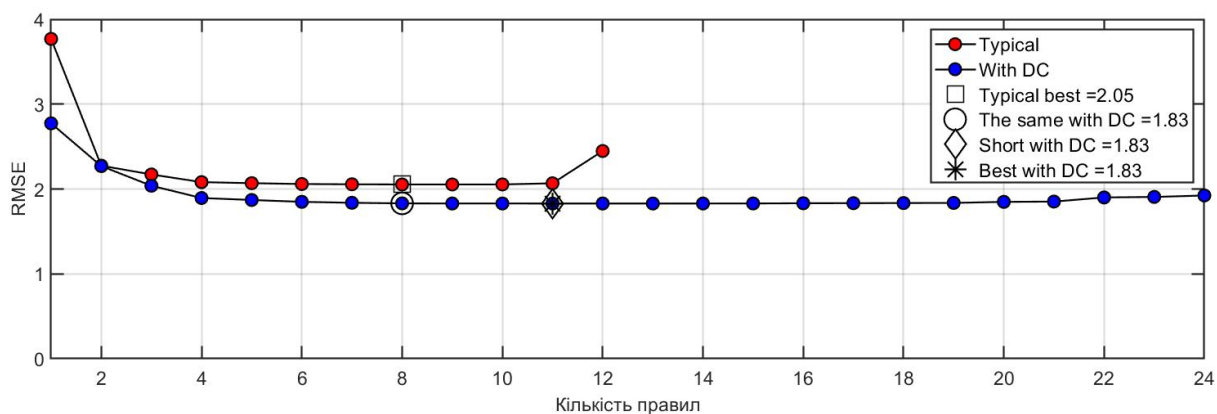


Рисунок 11. Криві навчання для задачі Auto MPG

Для порівняння, на рис. 12 виведено кілька поверхонь у випадку моделювання залежності (6) базами знань з табл. 5. Із цих рисунків видно, що нечіткі бази знань із суперечливими правилами не лише мають менше $RMSE$, але і візуально краще відновлюють залежність.

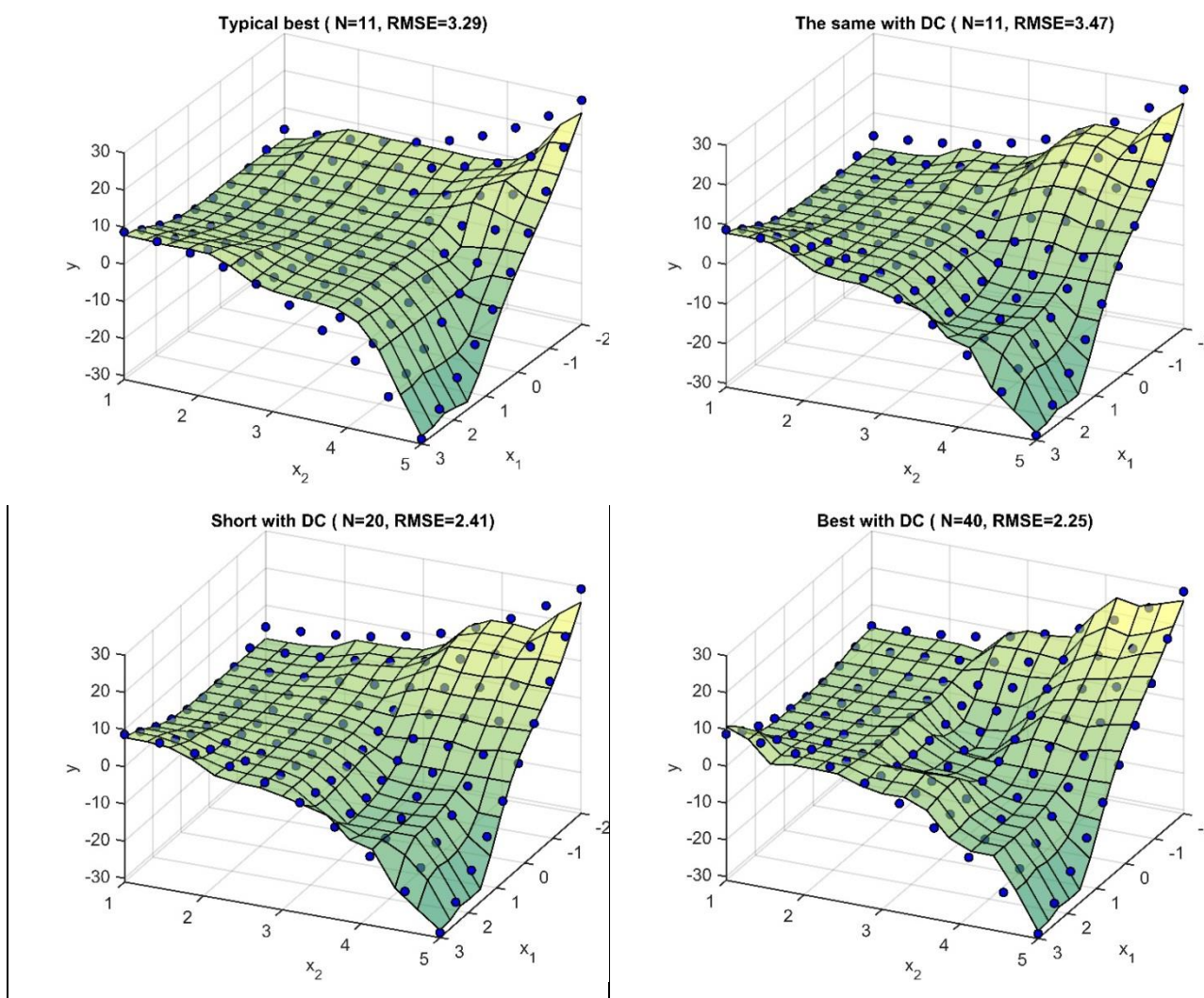


Рисунок 12. Поверхні «входи – вихід» баз знань, якими моделюється залежність (6)

Висновки

Експериментально встановлено, що застосування суперечливих правил Мамдані через підвищення роздільної здатності лінгвістичної опису залежностей забезпечує суттєву кращу точність. Це дає змогу на етапі структурної ідентифікації досягти кращої точності нечіткої бази знань за меншої кількості правил. Також встановлено, що за суперечливих правил логічне виведення можна коректно та результативно реалізувати за схемою А-FATI, тоді як у попередніх дослідженнях використовувалася спрощена схема В-FITA.

Подальші дослідження варто спрямувати на перевірку ефекту від використання суперечливих правил під час параметричної ідентифікації нелінійних залежностей за допомогою баз знань Мамдані.

Література

1. Varshney, A. K., & Torra, V. (2023). Literature review of the recent trends and applications in various fuzzy rule-based systems. *International Journal of Fuzzy Systems*, 25(6), 2163–2186. DOI: 10.1007/s40815-023-01534-w.
2. Tavana, M., & Hajipour, V. (2020). A practical review and taxonomy of fuzzy expert systems: methods and applications. *Benchmarking*. Emerald Group Holdings Ltd. DOI: 10.1108/BIJ-04-2019-0178.
3. Cordon, O. (2011). A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems. *International Journal of Approximate Reasoning*. DOI: 10.1016/j.ijar.2011.03.004.
4. Ishibuchi, H., Nakashima, T., Murata, T. (2001). Three-objective genetics-based machine learning for linguistic rule extraction. *Information Sciences*, 136(1–4), 109–133. DOI: 10.1016/S0020-0255(01)00144-X.
5. Guillaume, S., Charnomordic, B. (2010). Interpretable fuzzy inference systems for cooperation of expert knowledge and data in agricultural applications using FisPro. *2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, WCCI 2010*. DOI: 10.1109/FUZZY.2010.5584673.
6. Ojha, V., Abraham, A., Snášel, V. (2019). Heuristic design of fuzzy inference systems: A review of three decades of research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85, 845–864. DOI: 10.1016/j.engappai.2019.08.010.
7. Shtovba, S., Shtovba, O., Pankevich, O. (2012). Accuracy and compactness criteria for evaluating the quality of fuzzy knowledge bases in identification problems. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 4, URL: <https://works.vntu.edu.ua/index.php/works/article/view/356>
8. Shtovba, S., Mazurenko, V., Petrychko, M. (2020). Information technology for extracting the accurate, compact and interpretable Mamdani-type rule base. *CEUR Workshop Proceedings*, 2711 “Proceeding of the XI Conference on Information Control Systems & Technologies”, 386–400.

9. Gacto, M. J., Alcalá, R., & Herrera, F. (2011). Interpretability of linguistic fuzzy rule-based systems: An overview of interpretability measures. *Information Sciences*, 181(20), 4340–4360. DOI: 10.1016/j.ins.2011.02.021.
10. Shtovba, S. D. (2007). Ensuring accuracy and transparency of Mamdani fuzzy model in learning by experimental data. *Journal of Automation and Information Sciences*, 39(8), 39–52. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v39.i8.50.
11. Nozaki, K., Ishibuchi, H., & Tanaka, H. (1997). A simple but powerful heuristic method for generating fuzzy rules from numerical data. *Fuzzy Sets and Systems*, 86(3), 251–270. DOI: 10.1016/0165-0114(95)00413-0.
12. Cordon, O., & Herrera, F. (2000). A proposal for improving the accuracy of linguistic modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(3), 335–344. DOI: 10.1109/91.855921.
13. Alcalá, R., Casillas, J., Cordon, O., & Herrera, F. (2003). Linguistic modeling with weighted double-consequent fuzzy rules based on cooperative coevolutionary learning. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 10(4), 343–355. DOI: 10.3233/ica-2003-10405.
14. Dutu, L. C., Mauris, G., & Bolon, P. (2018). A fast and accurate rule-base generation method for Mamdani fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 26(2), 715–733. DOI: 10.1109/TFUZZ.2017.2688349.
15. Wang, L. X., & Mendel, J. M. (1992). Generating fuzzy rules by learning from examples. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 22(6), 1414–1427. DOI: 10.1109/21.199466.
16. Ruspini, E. H. (1969). A new approach to clustering. *Information and Control*, 15(1), 22–32. DOI: 10.1016/S0019-9958(69)90591-9.
17. Штовба, С. Д., Мазуренко, В. В. (2014). *Інтелектуальні технології ідентифікації залежностей. Лабораторний практикум: електронний навчальний посібник*. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 113 с.
18. Rotshtein, A., Rakytyanska, H. (2012). Fuzzy evidence in identification, forecasting and diagnosis. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Vol. 275. Springer, Heidelberg, 313 p.

Рукопис отримано – 12/06/2023; прийнято до публікації – 26/06/2023.

© Донецький національний університет імені Василя Стуса, 2023

© Сергій Штовба, 2023

© Роман Резнік, 2023

Improving the accuracy of the Mamdani fuzzy rule base with double-consequent rules

Serhiy Shtovba, Roman Reznik

Abstract

The paper considers the problem of modeling the multi-factor dependencies with a continuous output using fuzzy rule bases. One of the main competitive advantages of fuzzy modelling is the interpretability of the fuzzy rule base – it is quite easy for a user who is far from mathematical methods to understand what makes up a particular conclusion. For fuzzy modelling of dependency with continuous output, both Mamdani and Sugeno rule bases are most commonly used. The Sugeno rule base is more accurate but has low interpretability. Mamdani rule bases have high interpretability but low accuracy. It is problematic to increase the interpretability of Sugeno rule bases because this property is due to the rule format. The task of improving the accuracy of the Mamdani rule base is quite easy to formalize, so we can try to solve it in some algorithmic way. The goal of this article is to improve the accuracy of the Mamdani rule base. The way to improve the accuracy of the Mamdani rule base is to use double-consequent rules. A double-consequent rule is equivalent to two ordinal rules with the same antecedents and different consequents. The computational experiments carried out have shown that the use of double consequent rules by increasing the resolution of the linguistic description of the dependency provides better accuracy. The experiments were performed on three synthetic datasets and one real Auto MPG dataset. The selection of rules is done by a greedy algorithm. The use of double-consequent rules allows for to achievement of better accuracy and compactness of the model during the structural stage of fuzzy identification. It was also found that fuzzy inference on double-consequent rules can be implemented correctly and efficiently using the A-FATI scheme, while in previous studies a simplified B-FITA scheme was used.

Keywords: fuzzy inference, Mamdani-type fuzzy rules, double-consequent rule, rule selection, greedy algorithm, accuracy.

References

1. Varshney, A. K., & Torra, V. (2023). Literature review of the recent trends and applications in various fuzzy rule-based systems. *International Journal of Fuzzy Systems*, 25(6), 2163–2186. DOI: 10.1007/s40815-023-01534-w.
2. Tavana, M., & Hajipour, V. (2020). A practical review and taxonomy of fuzzy expert systems: methods and applications. *Benchmarking*. Emerald Group Holdings Ltd. DOI: 10.1108/BIJ-04-2019-0178.
3. Cordón, O. (2011). A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems. *International Journal of Approximate Reasoning*. DOI: 10.1016/j.ijar.2011.03.004.
4. Ishibuchi, H., Nakashima, T., Murata, T. (2001). Three-objective genetics-based machine learning for linguistic rule extraction. *Information Sciences*, 136(1–4), 109–133. DOI: 10.1016/S0020-0255(01)00144-X.
5. Guillaume, S., Charnomordic, B. (2010). Interpretable fuzzy inference systems for cooperation of expert knowledge and data in agricultural applications using FisPro. *2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, WCCI 2010*. DOI: 10.1109/FUZZY.2010.5584673.
6. Ojha, V., Abraham, A., Snášel, V. (2019). Heuristic design of fuzzy inference systems: A review of three decades of research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85, 845–864. DOI: 10.1016/j.engappai.2019.08.010.
7. Shtovba, S., Shtovba, O., Pankevich, O. (2012). Accuracy and compactness criteria for evaluating the quality of fuzzy knowledge bases in identification problems. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 4, URL: <https://works.vntu.edu.ua/index.php/works/article/view/356>
8. Shtovba, S., Mazurenko, V., Petrychko, M. (2020). Information technology for extracting the accurate, compact and interpretable Mamdani-type rule base. *CEUR Workshop Proceedings*, 2711 “Proceeding of the XI Conference on Information Control Systems & Technologies”, 386–400.

9. Gacto, M. J., Alcalá, R., & Herrera, F. (2011). Interpretability of linguistic fuzzy rule-based systems: An overview of interpretability measures. *Information Sciences*, 181(20), 4340–4360. DOI: 10.1016/j.ins.2011.02.021.
10. Shtovba, S. D. (2007). Ensuring accuracy and transparency of Mamdani fuzzy model in learning by experimental data. *Journal of Automation and Information Sciences*, 39(8), 39–52. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v39.i8.50.
11. Nozaki, K., Ishibuchi, H., & Tanaka, H. (1997). A simple but powerful heuristic method for generating fuzzy rules from numerical data. *Fuzzy Sets and Systems*, 86(3), 251–270. DOI: 10.1016/0165-0114(95)00413-0.
12. Cordón, O., & Herrera, F. (2000). A proposal for improving the accuracy of linguistic modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(3), 335–344. DOI: 10.1109/91.855921.
13. Alcalá, R., Casillas, J., Cordón, O., & Herrera, F. (2003). Linguistic modeling with weighted double-consequent fuzzy rules based on cooperative coevolutionary learning. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 10(4), 343–355. DOI: 10.3233/ica-2003-10405.
14. Dutu, L. C., Mauris, G., & Bolon, P. (2018). A fast and accurate rule-base generation method for Mamdani fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 26(2), 715–733. DOI: 10.1109/TFUZZ.2017.2688349.
15. Wang, L. X., & Mendel, J. M. (1992). Generating fuzzy rules by learning from examples. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 22(6), 1414–1427. DOI: 10.1109/21.199466.
16. Ruspini, E. H. (1969). A new approach to clustering. *Information and Control*, 15(1), 22–32. DOI: 10.1016/S0019-9958(69)90591-9.
17. Shtovba, S. D., Mazurenko, V. V. (2014). *Intelektualni tekhnolohii identyfikatsii zalezhnostei. Laboratornyi praktykum: elektronnyi navchalnyi posibnyk*. Vinnytsia, Vinnytsia National Technical University, 113 p. [In Ukrainian].
18. Rotshtein, A., Rakytyanska, H. (2012). Fuzzy evidence in identification, forecasting and diagnosis. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Vol. 275. Springer, Heidelberg, 313 p.

Нейромережеві методи автоматичного визначення пози людини, яка виконує вправи з художньої гімнастики

Анастасія Нескородєва

ORCID: 0000-0002-8591-085X

a.neskorodieva@donnu.edu.ua

Донецький національний університет імені Василя Стуса

Ключові слова:

трансформер,
класифікація,
художня гімнастика,
персептрон,
розпізнавання пози,
відеопотік.

У художній гімнастиці оцінювання виступів спортсменок є складним суб'єктивним завданням через необхідність врахувати технічні характеристики динамічних вправ, та естетичну досконалість окремих сцен і композиції загалом. У статті представлено результати дослідження, яке спрямоване на розробку програми автоматичного визначення поз спортсменок під час виконання вправ із художньої гімнастики. Розробці моделі передуює вивчення поточних правил підрахунку балів з урахуванням складності рухів спортсменки. Для дослідження створено спеціальний набір даних із визначення поз гімнасток, який включає оцінювані елементи та неоцінювані позиції. Набір даних містить стоп-кадри з відео змагань та фотозвітів. Для визначення поз використовуються 2 методи комп'ютерного зору: MediaPipe Pose та ViTPose. MediaPipe Pose завдяки високій продуктивності дає змогу у реальному часі визначати 33 3D-орієнтири. ViTPose забезпечує високу точність завдяки використанню зорових трансформерів. Здійснено порівняльний аналіз цих двох методів із виділенням сильних сторін та обмежень кожної з них. Для класифікації спортивних елементів на основі розпізнаних поз розроблено модель типу "багатошаровий персептрон". Навчання моделі здійснено за зворотним розповсюдженням помилки на основі методу градієнтного спуску Адама. Після навчання моделі на авторському наборі даних досягається висока точність класифікації поз гімнасток. Проведене дослідження є інтелектуальним складником майбутньої системи автоматичного визначення в реальному часі пози спортсменки для більш достовірного та оперативного оцінювання виступів у художній гімнастиці. Запропонований підхід до поєднання методів комп'ютерного зору та машинного навчання може бути поширений для вдосконалення спортивного аналізу і в інших споріднених дисциплінах.

DOI: 10.31558/2786-9482.2023.1.4

Вступ

Спорт завжди був важливою частиною людського життя та культури, слугуючи засобом розваги, змагання та фізичних навантажень. Останніми роками галузь спортивного аналізу стрімко розвивається завдяки прогресу в технологіях і аналітиці даних. Відеоаналіз, зокрема, став важливим інструментом для тренерів, спортсменів і аналітиків для отримання інформації щодо дій окремих гравців та всієї команди.

Художня гімнастика – це вид спорту, який поєднує в собі елементи балету, танцю та гімнастики. В художній гімнастиці спортсмени виконують вправи за допомогою ручних снарядів, як-от скакалка, м'яч, обруч, булави або стрічка. Це красивий і елегантний вид спорту, який вимагає сили, гнучкості, координації та музичності. Однак оцінювання виступів з художньої гімнастики є складним завданням з високим впливом суб'єктивності.

Одним з основних факторів, який впливає на достовірність оцінювання художньої гімнастики, є високий ступінь складності цього виду спорту. Виступи гімнасток можуть включати заплутані та складні рухи, які потребують великої вправності та точності. Спортсмени повинні виконувати різноманітні рухи тіла – стрибки, рівноваги та кидки з одночасним маніпулюванням снарядом. Складність програм може сильно відрізнятися для спортсменів, і судді, виставляючи бали, повинні враховувати рівень складності.

Специфікою художньої гімнастики є суб'єктивний характер цього виду спорту. Естетична привабливість художньої гімнастики відіграє значну роль у системі підрахунку балів. Спортсменів оцінюють не лише за технічними навичками, а й за граціозністю, художньою інтерпретацією та експресією. Судді під час оцінювання враховують музику, хореографію, костюм та обладнання. Ці суб'єктивні фактори ускладнюють стандартизацію системи підрахунку балів і можуть призвести до розбіжностей між оцінками різних суддів.

Швидкість виконання вправ і плавність переходу між елементами може ускладнити суддям можливість зафіксувати кожен рух і деталь у режимі реального часу. Відеоповтори можуть допомогти суддям зробити більш точні оцінки, але це сповільнює темп змагань. Тому створення програми для оцінювання виступів спортсменів є актуальним. Передумовою такої автоматизації є побудова нейромережевого методу для автоматичного визначення поз людини, яка виконує вправи з художньої гімнастики. Саме це і є метою дослідження.

Постановка завдання

За сучасними правилами під час виступу художня гімнастка рівня майстер спорту має право виконати максимум 9 елементів, якими може бути стрибок, обертання та рівновага. У правилах Міжнародної федерації гімнастики (франц. *Fédération Internationale de Gymnastique*, скор. *FIG*) [1] описано, які саме елементи і у який спосіб дозволено виконувати, а також зазначена кількість балів, яку отримає спортсменка за правильне виконання кожного елемента. Змагання під егідою FIG, наприклад, чемпіонати Європи, Африки, Північної Америки, Кубок Світу, олімпіади проходять за правилами FIG [2]. Особливістю художньої гімнастики є те, що раз на 4 роки після кожної літньої олімпіади FIG змінює правила оцінювання виступів спортсменок. У правила додаються нові елементи, відбувається переоцінка наявних елементів та вимог до того, що гімнастка повинна виконати за півторихвилинний виступ. Під час останньої зміни також була додана нова бригада суддів, яка оцінює технічні помилки за допомогою зниження балів та визначає загальне зниження балів незалежно та без консультації з іншими суддями.

У роботі [3] наведено алгоритм присвоєння суддівських оцінок рухам художньої гімнастики. У статті [4] представлена нова гібридна динамічно-статична мережа уваги з урахуванням контексту для оцінювання дій у довгих відео. Але результати цих досліджень не вирішують проблему оцінювання за зміни правил. У статті [5] досліджено проблеми оцінювання пози людини та класифікації діяльності за допомогою підходу глибокого

навчання. Оцінювання пози людини є однією із складних задач комп'ютерного зору, яка базується на детектуванні та аналізі положень суглобів. Наявні набори даних для вивчення поз виявилися недостатньо повними з погляду різноманітності поз, оклюзії об'єктів і думок. Такий набір даних дає змогу зробити процес анотації пози відносно простим, але і обмежує застосування навчених моделей на практиці. У статті [6] автори досліджують наявні набори даних для класифікації поз людини та пропонують новий набір даних. Для більшої різноманітності поз людини автори пропонують концепцію дрібнозернистої ієрархічної класифікації поз та пропонують набір даних Yoga-82 для розпізнавання поз йоги з використанням 82 класів. Yoga-82 складається зі складних поз, де точні анотації можуть бути неможливими. Щоб вирішити цю проблему, автори надають ієрархічні мітки для поз йоги на основі конфігурації тіла пози. Набір даних містить трьохрівневу ієрархію, включно з положеннями тіла, варіаціями положень тіла та фактичними назвами поз. У статті зазначена точність класифікації поз з Yoga-82 за умови використання згорткових нейронних мереж. Також представлено кілька ієрархічних варіантів DenseNet для використання ієрархічних міток.

Внаслідок аналізу сучасних релевантних досліджень встановлено, що класичні набори даних для визначення поз людини не підходять для випадків зі складним положенням людини у просторі, якими є елементи у художній гімнастиці. Тому вирішено розробити власний набір даних для визначення поз людини, яка виконує вправи з художньої гімнастики.

Розробка власного набору даних

Набір даних для навчання моделі класифікації спортивних елементів складається з тестового та тренувального наборів. Класами рішень обрано 5 найбільш популярних за виконанням елементів та 2 додаткові класи, які характеризують найчастіших положення спортсменок і не є оцінюваними елементами. На рис. 1 зображено 5 оцінюваних елементів, з першого до п'ятого класу, та 2 неоцінювані положення – шостий та сьомий класи. Приклади виконання елементів взяті з офіційних правил FIG.

У наборі даних усі зображення індивідуальних спортсменок у повний зріст займають не менше 50% довжини зображення. Усі частини тіла потрапляють на зображення. Мінімальна якість усіх зображень є достатньою для точного визначення положення скелета спортсмена; вона становить 240–360 пікселів на дюйм.

Для формування набору даних використано такі ресурси:

- стоп-кадри виконання окремих елементів з відеозаписів кваліфікаційних та фінальних виступів спортсменок на змаганнях XXXII Олімпійських ігор у Токіо [7, 8];
- фотозвіти зі змагань офіційного фотографа Національної збірної України з художньої гімнастики Марії Музиченко [9];
- фотозвіти фотографа Ігоря Сахацького [10].

Для тестування використано відео виступів Вікторії Онопрієнко з м'ячем у кваліфікації на чемпіонаті світу у м. Кітакюсю у 2021 [11]. У тренувальному наборі даних зображення з Вікторією Онопрієнко відсутні. На кожен клас припадає приблизно 90 фото у тренувальному наборі та 6 фото – у тестовому наборі.

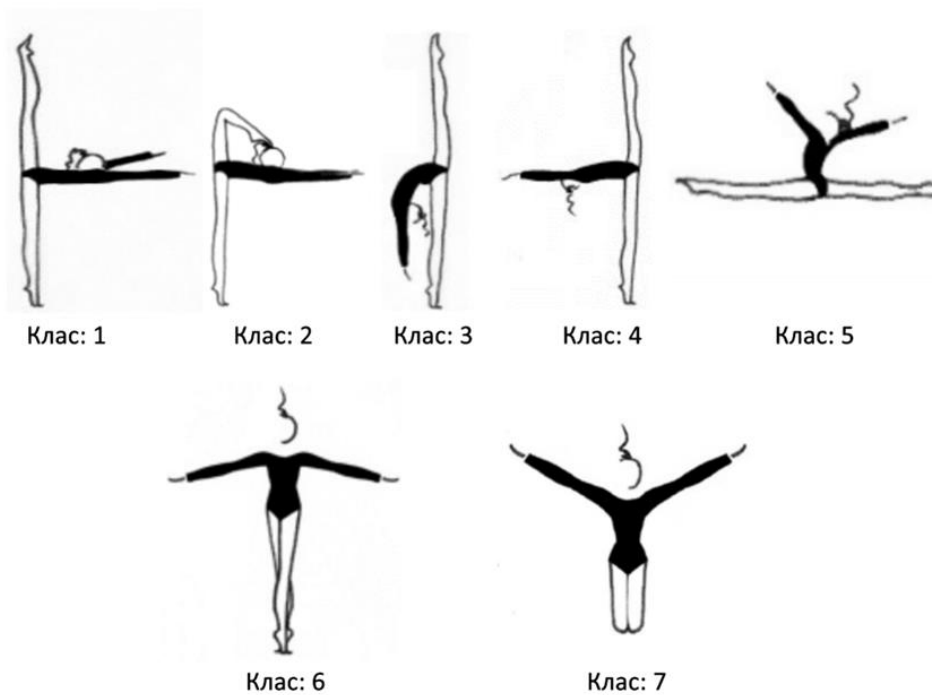


Рисунок 1. Візуалізація класів

Знаходження ключових точок скелета людини за методом MediaPipe

MediaPipe пропонує кросплатформні настроювані рішення машинного навчання для живих і потокових медіа [12]. Бібліотека містить усе необхідне для налаштування та розгортання на мобільних пристроях (Android, iOS), в інтернеті, настільних комп'ютерах, периферійних пристроях та IoT без особливих зусиль. Цей набір гнучких інструментів створено на основі бібліотеки TensorFlow Lite. Метод забезпечує високу продуктивність у реальному часі на сучасних мобільних телефонах, настільних комп'ютерах, ноутбуках та не вимагає наявності відеокарти. Програмний інтерфейс додатка на мовах програмування Python та JavaScript дає змогу використовувати метод для розв'язання власних задач. У роботі використовується MediaPipe Pose – рішення методом машинного навчання для відстеження пози тіла, яке визначає 33 3D-орієнтири (рис. 2) та маску сегментації фону на всьому тілі з відеокадрів RGB.

Результатом обробки одного зображення за методом MediaPipe Pose є вектор зі 132 значень, де в послідовності від першої ключової точки до 33-ї записані координати x , y та z і видимість. Якщо видимість має значення, близьке до 1, тоді частину тіла видно якісно, чітко та однозначно. Якщо значення ближче до 0.5, тоді аналізовану частину тіла, може перекривати інший об'єкт, але сусідні скелетні точки дають змогу визначити ймовірне розташування цієї ключової точки. Якщо значення наближається до 0, тоді частину тіла не видно зовсім або вона навіть не потрапляє на зображення.

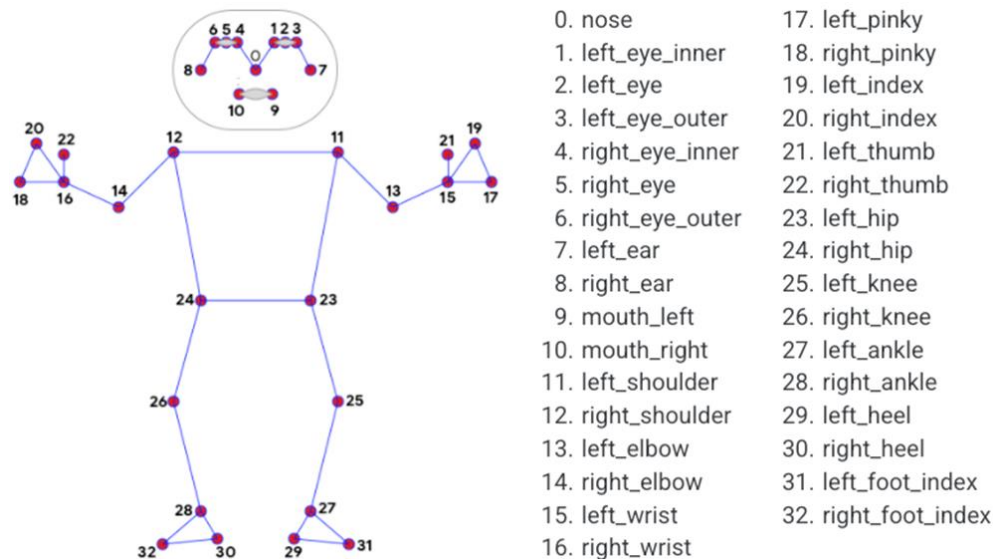


Рисунок 2. Порядок позначень ключових точок у моделі MediaPipe [16]

Обробивши за методом MediaPipe Pose власний набір даних маємо набір векторів, які описують 7 класів – у середньому по 96 векторів для кожного класу. Далі це буде використано для навчання моделі класифікації елементів.

Для підключення цього методу у проєкт необхідно його спочатку встановити як бібліотеку, виконавши команду “pip install mediapipe” у терміналі проєкту. Далі безпосередньо у файлі для виконання на мові Python необхідно під’єднати бібліотеку й викликати необхідні для роботи методи для обробки зображень та візуалізації результатів обробки. Відповідний фрагмент коду наведено нижче:

```
import mediapipe as mp
mp_pose = mp.solutions.pose
mp_drawing = mp.solutions.drawing_utils
mp_drawing_styles = mp.solutions.drawing_styles
```

Знаходження ключових точок скелета людини за методом ViTPose

Другим рішенням для тестування обрано методом ViTPose, який розроблено на базі трансформерів [13]. У цій статті показано хороші можливості трансформерів простого зору для оцінювання пози з різних аспектів: простота структури моделі, масштабованість розміру моделі, гнучкість парадигми навчання та можливість передачі знань між моделями за допомогою простої базової моделі під назвою ViTPose. Зокрема, ViTPose використовує звичайні та неієрархічні трансформери зору як магістралі для отримання характеристик аналізованого екземпляра людини та полегшений декодер для оцінювання пози. Кількість параметрів можна суттєво збільшити завдяки масштабованій ємності моделі та високому паралелізму трансформерів. Тоді буде встановлено новий фронт Парето між пропускнуою здатністю та продуктивністю. ViTPose є дуже гнучким щодо типу уваги, роздільної здатності введення, попереднього навчання та стратегії тонкого налаштування, а також роботи з кількома завданнями поз у вхідних даних, стратегії попереднього навчання та налаштування, а також може працювати з декількома завданнями. Автори також емпірично демонструють, що знання великих моделей ViTPose можна легко передати малим за допомогою простого

маркера знань, що знання великих моделей ViTPose можна легко переносити на малі моделі за допомогою простого токена знань. Експериментальні результати показують, що базова модель ViTPose перевершує конкурентні методи на складному тесті MS COCO Keypoint Detection.

На рис. 3 зображено загальну та деталізовані структури, які використовуються в методі ViTPose. Для забезпечення роботи цього методу у реальному часі необхідна відеокарта типу Nvidia RTX 2080. У методі ViTPose використовується інша анотація скелета людини за 17-ма ключовими точками (рис. 4). Внаслідок обробки зображення для кожного побудованого скелета видається вектор, у якому для кожної з 17-ти ключових точок вказується координати x і y та точність виявлення.

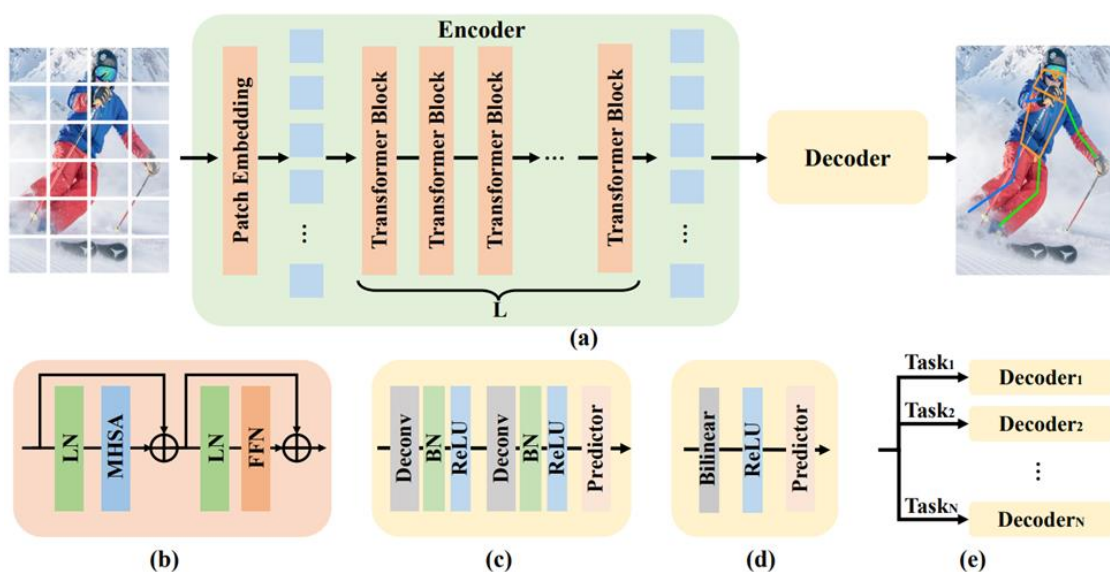


Рисунок 3. Структури в методі ViTPose [13]:

- (a) – загальна структура; (b) – блок трансформера; (c) – класичний декодер;
(d) – простий декодер; (e) – декодери для кількох наборів даних

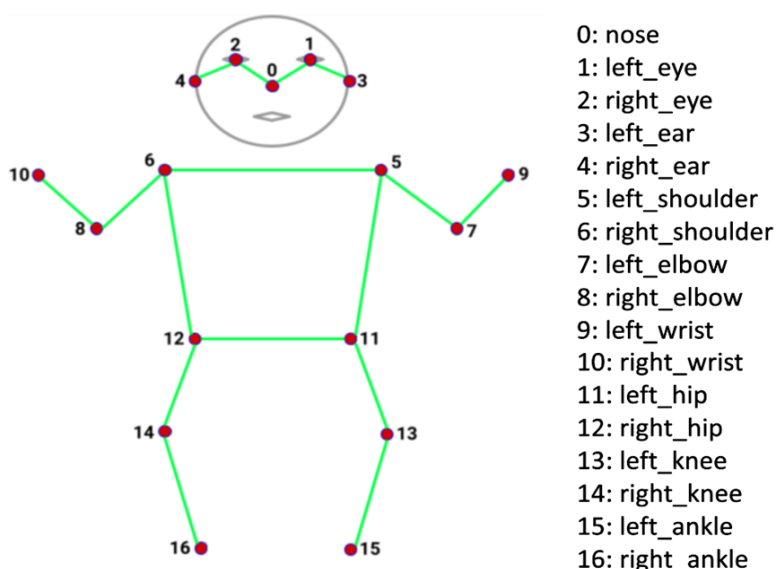


Рисунок 4. Порядок ключових точок у моделі ViTPose [13]

Для використання рішення ViTPose необхідно виконати такі команди для клонування з репозиторію github та встановлення відповідних додаткових бібліотек:

```
git clone https://github.com/open-mmlab/mmcv.git
cd mmcv
git checkout v1.3.9
MMCV_WITH_OPS=1 pip install -e .
cd ..
git clone https://github.com/ViTAE-Transformer/ViTPose.git
cd ViTPose
pip install -v -e .
```

Після виконання цих команд у теці проєкту з'явиться дві нові теки mmcv та ViTPose. Використовуючи методи, що реалізовані у цих бібліотеках, розроблено 2 алгоритми. Перший алгоритм для обробки власного набору даних, а другий – для обробки відеопотоку виступів спортсменів. Алгоритм обробки набору даних знаходить координати ключових точок скелета людини на зображенні та додає їх до набору даних, який далі буде використаний для навчання моделі класифікації.

Порівняння методів MediaPipe та ViTPose

Для порівняння методів обрано 4 зображення (рис. 5). У верхньому ряді зображення оброблені за методом MediaPipe Pose, в нижньому – за методом ViTPose. На першому зображенні, обробленому методом MediaPipe Pose, зміщені ключові точки стегон, а також некоректно визначено точки на ногах. На другому зображенні, яке оброблене цим же методом, точка правого коліна позначена ближче до стегна. На третьому зображенні помилково визначено лише пальці правої стопи. На четвертому зображенні, де спортсменка виконує елемент, який належить до 3 класу, під час визначення методом MediaPipe Pose було переплутано ключові точки тулуба тіла. Через це було хибно визначено праву ногу, як праву руку, праву руку, як ліву ногу, та ліву ногу, як праву ногу. Недоліком методу MediaPipe Pose є те, що якість відстеження скелета людини під час виконання елементів, пов'язаних з обертанням та групуванням у просторі, є низькою. Наприклад, під час виконання обертів модель починає плутати праві та ліві частини тіла. Ці недоліки ускладнюють подальший розвиток проєкту на базі цього методу.

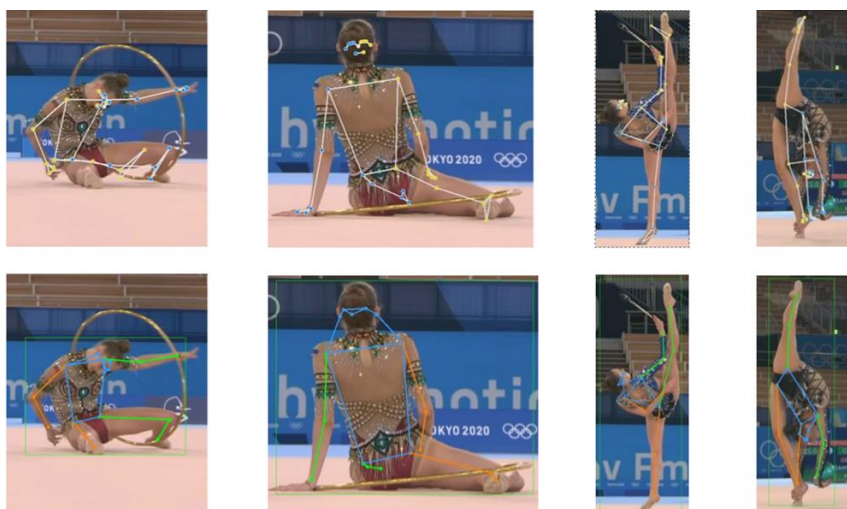


Рисунок 5. Обробка зображень за MediaPipe Pose (зверху) та за ViTPose (знизу)

Результати обробки зображень з рис. 5 методом ViTPose є кращими; критичних помилок не виявлено. Але цей метод вимагає більш потужного обладнання, а моделі займають більший об'єм пам'яті.

Розробка багатошарового персептрона для класифікації

Для класифікації спортивних елементів розроблено багатошаровий мультикласовий персептрон [14]. На рис. 6 наведено архітектуру розробленого персептрона, який є нерекурентною статичною багатошаровою штучною нейронною мережею з двома прихованими шарами. Фрагмент коду на мові Python для створення такого персептрона є таким:

```
inputs=tf.keras.Input(shape=(51))
embedding=landmarks_to_embedding(inputs)
layer=keras.layers.Dense(128, activation=tf.nn.relu6)(embedding)
layer=keras.layers.Dropout(0.5)(layer)
layer=keras.layers.Dense(64, activation=tf.nn.relu6)(layer)
layer=keras.layers.Dropout(0.5)(layer)
outputs=keras.layers.Dense(len(class_names),
                             activation="softmax")(layer)
model=keras.Model(inputs, outputs)
model.summary()
```

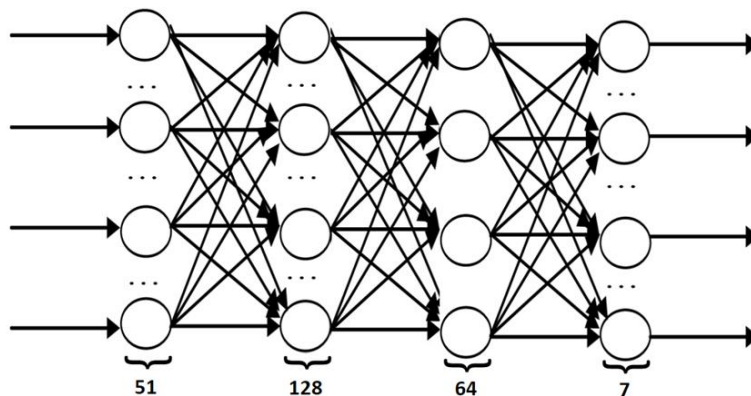


Рисунок 6. Архітектура розробленого тришарового персептрона

Навчання багатошарового персептрона здійснюється на основі корекції помилок (навчання з учителем) з використанням методу градієнтного спуску Adam. Після закінчення кожної епохи модель оцінюється на контрольних даних для прийняття рішення про ранню зупинку (early stopping callback) та збереження контрольної точки (checkpoint callback). Безпомилковість навченої моделі на тестовій вибірці становить 0.9048. Це свідчить про те, що модель у більшості випадків правильно класифікує спортивні елементи. Матриця сплутаності (рис. 7) вказує, що найчастіше модель помиляється під час розпізнавання об'єктів першого класу – плутає їх із четвертим. Причиною цього є те, що ці 2 спортивні елементи є однаковими за положенням тіла, а відрізняються лише напрямком тулуба і голови. У класі 1 голова направлена до підлоги, а в класі 4 – до стелі.

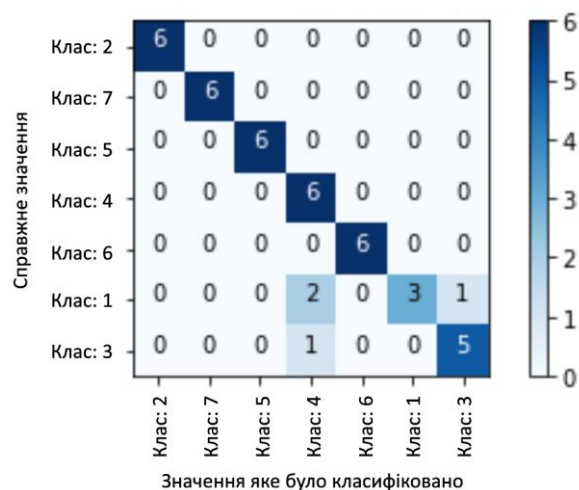


Рисунок 7. Матриця сплутувань

Програмна реалізація визначення пози спортсменки

Програма працює так:

1. Відео, яке необхідно обробити, програма зчитує покадрово.
2. Кожен кадр передається у першу модель для виявлення людини. Внаслідок цього результати обраний метод повертає координати обмежувальної рамки і точність виявлення кожної рамки, де було виявлено людину.
3. У другу модель для визначення положення скелета передається кадр з відео та відповідна йому анотація від першої моделі. Результати роботи першої моделі необхідні, щоб звузити площу обробки зображення для другої моделі. Тоді модель буде визначати положення скелета людини лише в межах обмежувальних рамок від першої моделі. На виході отримуємо координати ключових точок скелета людини та оцінку їх видимості.
4. Модель класифікації елементів отримує для кожного кадру відповідний йому вектор значень, а результатом обробки є ймовірність обрання кожного із 7 класів. Серед класів обирається той клас, ймовірність до якого є найбільшою і перевищує пороговий рівень впевненості.
5. Програма у верхньому лівому кутку кожного кадру візуалізує відповідне зображення обраного класу. Правіше від зображення класу програма виводить значення впевненості прийняття рішення. Якщо впевненість недостатня, тоді програма залишає початковий кадр без змін.

Приклад обробки кадру програмою зображено на рис. 8. Програмний код захищено авторським свідоцтвом [15].

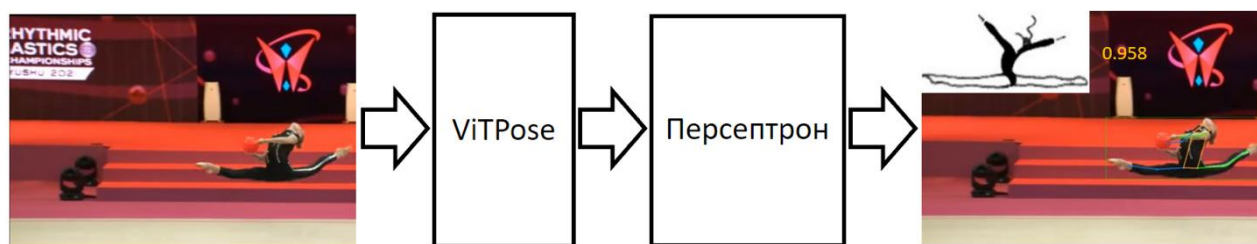


Рисунок 8. Порядок обробки кадру програмою

Висновки

Зібрано та структуровано набір даних із зображенням виконання спортивних елементів. Виявлено особливості роботи моделей комп'ютерного зору MediaPipe Pose та ViTPose для визначення пози людини, яка виконує вправи з художньої гімнастики, та обрано найкраще рішення для попередньої обробки підготовленого набору. Головним результатом дослідження є модель класифікації спортивних елементів, яка за 7 класами демонструє точність 0.9048.

У наступних дослідженнях планується розширити набір даних, збільшивши кількість класів та екземплярів. Також для покращення результатів класифікації доцільно спробувати використати LSTM та механізм уваги.

Література

1. *Fédération Internationale de Gymnastique*. URL: <https://www.gymnastics.sport/site/> (дата звернення: 28.05.2023).
2. 2022 – 2024 Code of Points. URL: https://www.gymnastics.sport/publicdir/rules/files/en_2022-2024%20RG%20Code%20of%20Points.pdf (дата звернення: 27.05.2023).
3. Sierra-Palmeiro, E., Bobo-Arce, M., Pérez-Ferreirós, A., & Fernández-Villarino, M. A. (2019). Longitudinal Study of Individual Exercises in Elite Rhythmic Gymnastics. *Frontiers in Psychology*, 10. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.01496.
4. Díaz-Pereira, M. P., Gómez-Conde, I., Escalona, M., & Olivieri, D. N. (2014). Automatic recognition and scoring of Olympic rhythmic gymnastics movements. *Human Movement Science*, 34(1), 63–80. DOI: 10.1016/j.humov.2014.01.001.
5. Bearman, A., & Dong, C. (2015). Human pose estimation and activity classification using convolutional neural networks. *CS231n Course Project Reports*.
6. Verma, M., et al. (2020). Yoga-82: A new dataset for fine-grained classification of human poses. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition workshops*, pp. 1038–1039.
7. *Olympics Gymnastics: Rhythmic Gymnastics – Individual All-Around-Qualification 1&2* (2020). Tokyo 2020. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=uRzmkLF8MVI> (дата звернення: 27.05.2023).
8. *Olympics: FULL Rhythmic Gymnastics Individual All Around Final at Tokyo 2020* (2020). YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=v6ZuroWdLTs> (дата звернення: 27.05.2023).
9. *Альбоми зі зйомок на спортивних турнірах фотографа Марії Музиченко*. URL: <https://muzychenko.photos/our-services/sports-photography> (дата звернення: 27.05.2023).
10. *Портфолію Ігоря Сахатського*. URL: <https://sakhatskyi.com/portfolio/> (дата звернення: 27.05.2023).
11. *Ukrainian RG Federation: Viktoriia Onopriienko Ball Qual 26,200 – World Championships Kitakyushu 2021* (2021). YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=IKzuWUIe8Rc> (дата звернення: 27.05.2023).

12. GitHub – Google / Media Pipe: Cross-platform, customizable ML solutions for live and streaming media. GitHub. URL: <https://github.com/google/mediapipe> (дата звернення: 27.05.2023).
13. Xu, Y., Zhang, J., Zhang, Q., & Tao, D. (2022). Vitpose: Simple vision transformer baselines for human pose estimation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35, 38571–38584.
14. Bielecki, A. (2019). Models of neurons and perceptrons: Selected problems and challenges. *Studies in Computational Intelligence*. Vol. 770. Springer Cham, 156 p. DOI: 10.1007/978-3-319-90140-4.
15. А. Р. Нескородева (Україна). А. С. 116622 Україна, UKPHOIBI. Комп'ютерна програма "Pose estimation for sports (Rhythmic gymnastics)". № с202300058; заявка 06.01.2023; опубл. 01.03.2023.
16. ML Kit. URL: <https://developers.google.com/ml-kit/vision/pose-detection?hl=en> (date of access: 27.05.2023).

Рукопис отримано – 09/06/2023; прийнято до публікації – 26/06/2023.

© Донецький національний університет імені Василя Стуса, 2023
© Анастасія Нескородева, 2023

Neural network methods for automatic person pose estimation in rhythmic gymnastics exercises

Anastasiia Neskorodieva

Abstract

In rhythmic gymnastics, evaluating the performances of female athletes is a complex subjective task due to the need to consider both the technical characteristics of dynamic exercises and the aesthetic perfection of individual scenes and the composition as a whole. The article presents the results of a study aimed at developing a program for automatically detecting the postures of female athletes during rhythmic gymnastics exercises. The development of the model is preceded by a study of the current scoring rules, considering the complexity of the athlete's movements. For the study, a special dataset was created to determine the gymnasts' poses, which included scored elements and unscored positions. The dataset contains freeze frames from the video of the competition and photo reports. Two computer vision methods are used to identify the poses: MediaPipe Pose and ViTPose. MediaPipe Pose allows for real-time detection of 33 3D landmarks due to its high performance. ViTPose provides high accuracy using visual transformers. A comparative analysis of these two methods is carried out, highlighting the strengths and limitations of each of them. A multilayer perceptron model has been developed to classify sports elements based on recognized poses. The model was trained using back-propagation of error based on Adam's gradient descent method. After training the model on the author's dataset, high accuracy in the classification of gymnasts' poses is achieved. This study is an intellectual component of a future system for automatic real-time detection of an athlete's pose for a more reliable and efficient evaluation of rhythmic gymnastics performances. The proposed approach to combining computer vision and machine learning methods can be extended to improve sports analysis in other related disciplines.

Keywords: transformer, classification, rhythmic gymnastics, perceptron, pose estimation, video stream.

References

1. *Fédération Internationale de Gymnastique*. URL: <https://www.gymnastics.sport/site/> (date of access: 28.05.2023).
2. *2022 – 2024 Code of Points*. URL: https://www.gymnastics.sport/publicdir/rules/files/en_2022-2024%20RG%20Code%20of%20Points.pdf (date of access: 27.05.2023).
3. Sierra-Palmeiro, E., Bobo-Arce, M., Pérez-Ferreirós, A., & Fernández-Villarino, M. A. (2019). Longitudinal Study of Individual Exercises in Elite Rhythmic Gymnastics. *Frontiers in Psychology*, 10. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.01496.
4. Díaz-Pereira, M. P., Gómez-Conde, I., Escalona, M., & Olivieri, D. N. (2014). Automatic recognition and scoring of Olympic rhythmic gymnastics movements. *Human Movement Science*, 34(1), 63–80. DOI: 10.1016/j.humov.2014.01.001.
5. Bearman, A., & Dong, C. (2015). Human pose estimation and activity classification using convolutional neural networks. *CS231n Course Project Reports*.
6. Verma, M., et al. (2020) Yoga-82: A new dataset for fine-grained classification of human poses. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition workshops*, pp. 1038–1039.
7. *Olympics Gymnastics: Rhythmic Gymnastics – Individual All-Around-Qualification 1&2* (2020). Tokyo 2020. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=uRzmkLF8MVI> (date of access: 27.05.2023).
8. *Olympics: FULL Rhythmic Gymnastics Individual All Around Final at Tokyo 2020* (2020). YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=v6ZuroWdLTs> (date of access: 27.05.2023).
9. *Albomy zi ziomok na sportyvnykh turnirakh fotohrafa Mariyi Muzychenko*. URL: <https://muzychenko.photos/our-services/sports-photography> (date of access: 27.05.2023). [In Ukrainian].
10. Portfolio Yhorya Sakhatskoho. URL: <https://sakhatskyi.com/portfolio/> (date of access: 27.05.2023). [In Ukrainian].
11. *Ukrainian RG Federation: Viktoriia Onopriienko Ball Qual 26,200 - World Championships Kitakyushu 2021* (2021). YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=IKzuWUle8Rc> (date of access: 27.05.2023).

12. GitHub – Google / Media Pipe: Cross-platform, customizable ML solutions for live and streaming media. GitHub. URL: <https://github.com/google/mediapipe> (date of access: 27.05.2023).
13. Xu, Y., Zhang, J., Zhang, Q., & Tao, D. (2022). Vitpose: Simple vision transformer baselines for human pose estimation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35, 38571–38584.
14. Bielecki, A. (2019). Models of neurons and perceptrons: Selected problems and challenges. *Studies in Computational Intelligence*. Vol. 770. Springer Cham, 156 p. DOI: 10.1007/978-3-319-90140-4.
15. A. R. Neskorodieva (Ukraine). A. S. 116622 Ukraine, UKRNOIVI. Kompyuterna prohrama “Pose estimation for sports (Rhythmic gymnastics)” № c202300058; zayava. 06.01.2023; opubl. 01.03.2023. [In Ukrainian].
16. *ML Kit*. URL: <https://developers.google.com/ml-kit/vision/pose-detection?hl=en> (date of access: 27.05.2023).

