https://doi.org/10.31649/1997-9266-2026-187-4-188-193

УДК 681.513.8 : 004.93’1

О. В. Удовиченко[1]
О. М. Цимбал[1]

СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ КОЛОБОРАТИВНОГО РОБОТА НА ОСНОВІ КОМП’ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Розглянуто актуальну науково-технічну проблему забезпечення функціональної безпеки в умовах тісної колаборації людини та робота на сучасних автоматизованих лініях. Дослідження проведено в контексті глобального переходу промисловості до парадигми Індустрії 5.0, що вимагає створення гнучких та людиноцентричних виробничих систем. Проаналізовано недоліки традиційних засобів захисту (фізичних бар’єрів, світлових завіс), головним з яких є жорстка бінарна логіка спрацювання. Вона ініціює повну аварійну зупинку обладнання за будь-якого порушення периметру, що призводить до розриву технологічних циклів, збільшення часу простоїв та прискореного механічного зносу приводів.

Як альтернативу запропоновано метод динамічного моніторингу швидкості та розділення на основі безконтактного технічного зору. Авторами розроблено трирівневу архітектуру інтелектуальної системи безпеки. На першому (сенсорному) рівні використовується нейромережевий фреймворк MediaPipe, який обробляє відеопотік у режимі реального часу та генерує просторові 3D-координати суглобів скелета оператора. На рівні обробки даних програмний модуль розраховує мінімальну дистанцію між людиною та небезпечними вузлами робота, а також диференціює її зміну для визначення кінематики руху.

Наукова новизна роботи полягає у синтезі нечіткого регулятора (Fuzzy Controller) типу Мамдані для адаптивного керування швидкістю маніпулятора, який, на відміну від наявних рішень, реалізує проактивну стратегію. Більшість відомих систем враховують виключно статичну відстань або навантаження на привід (реактивний підхід). Запропонована система використовує дві лінгвістичні змінні: «Відстань до оператора» та «Швидкість наближення». Це дозволяє контролеру діяти на випередження: система здатна заздалегідь сповільнювати робота, якщо людина наближається до зони з високим прискоренням. Такий підхід забезпечує ефективне та безпечне динамічне масштабування віртуальних робочих зон (зелена, жовта, червона).

Для верифікації розробленого алгоритму проведено математичне моделювання у середовищі MATLAB з використанням пакету Fuzzy Logic Toolbox. Застосування процедури дефазифікації методом центру ваги дозволило отримати гладку поверхню відгуку. Результати порівняльного аналізу підтверджують, що синтезований нечіткий регулятор гарантує безступінчасту, плавну зміну швидкості, повністю усуваючи ефект «брязкоту» керувального сигналу на межах віртуальних бар’єрів. Практичне значення роботи полягає у можливості інтеграції запропонованої архітектури у системи керування промисловими роботами для оптимізації балансу між продуктивністю та безпекою праці.

Ключові слова: промислова безпека, комп’ютерний зір, нечітка логіка, Human-Robot Collaboration, Індустрія 5.0, адаптивне керування.

Вступ

Сучасні тенденції глобалізації ринку та попиту на індивідуалізовану продукцію спонукають промисловість переходити від парадигми масового виробництва до масової персоналізації [1]. Згідно з принципами Industry 5.0 [2], людина повертається в центр виробничої системи, виступаючи не просто оператором, а активним учасником технологічного процесу. Зростає необхідність організації тісної взаємодії між роботом та людиною, за якої промислові маніпулятори та персонал спільно використовують робочий простір для виконання складних складальних або контрольних операцій.

Забезпечення фізичної безпеки оператора є критичним бар’єром для широкого впровадження HRC (Human Robot Collaboration). Традиційні підходи до безпеки базуються на повній ізоляції робота

© О. В. Удовиченко, О. М. Цимбал, 2026. Ця стаття відкритого доступу та поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License 4.0

за допомогою захисних огороджень, що унеможливлює гнучку співпрацю та зменшує корисну виробничу площу. Сучасний технічний стандарт ISO/TS 15066, що регламентує безпеку колаборативних роботів, визначає чотири основні методи співпраці: зупинка з контролем безпеки (Safety-rated monitored stop), ручне ведення (Hand guiding), обмеження потужності та сили (Power and force limiting), а також моніторинг швидкості та розділення (Speed and Separation Monitoring — SSM) [1], [3].

Метод SSM є найперспективнішим для важких промислових роботів, оскільки дозволяє їм працювати на високих швидкостях за відсутності людини та автоматично сповільнюватися при її наближенні. Сучасні реалізації SSM більшою мірою базуються на лазерних сканерах або світлових бар'єрах. Такі системи мають суттєві недоліки, адже вони реагують на будь-який об'єкт, мають дискретні зони спрацювання та не враховують біомеханіку руху оператора. Це призводить до частих помилкових спрацювань та вимушених простоїв обладнання, що знижує загальну ефективність автоматизованої комірки.

На відміну від традиційних підходів, адаптивна система безпеки функціонує за принципом безперервного та динамічного масштабування робочих зон. Замість бінарної логіки «працює/аварійно/зупинено», така система в режимі реального часу аналізує поточну відстань до оператора та параметри його руху. Це дозволяє створити своєрідний «еластичний» віртуальний бар'єр: коли людина наближається, робот плавно і пропорційно знижує швидкість, а коли відходить — автоматично повертається до номінальної продуктивності (рис. 1). Такий підхід гарантує безпеку без необхідності повної зупинки технологічного процесу.

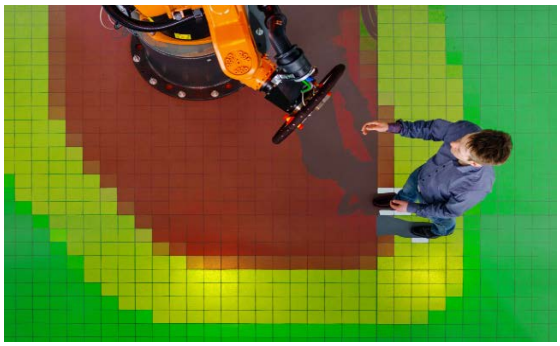


Рис. 1. Принцип дії адаптивної системи безпеки з динамічним масштабуванням зон

Останнім часом для згладжування керувальних сигналів в системах HRC активно впроваджуються методи м'якого обчислення. Зокрема, у недавньому дослідженні науковців ХНУРЕ [4] доведено високу ефективність застосування нечіткої логіки для адаптивного регулювання швидкості маніпулятора. Проте відомі нечіткі системи управління [5] базуються переважно на аналізі внутрішнього стану маніпулятора (навантаження на привід) та статичної відстані до людини. Вони не враховують кінематику та динаміку рухів самого оператора. Наприклад, система не відрізняє ситуацію, коли людина нерухомо стоїть біля межі небезпечної зони, від ситуації, коли вона стрімко наближається до неї, що є критичним для своєчасного гальмування.

Метою роботи є розробка та дослідження інтелектуальної системи керування швидкістю маніпулятора на основі нечіткої логіки, яка, на відміну від наявних рішень, забезпечує проактивне сповільнення робота шляхом аналізу не лише дистанції, а й кінематики руху (швидкості наближення) оператора за допомогою систем комп'ютерного зору.

Синтез нечіткого регулятора

Оскільки дані з системи комп'ютерного зору можуть мати флуктуації (шум), а поведінка людини є важкопрогнозованою, використання жорстких порогових алгоритмів або детермінованих моделей кінематики [6] є менш ефективним в умовах невизначеності. Для реалізації алгоритму адаптивного керування та забезпечення проактивної реакції на дії людини, розглянуто комплексну архітектуру системи безпеки (рис. 2), що складається з 3 рівнів: сенсорика та розпізнавання, обробка даних та рівень прийняття рішень. Для розв'язання задачі плавного керування швидкістю маніпулятора вибрано апарат нечіткої логіки. Структурна схема запропонованої системи керування включає модуль фазифікації, базу правил та модуль дефазифікації.

Система приймає на вхід два параметри, отримані після обробки відеопотоку нейромережею MediaPipe [7]: D — мінімальна відстань від ключових точок оператора до робота; v_n — швидкість наближення оператора до небезпечної зони (похідна від відстані по часу dD/dt).

Вихідною змінною є K_R — коефіцієнт масштабування швидкості робота (від 0 % до 100 %). Для кожної змінної визначимо терм-множини та функції належності:

– для відстані D: Close (Близько), Medium (Середня), Far (Далеко);

– для швидкості людини v_n : Static (Стоїть/Повільно), Fast (Швидко);

База правил нечіткого виводу

Відстань (D) / Швидкість (v_n)	Static	Fast
Close (< 0,5 м)	STOP (0%)	STOP (0%)
Medium (0,5...1,5 м)	SLOW (50%)	STOP (0%)
Far (> 1,5 м)	FULL (100%)	SLOW (50%)



Рис. 2. Блок-схема архітектури розглянутої інтелектуальної системи безпеки

– для виходу K_R: Stop (Зупинка), Slow (Повільно), Full (Повна швидкість).

Використання швидкості наближення v_h, як другої вхідної змінної є ключовою відмінністю розробленого регулятора від наявних аналогів [4]. Це дозволяє системі діяти на випередження: якщо оператор знаходиться на безпечній «Середній» відстані, але рухається «Швидко», контролер ініціює команду «Зупинка» (див. табл.), компенсуючи час реакції механічних гальм робота.

Отримане нечітке значення перетворюється у чіткий керувальний сигнал для ПЛК (0...100 %) методом центру ваги (Centroid method). Це забезпечує плавну зміну швидкості без ривків, що подовжує термін служби механічних вузлів робота.

Математична реалізація нечіткого виводу базується на алгоритмі Мамдані. Підсумкова функція належності вихідної змінної $\mu_{\Sigma(v)}$ визначається як максмінна композиція:

$$\mu_{\Sigma(v)} = \max_k \left[\min\left(\mu_{A_k}(D), \mu_{B_k}(v_h) \right) \right], \quad (1)$$

де k — номер правила в базі знань;

$\mu_{A_k}(D)$ — функція належності дистанції;

$\mu_{B_k}(v_h)$ — функція належності швидкості людини.

Чітке значення керувального сигналу V_{out} (швидкість робота у %) розраховується методом центроїда

$$V_{out} = \frac{\int v \cdot \mu_{\Sigma(v)} dv}{\int \mu_{\Sigma(v)} dv}. \quad (2)$$

Для забезпечення відтворюваності моделювання наведено кількісні параметри функцій належності (ФН) для кожної лінгвістичної змінної. Формалізація нечітких множин виконана за допомогою трапецієподібних та трикутних функцій, що задаються координатами вершин на відповідних універсумах розмірковувань:

а) відстань до оператора (D): універсум [0; 3] м;
– «Close» трапецієподібна ФН: [-1; 0; 0,6; 1,0];
– «Medium» трикутна ФН: [0,6; 1,0; 1,5];
– «Far» трапецієподібна ФН: [1,0; 1,5; 3; 4];
б) швидкість наближення (v_h): універсум [0; 2] м/с;
– «Static» трапецієподібна ФН: [–1; 0; 0,2; 0,8];
– «Fast» трапецієподібна ФН: [0,4; 1,0; 2,0; 3,0];
в) вихідна швидкість маніпулятора (v_r): універсум [0; 100] %;
– «STOP» трикутна ФН: [-20; 0; 20];
– «SLOW» трикутна ФН: [10; 50; 90];
– «FULL» трикутна ФН: [80; 100; 120].

Вибір вказаних діапазонів обумовлений технічними характеристиками колаборативних роботів

та антропометричними даними оператора, що дозволяє системі плавно адаптувати кінематику руху залежно від поточної ситуації в робочій зоні.

Моделювання та обґрунтування результатів

Для верифікації запропонованого методу проведено математичне моделювання у середовищі MATLAB. Мета експерименту — порівняння динамічних характеристик традиційної системи SSM згідно з ISO/TS 15066 та розробленим нечітким контролером.

Змодельовано сценарій лінійного наближення оператора до робочої зони маніпулятора з відстані від 3 м до 0 м протягом 10 секунд. Для наближення умов моделювання до реального промислового середовища та імітації апаратної похибки сенсорів технічного зору, до ідеального сигналу відстані штучно внесено адитивний білий гаусів шум. Характеристики шуму задані з урахуванням типових похибок RGB-D камер: математичне сподівання $\mu = 0$, стандартне відхилення $\sigma = 0,05$ м (що відповідає флуктуації координат на рівні 5 см).

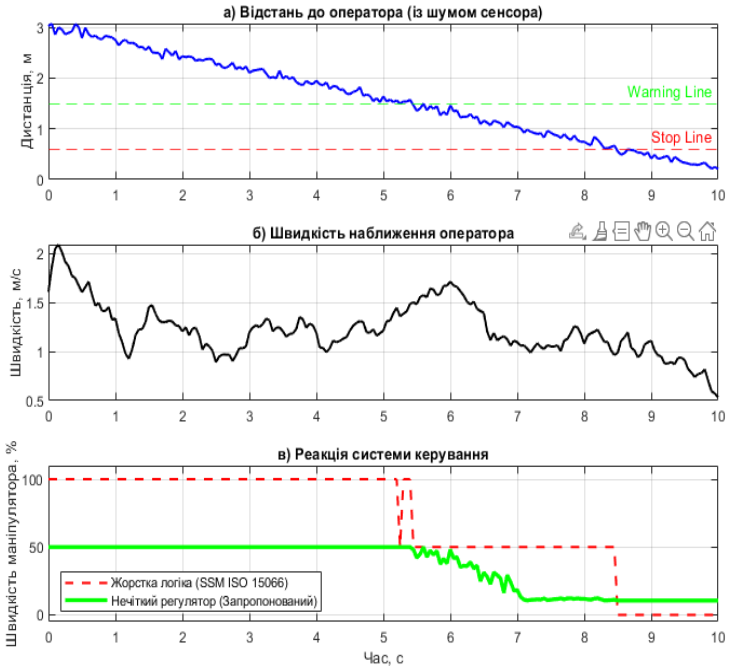


Рис. 3. Результати моделювання реакції системи керування

Результати моделювання реакції системи керування показано на рис. 3, 4.

Червона пунктирна лінія (SSM метод) демонструє ступінчасту зміну швидкості від 100 до 0 %. Такий режим роботи викликає різкі динамічні навантаження на приводи робота (ривки) в моменти перемикання зон (t = 3,3 с та t = 8,3 с). Крім того, наявність шуму вимірювання на межах зон може викликати ефект «брязкоту», коли система хаотично перемикається між режимами.

Зелена суцільна лінія (запропонований метод Fuzzy Logic) демонструє плавне (безступінчасте) регулювання швидкості. Регулятор починає знижувати швидкість заздалегідь, враховуючи не лише факт перетину зони, а й швидкість наближення людини.

Застосування дефазифікації методом центру ваги (Center of Gravity) дозволило отримати гладку криву гальмування. Це забезпечує:

– зменшення механічного зносу редукторів робота через відсутність миттєвих змін прискорення;

–передбачуванішу поведінку робота для оператора.

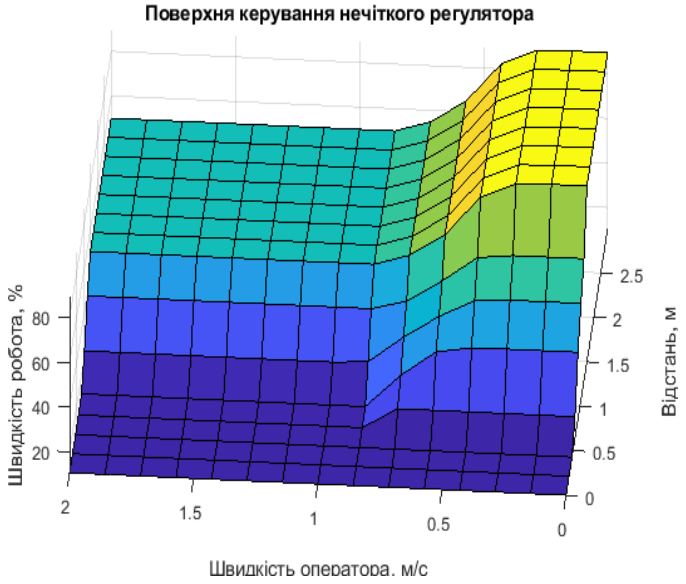


Рис. 4. Поверхня нечіткого виводу синтезованого регулятора

Поверхня нечіткого виводу синтезованого регулятора, наочно демонструє, що система «розумніша» за звичайний датчик, бо вона одночасно аналізує і де знаходиться людина, і як швидко вона рухається. Отриманий графік є «картою інтелекту» модельованої системи, яка дозволяє роботу гнучко підлаштовуватися під поведінку людини, забезпечуючи баланс між безпекою та продуктивністю.

Висновки та перспективи

У роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності та безпеки колаборативних роботизованих комплексів шляхом удосконалення методу Speed and Separation Monitoring (SSM).

Враховано, що традиційні дискретні системи безпеки призводять до значних динамічних навантажень на механізми робота та знижують загальну продуктивність через часті аварійні зупинки.

Запропоновано інноваційний підхід до побудови системи безпеки, який поєднує методи комп'ютерного зору для отримання скелетної моделі оператора та математичний апарат нечіткої логіки для прийняття керувальних рішень.

Розроблено структуру нечіткого контролера, який, на відміну від наявних аналогів, реалізує проактивну стратегію: враховує не лише дистанцію до небезпечної зони, а й швидкість та вектор наближення людини.

Результати математичного моделювання у середовищі MATLAB підтвердили переваги синтезованої системи. Запропонований нечіткий регулятор довів, що використання дефазифікації методом центру ваги забезпечує плавне регулювання швидкості та виключає ефект «брязкоту» керувального сигналу, що забезпечує плавне безступінчасте гальмування приводів маніпулятора, що подовжує їхній ресурс та робить взаємодію в парадигмі Індустрії 5.0 безпечнішою та передбачуванішою.

Перспективою подальших досліджень має стати інтеграція алгоритмів прогнозування намірів людини за допомогою рекурентних нейронних мереж, що має забезпечити підвищення ефективності систем безпеки виробничого типу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] U. K. U. Zaman, A. Siadat, A. A. Baqai, K. Naveed, and A. A. Kumar, Eds., "Handbook of Manufacturing Systems and Design: An Industry 4.0 Perspective," 1st ed. CRC Press, 2023. DOI: https://doi.org/10.1201/9781003327523 (Scopus).

[2] S. Nahavandi, "Industry 5.0 – A Human-Centric Solution," Sustainability, vol. 11, no. 16, p. 4371, 2019. https://doi.org/10.3390/su11164371 (Scopus, WoS).

[3] "Robots and robotic devices – Collaborative robots," ISO/TS 15066:2016, 2016. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/60296.html

[4] V. Yevsieiev, S. Maksymova, S. Starykova, and J. Ababneh, "Adaptive Regulation of the Manipulator's Movement Speed Depending on the Distance to the Person and the Level of Load on the Actuator," The Multidisciplinary Journal of Science and Technology, vol. 5, no. 9, pp. 9-29, 2024. [Online]. Available: https://openarchive.nure.ua/handle/document/32840.

[5] J. Peng, Z. Yin, C. Zhang, M. Li, and C. Wu, "Dynamic Speed and Separation Monitoring for Human-Robot Collaboration Based on Binocular Vision," Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 112, 2025. https://doi.org/10.1007/s10846-025-02268-7 (Scopus).

[6] P. Knap, "Human Modelling and Pose Estimation Overview," 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.19290.

[7] C. Lugaresi, J. Tang, H. Nash, et al., "MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines," 2019. https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.08172 .

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління ВНТУ

Дата надходження 6.04.2026
Дата прийняття після доопрацювання 9.04.2026
Дата прийняття до друку після рецензування 15.04.2026
Дата публікації .09.2026

Удовиченко Олександр Володимирович — аспірант кафедри комп`ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки, e-mail: oleksandr.udovychenko@nure.ua . https://orcid.org/0009-0007-9335-659X .

Цимбал Олександр Михайлович – д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки, e-mail: oleksandr.tsymbal@nure.ua . https://orcid.org/0000-0002-4947-7446.

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

O. V. Udovychenko[1]
O. M. Tsimbal[1]

Synthesis of a Fuzzy Controller for an Adaptive Security System of Collaborative Robot Based on Computer Vision

[1]Kharkiv National University of Radio Electronics

The article addresses the pressing scientific and technical problem of ensuring functional safety in conditions of close human-robot collaboration on modern automated lines. The research is conducted in the context of the global industrial transition to the Industry 5.0 paradigm, which requires the creation of flexible and human-centric production systems. The drawbacks of traditional safety safeguards (physical barriers, light curtains) are analyzed, the main of which is the rigid binary triggering logic. It initiates a complete emergency stop of the equipment upon any perimeter breach, leading to the interruption of technological cycles, increased downtime, and accelerated mechanical wear of the actuators.

As an alternative, a method of dynamic Speed and Separation Monitoring (SSM) based on contactless computer vision is proposed. The authors have developed a three-level architecture of an intelligent safety system. At the first (sensor) level, the MediaPipe neural network framework is used, which processes the video stream in real time and generates spatial 3D coordinates of the operator's skeleton joints. At the data processing level, a software module calculates the minimum distance between the human and the hazardous parts of the robot, and also differentiates its change to determine the kinematics of movement.

The scientific novelty of the work lies in the synthesis of a Mamdani-type Fuzzy Controller for adaptive control of the manipulator's speed, which, unlike existing solutions, implements a proactive strategy. Most known systems rely solely on static distance or actuator load (a reactive approach). The proposed system utilizes two linguistic variables: "Distance to the operator" and "Approach speed". This allows the controller to act preemptively: the system is capable of slowing down the robot in advance if a person approaches the zone with high acceleration. Such an approach ensures effective and safe dynamic scaling of virtual working zones (green, yellow, red).

To verify the developed algorithm, mathematical modeling was performed in the MATLAB environment using the Fuzzy Logic Toolbox package. The application of the defuzzification procedure using the Center of Gravity method made it possible to obtain a smooth response surface. The results of the comparative analysis confirm that the synthesized fuzzy controller guarantees a stepless, smooth change in speed, completely eliminating the "chattering" effect of the control signal at the boundaries of virtual barriers. The practical significance of the work lies in the possibility of integrating the proposed architecture into the control systems of industrial cobots to optimize the balance between productivity and occupational safety.

Keywords: industrial safety, computer vision, fuzzy logic, Human-Robot Collaboration, Industry 5.0, adaptive control.

Udovychenko Oleksandr V. — Post-Graduate Student of the Chair of Computer-Integrated Technologies and Robotics, e-mail: oleksandr.udovychenko@nure.ua . https://orcid.org/0009-0007-9335-659X .

Tsymbal Oleksandr M. — Dr Sc. (Eng.), Professor, of the Chair of Computer-Integrated Technologies and Robotics, e-mail: oleksandr.tsymbal@nure.ua . https://orcid.org/0000-0002-4947-7446