

Гнатієнко Олексій Григорович

Аспірант кафедри інформаційних систем та технологій КНУ ім. Тараса Шевченка
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0001-8546-5074
oleksii.hnatiienko@knu.ua

Сингаївський Владислав Володимирович

Аспірант кафедри радіотехніки та електронних систем КНУ ім. Тараса Шевченка
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна
ORCID: 0009-0002-6858-2695
Vladssss19@gmail.com

Терещук Ганна Михайлівна

Асистент кафедри інформаційних систем та технологій КНУ ім. Тараса Шевченка
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0002-5340-6237
Ganna.tereschuk@knu.ua

**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ
СТІЙКОСТІ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ
ОБРАЗІВ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ**

Анотація: У статті запропоновано метод визначення ефективності забезпечення функціональної стійкості мультимодальних інформаційних систем розпізнавання образів, які функціонують в умовах невизначеності, завад та часткової деградації сенсорних даних. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю комплексного оцінювання ефективності таких систем, що працюють у динамічних середовищах із обмеженими ресурсами та нестабільними каналами передачі інформації. Запропонований підхід базується на формуванні профілю часткових показників, які характеризують ключові аспекти функціональної стійкості, зокрема точність розпізнавання, латентність прийняття рішень, робастність до шумів, стійкість до втрати сенсорних модальностей, енергетичну ефективність та адаптивність алгоритмів машинного навчання. Метод передбачає використання інтервального експертного оцінювання, що дозволяє врахувати нечіткість та варіативність суджень фахівців без жорсткої нормалізації вихідних даних. Для агрегування результатів застосовано метод нашіарування, який забезпечує коректне поєднання різнорідних показників та мінімізацію втрат інформації. Апроксимація результатів здійснюється за допомогою трапецієподібних функцій належності, що дозволяє формалізувати нечіткі оцінки та перейти до інтегрального показника ефективності. Проведений обчислювальний експеримент підтвердив можливість отримання узагальненого кількісного критерію оцінювання функціональної стійкості системи. Практичне значення результатів полягає у можливості використання розробленого методу для порівняльного аналізу альтернативних архітектурних і алгоритмічних рішень у мультимодальних системах розпізнавання образів та бездротових сенсорних мережах.

Ключові слова: функціональна стійкість, мультимодальна інформаційна система розпізнавання образів, бездротова сенсорна мережа, експертне оцінювання, нечіткі множини, інтегральний показник.

Hnatiienko Oleksii

PhD Student of the Department of Information Systems and Technologies
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
ORCID: 0000-0001-8546-5074
oleksii.hnatiienko@knu.ua

Synhaivskiy Vladyslav

PhD Student of the Department of Radio Engineering and Electronic Systems
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
ORCID: 0009-0002-6858-2695
Vladssss19@gmail.com

© 2026 Гнатієнко О.Г., Сингаївський В.В., Терещук Г.М. Цей матеріал ліцензовано за умовами
CC BY 4.0.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Tereshchuk Hanna

Assistant of the Department of Information Systems and Technologies

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ORCID: 0000-0001-7573-9748

Ganna.tereschuk@knu.ua

METHOD FOR DETERMINING THE EFFICIENCY OF ENSURING FUNCTIONAL STABILITY OF MULTIMODAL INFORMATION SYSTEMS FOR IMAGE RECOGNITION BASED ON EXPERT EVALUATION

Abstract: This paper proposes a method for determining the effectiveness of ensuring the functional stability of multimodal information systems for image recognition operating under conditions of uncertainty, interference, and partial degradation of sensor data. The relevance of the study is driven by the need for comprehensive evaluation of such systems functioning in dynamic environments with limited resources and unstable communication channels. The proposed approach is based on the formation of a profile of partial indicators that characterize key aspects of functional stability, including recognition accuracy, decision-making latency, robustness to noise, resistance to the loss of sensory modalities, energy efficiency, and adaptability of machine learning algorithms. The method involves interval expert evaluation, which allows taking into account the uncertainty and variability of expert judgments without strict normalization of input data. The layering method is applied to aggregate the results, ensuring the correct combination of heterogeneous indicators and minimizing information loss. The obtained results are approximated using trapezoidal membership functions, which enables the formalization of fuzzy assessments and the derivation of an integral efficiency indicator. The conducted computational experiment confirmed the possibility of obtaining a generalized quantitative criterion for evaluating the functional stability of the system. The practical significance of the results lies in the applicability of the proposed method for comparative analysis of alternative architectural and algorithmic solutions in multimodal image recognition systems and wireless sensor networks.

Keywords: functional stability, multimodal pattern recognition information system, wireless sensor network, expert evaluation, fuzzy sets, integral index

1. Вступ

У сучасних умовах розвитку інформаційних систем і технологій та широкого впровадження бездротових мультисенсорних мереж особливої актуальності набуває проблема забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем розпізнавання образів. Такі системи, зокрема мультимодальні системи розпізнавання емоцій на основі штучного інтелекту [6], [7], функціонують в умовах невизначеності, завад, часткової втрати даних, обмежених енергетичних ресурсів та динамічної зміни характеристик середовища. За цих умов здатність системи зберігати заданий рівень точності, адаптуватися до деградації сенсорних каналів та забезпечувати стабільність прийняття рішень є критично важливою.

Функціональна стійкість інформаційної системи розпізнавання образів визначається не лише її апаратною надійністю, але й ефективністю алгоритмів обробки та інтеграції мультимодальних даних. До ключових характеристик такої стійкості належать точність розпізнавання, латентність прийняття рішення, здатність до компенсації втрати окремих сенсорних модальностей, енергетична ефективність та адаптивність моделей машинного навчання [8]. Водночас виникає потреба у комплексному кількісному оцінюванні ефективності заходів, спрямованих на підвищення функціональної стійкості системи, що дозволяє порівнювати альтернативні архітектурні та алгоритмічні рішення.

Існуючі підходи до оцінювання ефективності інформаційних систем переважно ґрунтуються на окремих метриках (accuracy, precision, latency тощо) і не забезпечують інтегрального врахування множини характеристик в умовах їх взаємної незіставності та нечіткості оцінювання. Крім того, при аналізі складних систем часто виникає необхідність залучення експертних суджень, які мають інтервальний та нечіткий характер.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення інтегрального підходу до визначення ефективності забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем розпізнавання образів, який дозволяє агрегувати множину часткових показників з урахуванням невизначеності експертних оцінок.

2. Постановка проблеми

Проблема оцінювання ефективності функціонування складних технічних систем активно досліджується в межах теорії систем, обробки сигналів, інформаційної безпеки, інфокомунікаційних технологій та штучного інтелекту. У сучасних роботах значна увага приділяється підвищенню

завадостійкості, ефективності обробки сигналів, забезпеченню надійності передачі даних та оптимізації функціонування інформаційних систем [1], [2]. У таких дослідженнях ефективність, як правило, визначається через окремі технічні показники, зокрема точність, пропускну здатність, продуктивність або енергоспоживання.

У галузі інформаційних систем розпізнавання образів, здатних здійснювати мультимодальну обробку даних [9], ефективність зазвичай оцінюється за допомогою окремих метрик якості класифікації (accuracy, precision, recall, F1-score), латентності прийняття рішень та стійкості до шумів. Разом із тим такі підходи не завжди дозволяють отримати узагальнену кількісну оцінку функціональної стійкості системи в умовах часткової деградації сенсорних даних або втрати окремих модальностей.

У роботах, присвячених багатокритеріальному аналізу ефективності функціонування інфокомунікаційних систем, запропоновано інтегральні підходи до агрегування множини факторів, що впливають на результативність системи [3]. Проте більшість із них базуються на жорстко нормованих шкалах або детермінованих вагових коефіцієнтах, що не завжди адекватно відображає невизначеність реальних умов функціонування та суб'єктивний характер експертних оцінок.

Окремий напрям досліджень стосується забезпечення функціональної стійкості складних систем, де застосовуються профільні підходи до формування сукупності часткових показників та їх подальшого агрегування [4]. Також розроблено методи роботи з нечіткими та інтервальними оцінками, зокрема із використанням способу нашарування для визначення відносної важливості характеристик альтернатив [5]. Такі методи дозволяють враховувати нечіткість вихідних даних та мінімізувати втрати інформації під час її обробки.

Разом із тим аналіз літературних джерел свідчить про те, що існуючі підходи або орієнтовані переважно на окремі технічні метрики, або не забезпечують комплексного інтегрального оцінювання функціональної стійкості інформаційної системи в умовах невизначеності, завад та часткової втрати сенсорної інформації. Зокрема, відсутній універсальний підхід, який би дозволяв агрегувати різномірні показники (точність, латентність, робастність, енергетичну ефективність, адаптивність) у єдиний інтегральний критерій з урахуванням нечіткості експертних оцінок.

Таким чином, наукова проблема полягає у розробленні методу визначення ефективності забезпечення функціональної стійкості, який би:

- враховував сукупність часткових показників, що характеризують різні аспекти функціонування системи;
- дозволяв використовувати інтервальні експертні оцінки без жорсткої нормалізації;
- забезпечував агрегування різномірних показників у єдиний інтегральний критерій;
- мінімізував втрати інформації під час обробки та апроксимації результатів.

Вирішення зазначеної проблеми обумовлює необхідність розроблення відповідного методичного підходу до інтегрального оцінювання ефективності функціональної стійкості інформаційних систем розпізнавання образів, що і становить предмет подальшого дослідження.

3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Важливим етапом наукових досліджень у інформаційних технологій є оцінювання ефективності застосування моделей, алгоритмів та архітектур існуючих та перспективних систем розпізнавання образів [1], [2]. Для визначення наукової та практичної значущості отриманих результатів доцільно встановлювати кількісні показники ефективності функціонування системи, що дозволяє здійснювати порівняння запропонованих рішень із існуючими підходами [3].

У сучасних дослідженнях ефективність систем розпізнавання образів, зокрема систем розпізнавання емоцій на підставі мультимодальної обробки сенсорних даних [6], [7], [10], зазвичай оцінюється за окремими технічними метриками, такими як точність класифікації, швидкодія, енергоспоживання та стійкість до завад. Проте ізольоване використання окремих показників не дозволяє отримати узагальнену оцінку функціональної стійкості такої системи в умовах інформаційної невизначеності, часткової деградації сенсорних даних та змін характеристик середовища.

У роботі [4] було запропоновано профільний підхід до оцінювання ефективності складних систем шляхом формування сукупності часткових показників із подальшим їх агрегуванням. Розвиваючи цей підхід для задачі оцінювання функціональної стійкості мультимодальної системи розпізнавання образів, сформовано профіль ефективності у вигляді кортежу:

$$\langle A, L, R, S, E, Ad \rangle \quad (1)$$

де: A – стійкість точності розпізнавання образів в умовах деградації даних;

L – латентність прийняття рішення системою;
 R – робастність до шумів та завад у сенсорних каналах;
 S – стійкість до втрати окремих сенсорних модальностей;
 E – енергетична ефективність функціонування вузлів бездротової сенсорної мережі;
 Ad – адаптивність алгоритмів машинного навчання до змін параметрів середовища.

Такий профіль дозволяє врахувати різномірні аспекти функціонування системи, що не є безпосередньо зіставними між собою, але сукупно визначають рівень її функціональної стійкості. В межах запропонованого підходу здійснюється оцінювання кожного часткового показника з подальшим їх агрегуванням для формування інтегрального показника ефективності системи в цілому.

4. Мета і задачі дослідження

Метою статті є розроблення методу визначення ефективності забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем розпізнавання образів на основі експертного оцінювання з використанням інструментарію нечітких множин та методу нашарування. Запропонований підхід передбачає формування профілю часткових показників ефективності, їх інтервальне оцінювання, агрегування результатів та побудову інтегрального показника, що узагальнює рівень підвищення функціональної стійкості системи.

5. Метод експертного оцінювання ефективності забезпечення функціональної стійкості мультимодальних інформаційних систем розпізнавання образів

Опишемо алгоритм методу експертного оцінювання для визначення кількісних показників цієї ефективності. Цей алгоритм складається з таких кроків:

Крок 1. Вибір експертної групи для оцінювання ефективності.

Крок 2. Вибір типу шкали вимірювання та її ініціалізація.

Крок 3. Визначення процедури експертизи чи експертиз та їх проведення.

Крок 4. Агрегування результатів часткових показників, одержаних на основі проведених експертиз.

Крок 5. Апроксимація агрегованих результатів часткових показників для їх подальшого використання.

Крок 6. Вибір остаточних інтегральних оцінок ефективності часткових показників.

Крок 7. Агрегування інтегральних оцінок ефективності часткових показників в інтегральний показник ефективності.

Крок 8. Апроксимація інтегральних оцінок ефективності часткових показників в єдиний інтегральний показник ефективності забезпечення функціональної стійкості мультимодальної системи розпізнавання образів.

Крок 9. Виведення результатів визначення інтегрального показника ефективності у формі, зручній для користувача.

6. Результати дослідження

На основі запропонованого алгоритму було проведено обчислювальний експеримент, у межах якого визначено кількісні значення ефективності забезпечення функціональної стійкості мультимодальної системи розпізнавання образів, яка функціонує в бездротовій сенсорній мережі. Далі наведено обґрунтування реалізації етапів алгоритму при його застосуванні до досліджуваної системи.

6.1 Обґрунтування вибору шкали оцінювання

1. Для проведення експертного оцінювання з метою визначення числових показників ефективності було сформовано групу експертів, які мають відповідну підготовку та досвід у сфері інтелектуальних інформаційних систем, обробки даних та бездротових сенсорних мереж. Перед проведенням оцінювання експертам було надано опис часткових показників функціональної стійкості системи та роз'яснено процедуру оцінювання. В межах дослідження прийнято припущення про однаковий рівень компетентності експертів, що дозволяє не вводити додаткових вагових коефіцієнтів.

2. При виборі шкали вимірювання враховано, що оцінювання характеристик функціональної стійкості складних інформаційних систем має невизначений характер. Фіксовані детерміновані оцінки не завжди адекватно відображають варіативність умов функціонування системи (шум, деградація сенсорних даних, зміна параметрів середовища). Тому експертне оцінювання здійснювалося в

інтервальному вигляді за 100-відсотковою шкалою, що дозволяє відобразити діапазон можливих змін ефективності без жорсткої нормалізації.

3. Для отримання незалежних оцінок було обрано однотурову процедуру експертного оцінювання без зворотного зв'язку між експертами, що мінімізує взаємний вплив суджень та забезпечує об'єктивність результатів.

4. Для агрегування часткових показників функціональної стійкості, що утворюють профіль ефективності системи, використано метод нашарування, який дозволяє коректно поєднувати інтервальні та нечіткі оцінки.

5. З огляду на інтервальний характер отриманих результатів, здійснено їх апроксимацію трапецієподібними функціями належності нечіткій множині, що забезпечує формалізоване представлення невизначеності.

6. Для переходу від нечіткого представлення до числової інтерпретації застосовано евристику E1, згідно з якою інтегральну оцінку часткового показника доцільно визначати за верхньою основою трапеції — інтервалом, на якому функція належності набуває значення одиниці.

7. У результаті застосування евристики E1 отримано шість інтервалів - відповідно до кількості часткових показників профілю функціональної стійкості. Для їх подальшого агрегування повторно використано метод нашарування, що дозволило сформувати узагальнену геометричну фігуру інтегральної оцінки.

8. Отриману агреговану фігуру апроксимовано трапецієподібною функцією належності з метою формалізації інтегрального показника ефективності.

9. Для представлення кінцевого результату оцінювання рівня функціональної стійкості системи повторно застосовано евристику E1, що дозволило отримати інтегральний показник ефективності у вигляді єдиного числового інтервалу.

6.2 Проведення експерименту

Маючи наведені вище обґрунтування описаного методу, було проведено обчислювальний експеримент, який також опишемо покроково.

Реалізація кроку 1. Формування експертної групи у кількості 9-ти фахівців у сфері інформаційних систем розпізнавання образів та бездротових сенсорних мереж. Перед проведенням оцінювання експертам було надано опис часткових показників функціональної стійкості системи та роз'яснено особливості їх інтервального оцінювання.

Реалізація кроку 2. Запропоновано 100-відсоткову шкалу без будь-яких обмежень для усіх експертів щодо кожного елемента кортежу (1).

Реалізація кроку 3. Призначено зручний для експертів час проведення експертизи та забезпечено відповідні умови для одержання від них зворотного зв'язку.

Результати експертного оцінювання часткових показників профілю функціональної стійкості системи зведено в таблиці 1–6 відповідно до елементів кортежу (1).

Таблиця 1

Результати експертного оцінювання стійкості системи в умовах деградації даних

Назва експерта	Нижня границя інтервалу, %	Верхня границя інтервалу, %
Експерт 1	45	50
Експерт 2	25	35
Експерт 3	30	35
Експерт 4	35	40
Експерт 5	30	35
Експерт 6	20	30
Експерт 7	35	45
Експерт 8	20	30
Експерт 9	15	25

Таблиця 2

Результати експертного оцінювання латентності прийняття рішення системою

Назва експерта	Нижня границя інтервалу, %	Верхня границя інтервалу, %
----------------	----------------------------	-----------------------------

Експерт 1	30	40
Експерт 2	35	45
Експерт 3	30	45
Експерт 4	25	35
Експерт 5	40	50
Експерт 6	45	60
Експерт 7	40	55
Експерт 8	20	25
Експерт 9	25	35

Таблиця 3

Результати експертного оцінювання робастності до шумів та завад у сенсорних каналах

Назва експерта	Нижня границя інтервалу, %	Верхня границя інтервалу, %
Експерт 1	30	45
Експерт 2	25	35
Експерт 3	20	45
Експерт 4	30	40
Експерт 5	35	55
Експерт 6	45	60
Експерт 7	50	55
Експерт 8	40	60
Експерт 9	50	55

Таблиця 4

Результати експертного оцінювання стійкості до втрати окремих сенсорних модальностей

Назва експерта	Нижня границя інтервалу, %	Верхня границя інтервалу, %
Експерт 1	55	70
Експерт 2	50	60
Експерт 3	40	55
Експерт 4	30	45
Експерт 5	35	50
Експерт 6	45	55
Експерт 7	55	65
Експерт 8	50	65
Експерт 9	40	55

Таблиця 5

Результати експертного оцінювання енергетичної ефективності функціонування вузлів бездротової сенсорної мережі

Назва експерта	Нижня границя інтервалу, %	Верхня границя інтервалу, %
Експерт 1	35	50
Експерт 2	20	30
Експерт 3	30	40
Експерт 4	50	60
Експерт 5	45	55
Експерт 6	40	55
Експерт 7	25	30
Експерт 8	30	45
Експерт 9	35	50

Таблиця 6

Результати експертного оцінювання адаптивності алгоритмів машинного навчання до змін параметрів зовнішнього середовища

Назва експерта	Нижня границя інтервалу, %	Верхня границя інтервалу, %
Експерт 1	25	40
Експерт 2	20	35
Експерт 3	25	40
Експерт 4	25	45
Експерт 5	30	50
Експерт 6	45	50
Експерт 7	40	55
Експерт 8	45	60
Експерт 9	30	45

Реалізація кроку 4. Ілюстрацію агрегування результатів часткових показників наведено на рисунках 1-6.

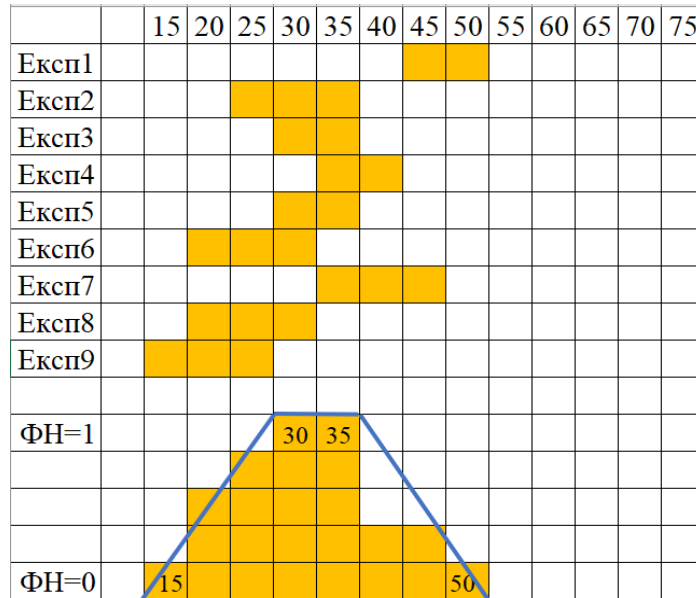


Рис. 1. Ілюстрація агрегування результатів оцінювання першого часткового показника A

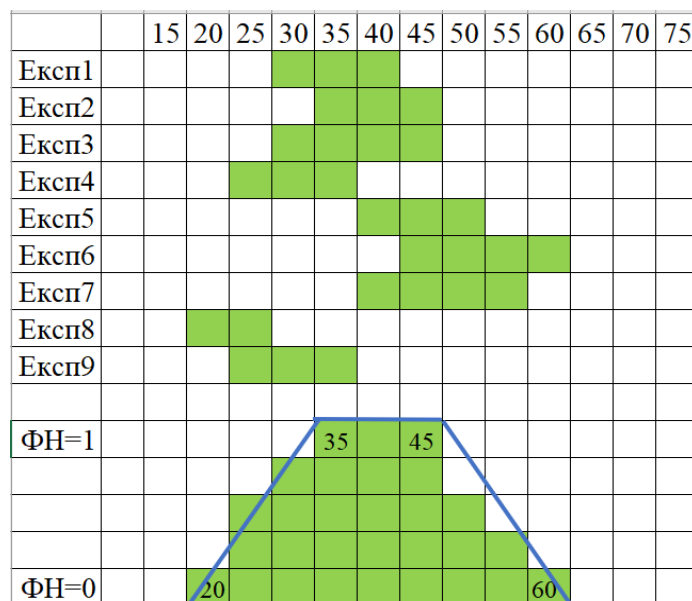


Рис. 2. Ілюстрація агрегування результатів оцінювання другого часткового показника L

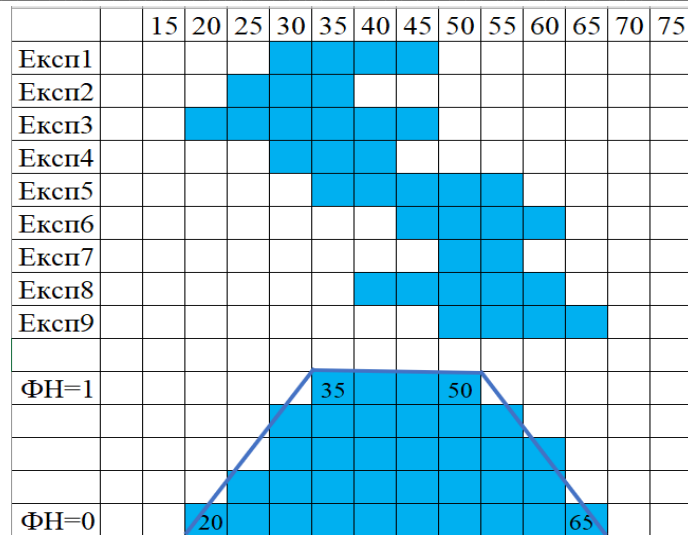


Рис. 3. Ілюстрація агрегування результатів оцінювання третього часткового показника R

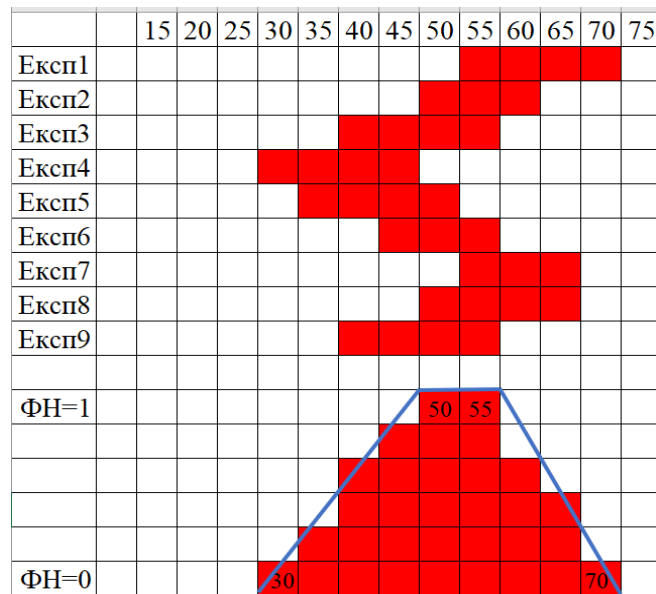


Рис. 4. Ілюстрація агрегування результатів оцінювання четвертого часткового показника S

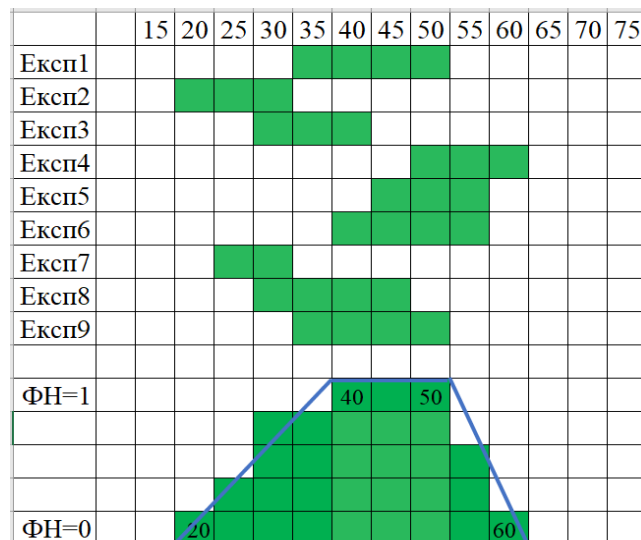


Рис. 5. Ілюстрація агрегування результатів оцінювання п'ятого часткового показника E

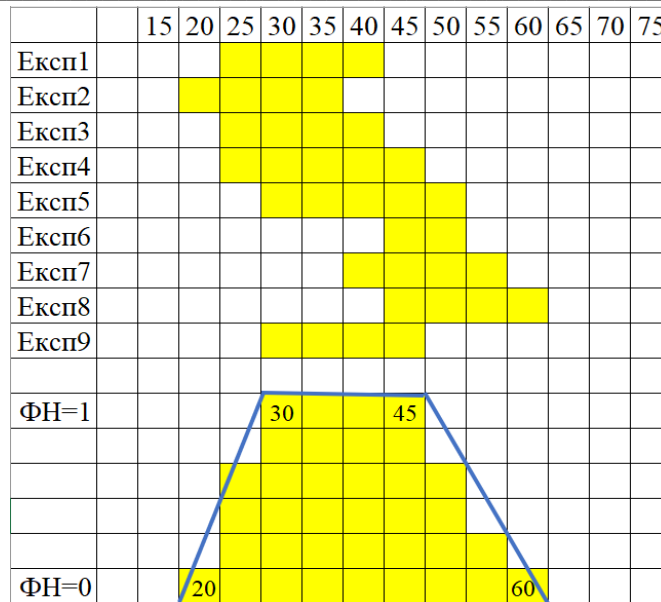


Рис. 6. Ілюстрація агрегування результатів оцінювання шостого часткового показника Ad

Реалізація кроку 5. Ілюстрація апроксимації агрегованих результатів часткових показників наведено в нижніх частинах рисунків 1-6.

Наведемо формули, які аналітично задають трапецієподібні функції належності, які представлено в нижніх частинах рисунків 1-6.

$$\mu_T^{(1)}(x, 15, 30, 35, 50) = \begin{cases} 0, & x \leq 15 \\ \frac{x-15}{15}, & 15 \leq x \leq 30 \\ 1, & 30 \leq x \leq 35 \\ \frac{50-x}{15}, & 35 \leq x \leq 50 \\ 0, & x \geq 50 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_T^{(2)}(x, 20, 35, 45, 50) = \begin{cases} 0, & x \leq 20 \\ \frac{x-20}{15}, & 20 \leq x \leq 35 \\ 1, & 35 \leq x \leq 45 \\ \frac{50-x}{5}, & 45 \leq x \leq 50 \\ 0, & x \geq 50 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_T^{(3)}(x, 20, 35, 50, 65) = \begin{cases} 0, & x \leq 20 \\ \frac{x-20}{15}, & 20 \leq x \leq 35 \\ 1, & 35 \leq x \leq 50 \\ \frac{65-x}{15}, & 50 \leq x \leq 65 \\ 0, & x \geq 65 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_T^{(4)}(x, 30, 50, 55, 70) = \begin{cases} 0, & x \leq 30 \\ \frac{x-30}{20}, & 30 \leq x \leq 50 \\ 1, & 50 \leq x \leq 55 \\ \frac{70-x}{15}, & 55 \leq x \leq 70 \\ 0, & x \geq 70 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_T^{(5)}(x, 20, 40, 50, 60) = \begin{cases} 0, & x \leq 20 \\ \frac{x-20}{20}, & 20 \leq x \leq 40 \\ 1, & 40 \leq x \leq 50 \\ \frac{60-x}{10}, & 50 \leq x \leq 60 \\ 0, & x \geq 60 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_T^{(6)}(x, 20, 30, 45, 60) = \begin{cases} 0, & x \leq 20 \\ \frac{x-20}{10}, & 20 \leq x \leq 30 \\ 1, & 30 \leq x \leq 45 \\ \frac{60-x}{15}, & 45 \leq x \leq 60 \\ 0, & x \geq 60 \end{cases} \quad (7)$$

Реалізація кроку 6. Результати вибору остаточних інтегральних оцінок ефективності часткових показників зведемо в таблицю 7.

Таблиця 7

Результати вибору остаточних інтегральних оцінок ефективності часткових показників ефективності

№ пп	Назва часткового показника	Нижня границя інтервалу, %	Верхня границя інтервалу, %
1	<i>A</i> – стійкість точності розпізнавання об’єктів в умовах деградації даних	30	35
2	<i>L</i> – латентність прийняття рішення системою;	35	45
3	<i>R</i> – робастність до шумів та завад у сенсорних каналах;	35	50
4	<i>S</i> – стійкість до втрати окремих сенсорних модальностей;	50	55
5	<i>E</i> – енергетична ефективність функціонування вузлів бездротової сенсорної мережі;	40	50
6	<i>Ad</i> – адаптивність алгоритмів машинного навчання до змін параметрів середовища.	30	45

Реалізація кроку 7. Ілюстрація агрегування інтегральних оцінок ефективності часткових показників в інтегральний показник ефективності наводиться на рисунку 7.

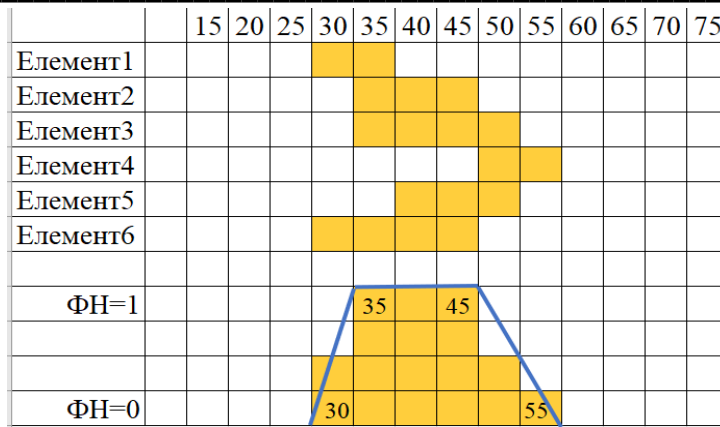


Рис. 7. Ілюстрація апроксимації інтегральних оцінок ефективності часткових показників в єдиний інтегральний показник ефективності у вигляді функції належності

Реалізація кроку 8. Ілюстрація апроксимації інтегральних оцінок ефективності часткових показників в єдиний інтегральний показник ефективності у вигляді функції належності наводиться в нижній частині рисунку 7.

Формулу, яка аналітично задає трапецієподібну функцію належності, представлену в нижній частині рисунку 7, запишемо у вигляді:

$$\mu_T^{Ефект}(x, 30, 35, 45, 55) = \begin{cases} 0, & x \leq 30 \\ \frac{x-35}{5}, & 30 \leq x \leq 35 \\ 1, & 35 \leq x \leq 45 \\ \frac{55-x}{10}, & 45 \leq x \leq 55 \\ 0, & x \geq 55 \end{cases} \quad (8)$$

Реалізація кроку 9. Виведення результатів визначення інтегрального показника ефективності у формі, зручній для користувача, як це представлено у таблиці 8.

Таблиця 8

Кількісні експертні оцінки підвищення ефективності забезпечення функціональної стійкості системи

№ пп	Назва складової функціональної стійкості системи	Границі інтервалів, %
1	A – стійкість точності розпізнавання емоцій в умовах деградації даних	25-30
2	L – латентність прийняття рішення системою;	35-45
3	R – робастність до шумів та завад у сенсорних каналах;	35-45
4	S – стійкість до втрати окремих сенсорних модальностей;	55-60
5	E – енергетична ефективність функціонування вузлів бездротової сенсорної мережі;	45-50
6	Ad – адаптивність алгоритмів машинного навчання до змін параметрів зовнішнього середовища.	35-40

7. Висновки та перспективи подальших досліджень

У статті розроблено метод визначення ефективності забезпечення функціональної стійкості мультимодальної системи розпізнавання образів, що функціонує в умовах невизначеності та часткової деградації сенсорних даних. Метод ґрунтується на формуванні профілю часткових показників та їх агрегуванні в єдиний інтегральний показник із використанням методу нашарування та апарату нечітких множин.

Запропонований підхід забезпечує:

- формалізацію профілю ефективності у вигляді вектора часткових технічних показників;
- можливість використання інтервальних експертних оцінок без жорсткої нормалізації;

- агрегування неоднорідних та незіставних характеристик у єдиний інтегральний критерій;
- мінімізацію втрат інформації під час апроксимації результатів.

Отриманий інтегральний показник дозволяє здійснювати комплексне оцінювання рівня функціональної стійкості системи та може бути використаний для порівняння альтернативних алгоритмічних і архітектурних рішень у бездротових сенсорних мережах.

Практичне значення результатів полягає у можливості застосування розробленого методу для оцінювання доцільності впровадження та модернізації розглянутих в роботі систем.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у адаптації методу нашарування до задачі інтегрального оцінювання функціональної стійкості мультимодальних систем розпізнавання образів з урахуванням специфіки деградації сенсорних каналів та нечіткості експертних оцінок технічних характеристик.

Внесок авторів. Олексій Гнатієнко – концептуалізація; Ганна Терещук – збір емпіричних даних; Владислав Сингаївський – аналіз джерел, підготовка теоретичних основ дослідження.

Декларація про штучний інтелект

Під час підготовки цієї статті інструменти штучного інтелекту не використовувалися. Усі етапи підготовки рукопису, включаючи формулювання ідей, аналіз джерел, обробку результатів дослідження та написання тексту, виконані авторами самостійно.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність будь-якого конфлікту інтересів. Під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Роботу виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності та етичних норм проведення наукових досліджень.

Список використаної літератури

1. Бойко, Ю. М., Дружинін, В. А., & Толпопа, С. В. (2018). Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завод. Київ: Логос.
2. Бойко, Ю. М., Полікарівських, О. І., Ткачук, В. П., & Карпова, Л. В. (2023). Програмно-конфігуровані системи передавання, приймання та обробки інформації. Хмельницький: ХНУ.
3. Толпопа, С. В. (2012). Метод багатокритеріального аналізу ефективності функціонування та забезпечення інформаційної безпеки інфокомунікаційних систем. *Захист інформації*, 14(3), 81–86. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.14.3371>
4. Гнатієнко, О. (2025). Схема визначення ефективності забезпечення функціональної стійкості організаційних систем. У В. Є. Снитюк (Ред.), *Інтелектуальні рішення-S: Матеріали міжнародного симпозиуму* (с. 80–82). Київ: Каравела.
5. Гнатієнко, Г. М., & Гнатієнко, О. Г. (2024). Метод визначення нечітких значень відносної важливості характеристик альтернатив з використанням способу нашарування. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Математика і інформатика*, 45(2), 172–187. [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45\(2\).172-187](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45(2).172-187)
6. Pan, B., Hirota, K., Jia, Z., & Dai, Y. (2023). A review of multimodal emotion recognition from datasets, preprocessing, features, and fusion methods. *Neurocomputing*, 561, 126866. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.126866>
7. Zhang, S., Yang, Y., Chen, C., Zhang, X., Leng, Q., & Zhao, X. (2024). Deep learning-based multimodal emotion recognition from audio, visual, and text modalities: A systematic review. *Expert Systems with Applications*, 237, 121692. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121692>
8. Chen, X., et al. (2022). Analysis of multimodal data fusion from an information theory perspective. *Information Sciences*, 608, 1030–1045.
9. Abdullah, M., et al. (2023). Enhanced multimodal biometric recognition systems based on deep learning techniques. *Sensors*, 23.
10. Liu, W., Qiu, J., Zheng, W., & Lu, B. (2021). Comparing recognition performance and robustness of multimodal deep learning models for emotion recognition. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 14, 715–729.

References

1. Boiko, Y. M., Druzhynin, V. A., & Toliupa, S. V. (2018). Theoretical aspects of improving noise immunity and efficiency of signal processing in radio engineering devices and telecommunication systems under interference conditions. Kyiv: Logos.
2. Boiko, Y. M., Polikarovskiykh, O. I., Tkachuk, V. P., & Karpova, L. V. (2023). Software-defined systems for transmission, reception, and information processing. Khmelnytskyi: KhNU.
3. Toliupa, S. V. (2012). Method of multicriteria analysis of efficiency of functioning and ensuring information security of infocommunication systems. *Information Protection*, 14(3), 81–86. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.14.33715>
4. Hnatiienko, O. (2025). Scheme for determining the effectiveness of ensuring functional stability of organizational systems. In V. Ye. Snytiuk (Ed.), *Intelligent Solutions-S: Proceedings of the International Symposium* (pp. 80–82). Kyiv: Karavela.
5. Hnatiienko, H. M., & Hnatiienko, O. H. (2024). Method for determining fuzzy values of the relative importance of alternative characteristics using the layering method. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: Mathematics and Informatics*, 45(2), 172–187. [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45\(2\).172-187](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45(2).172-187)
6. Pan, B., Hirota, K., Jia, Z., & Dai, Y. (2023). A review of multimodal emotion recognition from datasets, preprocessing, features, and fusion methods. *Neurocomputing*, 561, 126866. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.126866>
7. Zhang, S., Yang, Y., Chen, C., Zhang, X., Leng, Q., & Zhao, X. (2024). Deep learning-based multimodal emotion recognition from audio, visual, and text modalities: A systematic review. *Expert Systems with Applications*, 237, 121692. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121692>
8. Chen, X., et al. (2022). Analysis of multimodal data fusion from an information theory perspective. *Information Sciences*, 608, 1030–1045.
9. Abdullah, M., et al. (2023). Enhanced multimodal biometric recognition systems based on deep learning techniques. *Sensors*, 23.
10. Liu, W., Qiu, J., Zheng, W., & Lu, B. (2021). Comparing recognition performance and robustness of multimodal deep learning models for emotion recognition. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 14, 715–729.

Надійшла до редакції: 05.12.25

Прийнята до друку: 17.03.26

Опубліковано: 30.03.26