

УДК 681.518.3:666.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-11>

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ КЕРАМІЧНОЇ ПЛИТКИ НА ОСНОВІ БАЗИ ЗНАНЬ ПРО ВБУДОВУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ВИРОБІВ ВІДПОВІДНОГО СОРТУ

Сагайда Павло Іванович,

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри цифрових технологій
та проєктно-аналітичних рішень
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-4700-8160

Гетьман Ірина Анатоліївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри цифрових технологій
та проєктно-аналітичних рішень
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-1835-4256

Касьянюк Олександр Сергійович,

старший викладач кафедри цифрових технологій
та проєктно-аналітичних рішень
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-8215-0920

У статті розглядається проблема автоматизації процесу контролю якості та сортування керамічної облицювальної плитки. Здійснено критичний аналіз впроваджених нині інформаційно-вимірювальних систем, які базуються на експертному доборі ознак фрагментів зображень для контролю якості поверхні плитки. Визначено особливості таких систем: негнучкість та залежність від навчальних даних; висока вартість та тривалість розробки (добір та обґрунтування нових ознак для кожної зміни технологічного процесу вимагає значних витрат часу та ресурсів); низька оперативність та високі обчислювальні витрати при обрахуванні великої кількості різномірних ознак сегментів зображень; залежність від масштабу зображення й дефектів (інформативність експертно дібраних ознак залежить від масштабу зображення та розміру самих дефектів); відсутність гарантії оптимальності для дібраних вручну ознак. Доведено, що такий підхід є неефективним, негнучким та ресурсовитратним, особливо в умовах мінливого керамічного виробництва. Запропоновано новий підхід до створення інформаційно-вимірювальної системи контролю якості, що базується на використанні машинного зору з глибокою нейронною мережею та векторною базою даних. На відміну від наявних рішень, які використовують емпіричні функції та експертний добір характеристик зображень, запропонована система використовує вбудовування (embedding) зображень у багатовимірний семантичний простір за допомогою переднавченої згорткової нейронної мережі. Розроблено структурно-функціональну схему процесу аналізу та сортування, яка містить два основні етапи: підготовку векторної бази даних з вбудовуваннями зображень еталонних плиток та автоматизацію сортування на технологічній лінії на основі підтримки ухвалення рішень про якість виробу шляхом порівняння вбудовувань зображень. Запропоноване рішення дає змогу уникнути проблем, пов'язаних із суб'єктивністю експертних оцінок та великим обчислювальним навантаженням під час контролю в реальному часі з використанням раніше впроваджених систем контролю.

Ключові слова: автоматизація контролю якості, сортування керамічної плитки, згорткова нейронна мережа, векторна база даних.

Sahaida Pavlo, Getman Iryna, Kasianiuk Oleksandr. Information and measurement system for quality control of ceramic tiles based on a knowledge base for embedding images of products of the corresponding grade

The article considers the problem of automating the process of quality control and sorting of ceramic wall tiles. A critical analysis of currently implemented information and measurement systems based on expert selection of features of image fragments for quality control of the tile surface is conducted. The following features of such systems are identified: inflexibility and dependence on training data; high cost and duration of development (selection and justification of new features for each change in the technological process requires significant time and resources);

low efficiency and high computational costs when calculating a large number of heterogeneous features of image segments; dependence on the scale of the image and defects (the informativeness of expertly selected features depends on the scale of the image and the size of the defects themselves); lack of a guarantee of optimality for manually selected features. It has been proven that this approach is inefficient, inflexible and resource-consuming, especially in the conditions of variable ceramic production. A new approach to creating an information-measuring quality control system based on the use of machine vision with a deep neural network and a vector database is proposed. Unlike existing solutions that use empirical functions and expert selection of image characteristics, the proposed system uses image embedding in a multidimensional semantic space using a pre-trained convolutional neural network. A structural and functional diagram of the analyzing and sorting process has been developed, which includes two main stages: preparation of a vector database with image embeddings of reference tiles and automation of sorting on the production line based on decision-making support for product quality by comparing image embeddings. The proposed solution avoids problems associated with the subjectivity of expert assessments and the high computational load of real-time control using previously implemented control systems.

Key words: quality control automation, ceramic tile sorting, convolutional neural network, vector database.

Вступ. Як показує практика, найменш автоматизованою ділянкою підприємств з виробництва облицювальної плитки залишається ділянка сортування готової продукції (за критеріями, визначеними в технічних умовах і стандартах на конкретний вид продукції). У роботах [1–3] розвинуто підходи до побудови інформаційно-вимірювальних систем (далі – ІВС) контролю якості керамічних виробів шляхом отримання та аналізу зображень зовнішнього вигляду керамічних виробів (облицювальних плиток), розглянуто питання отримання якісних зображень в умовах виробництва, досліджено ознаки фрагментів зображень, що належать до дефектів зовнішнього вигляду виробів, які дали змогу визначити найбільш інформативні, на думку дослідників та для використаного корпусу зображень, ознаки. Побудова на основі дібраних ознак ІВС контролю якості виробів із застосуванням нейронно нечіткої мережі як класифікатора, що обробляє вектори числових характеристик ознак та прогнозує оцінку якості зовнішнього вигляду, дала змогу отримати досить стійкий до завад технологічного процесу результат та частково автоматизувати процес контролю виробів безпосередньо на конвеєрній лінії керамічного підприємства. Однак таке рішення, дослідно впроваджене на керамічному підприємстві ПрАТ «Зевс-Кераміка» м. Слов'янськ [4], виявило низку проблем, що залишаються невирішеними на відповідному етапі розвитку ІВС. Так, застосування експертного добору характеристик ознак фрагментів зображень, що відповідають дефектам поверхні плиток, призводить до негнучкості системи контролю, труднощів її налаштування під час змін у технології виготовлення плиток, тому що ефективність застосування ознак при розв'язанні задачі класифікації плиток відповідає тільки конкретним навчальним вибіркам об'єктів контролю і може швидко та суттєво погіршуватися в різних технологічних умовах. Відповідно, добір та обґрунтування нових

ознак потребує великих витрат часу й ресурсів. Окрім того, гарантій, що дібрані «вручну» (тобто шляхом досліджень за відповідними методиками [4]) ознаки та навчені на їх основі моделі є близькими до оптимальних, немає в умовах обмеженості ресурсів на дослідження. Іншою проблемою є недостатня оперативність систем такого типу, яка виникає завдяки великим обсягам різномірних обчислень запропонованих ознак сегментів зображень, що потребує відповідних обчислювальних потужностей та викликає затримки на конвеєрних лініях. Зі свого боку, скорочення ознак, що обчислюються, знижує якість обробки даних до такого рівня, який не відповідає вимогам технічного контролю. Крім того, інформативність ознак, що запропоновані до використання в системі з розглянутою архітектурою, значно залежать від масштабів зображення та масштабів самих дефектів, що спричиняє помилки при класифікації виробів.

Мета роботи – розробити підхід до створення інформаційно-вимірювальної системи контролю якості зовнішнього вигляду облицювальної плитки в процесі її виготовлення з використанням машинного зору, організованого на основі бази знань про вбудовування зображень виробів відповідного сорту та глибокої нейронної мережі.

Для досягнення цієї мети потрібно: проаналізувати наявні підходи до опису зображень поверхні виробів; можливості вбудовування фрагментів зображень та застосування векторної бази даних для швидкого пошуку близьких вбудовувань серед збережених та класифікованих фрагментів, підтримки ухвалення рішень про сорт виробу; розробити структурно-функціональну схему процесу аналізу та сортування для реалізації відповідного технічного рішення.

Методи та методики дослідження. У процесі контролю якості поверхні (зовнішнього вигляду) облицювальних плиток шляхом обробки їх зображень після сегментації зображення, виявлення сегментів, що не входять до

складу зображення бездефектної плитки, розпізнавання типу дефекту й оцінки його параметрів [3–4], а також формування морфологічного опису переліку й координат дефектів на досліджуваній плитці, необхідно підтримати виконання важливого завдання – сортування плитки шляхом співвіднесення її зображення із зображенням плитки першого, другого сорту або бракованої. Це завдання є досить складним через такі причини. Нині наявні стандарти сортування плиток [5] є застарілими з огляду на швидку зміну технології її виготовлення та застосування. Також ці стандарти, як і весь процес сортування загалом, украй суб'єктивні. Зокрема, низка дефектів припустимі за умови, що вони непомітні на певній відстані від плитки. На процес сортування також впливають заводські регламенти й технічні вимоги, а також вимоги замовників та споживачів. У цих умовах недоцільним є використання алгоритмічного програмного забезпечення, що реалізує методи неглибокого машинного навчання. Навчання моделей на основі текстурних, контурних, кольорових ознак окремих сегментів на зображенні плитки, створення на основі цих моделей баз правил для виконання сортування плитки в реальному маркетинговому та виробничому процесі є складним і дорогим заходом з ненадійними результатами.

Автор розробки [4] запропонував використовувати емпіричну функцію інтенсивності потоку дефектів для кожної плитки для сортування плитки за результатами виявлення та розпізнавання її дефектів зовнішнього вигляду. Як і будь-яка емпірична функція, вона є результатом суб'єктивного аналізу та синтезу, який задовільно відповідає обмеженим умовам конкретного підприємства, і не може бути масштабованою без додаткових експериментальних досліджень.

Підхід, який запропоновано в цій роботі, базується на іншому методі узагальнення оцінки зовнішнього вигляду облицювальної плитки, а саме – вбудовуванню зображень наборів плиток, які розглядають оператори-контролери як такі, що належать до відповідного сорту готової продукції. Вбудовування [6] може бути виконано із залученням переднавчених глибоких нейронних мереж, що дає змогу розташувати зображення в багатовимірному семантичному просторі, отримати векторний опис кожного зображення й використати швидкий пошук у такому просторі для з'ясування належності зображення плитки на поточному етапі виготовлення до зображень плиток, які належать відповідному сорту. Сортність взірцевих плиток

визначається до етапу отримання їх вбудовувань на основі вимог замовників та нормативних документів підприємств. Такий підхід дає змогу позбутися більшості проблем, які виникають під час розроблення ознак зображень з використанням складних математичних моделей, що базуються на цих ознаках, та суб'єктивних дослідних обґрунтувань їх інформативності та адекватності.

Результати. У статті запропоновано рішення з удосконалення ІВС контролю якості зовнішнього вигляду керамічних виробів з використанням бази знань про зображення дефектів поверхонь, яка формується на основі векторного представлення дефектів. Формування векторного представлення пропонується забезпечити за допомогою наперед навченої глибокої згорткової нейронної мережі (приклад дослідження ефективності видобутку високорівневих ознак зображень плитки з використанням згорткових мереж наведено в [7]), що не потребуватиме додаткових досліджень ознак і дасть змогу виконати вбудовування (embedding) зображень, що обробляються, у багатовимірний семантичний простір. Це, зі свого боку, дасть змогу представляти зображення плиток або окремих типів дефектів на їх поверхні у вигляді векторів (стовпців координат зображень у цьому просторі), а базу знань про можливі дефекти або припустимі зображення плиток відповідного сорту організувати під управлінням спеціалізованої (векторної) системи управління базами даних (далі – СУБД).

Використання векторної СУБД спрощує та прискорює пошук близьких за вбудовуванням зображень дефектів, якщо ІВС зорієнтована на пошук окремих дефектів на поверхні. У такому разі після знаходження відповідних сегментів потрібно далі виконати детальну обробку контурів, текстури та кольорового забарвлення сегмента зображення, щоб далі навчати класифікатор, наприклад, на основі нейронно нечіткої мережі. Однак такий підхід не компенсує раніше розглянутих недоліків, пов'язаних з великим обчислювальним навантаженням у режимі контролю в реальному масштабі часу на технологічних лініях.

Тому пропонується застосувати підхід до створення ІВС, структурно-функціональна схема роботи якої у вигляді діаграми в нотатції SADT представлена на рисунку 1. SADT (Structured Analysis and Design Technique) – методологія функціонального моделювання, яка описує систему як мережу функцій (активностей), пов'язаних між собою потоками даних та керування [8]. Діаграма на рисунку 1 відображає

процес аналізу та сортування керамічної плитки з використанням глибокої згорткової нейронної мережі (Deer CNN) та векторної бази даних (наприклад, Weavate або Faiss [9]). Процес поділено на два основні етапи.

Етап 1. Етап навчання (підготовки векторної бази даних з убудовуваннями зображень облицювальних плиток відповідного сорту): створення та наповнення бази даних векторними представленнями (embeddings) зображень взірцевих плиток. Цей етап містить такі активності та сутності, які беруть у них участь:

- A1: Векторизація (embedding) взірцевих зображень;
- A2: Поповнення векторної бази даних.

Етап 2: Етап сортування на технологічній лінії (підтримки ухвалення рішень про якість виробу). Цей етап передбачає такі активності:

- A4: Векторизація (embedding) вхідних зображень, отриманих на технологічній лінії;
- A3: Обробка запиту до векторної СУБД на пошук близьких зображень;
- A5: Підтримка ухвалення рішень про якість виробу за результатами пошуку в базі даних та обробки цього результату.

Особливостями запропонованого технічного рішення для реалізації ІВС контролю якості зовнішнього вигляду облицювальної плитки є використання глибокої згорткової нейронної

мережі з попередньо навченими параметрами, яка забезпечує обчислення вбудовувань для зображень та дає змогу ефективно представляти зображення в багатовимірному семантичному просторі, що спрощує та прискорює пошук і порівняння зображень облицювальних плиток на конвеєрі та взірцевих плиток у базі даних. Модуль підтримки ухвалення рішень ІВС може використовувати результати пошуку для автоматичного сортування плитки, визначаючи результат мажоритарного голосування для групи найближчих зображень, що відповідають сорту, визначеному при наповненні бази даних операторами технологічного процесу та експертами предметної сфери.

Висновки.

1. Запропоновано новий підхід до створення інформаційно-виміральної системи контролю якості, який базується на використанні глибокої згорткової нейронної мережі з попередньо навченими параметрами, вбудовуванні (embedding) зображень у багатовимірний семантичний простір, застосуванні векторної бази даних для швидкого пошуку схожих зображень.

2. Розроблена структурно-функціональна схема інформаційно-виміральної системи забезпечує ефективну векторизацію зображень еталонних зразків та контрольованих виробів, швидкий пошук близьких за характеристиками

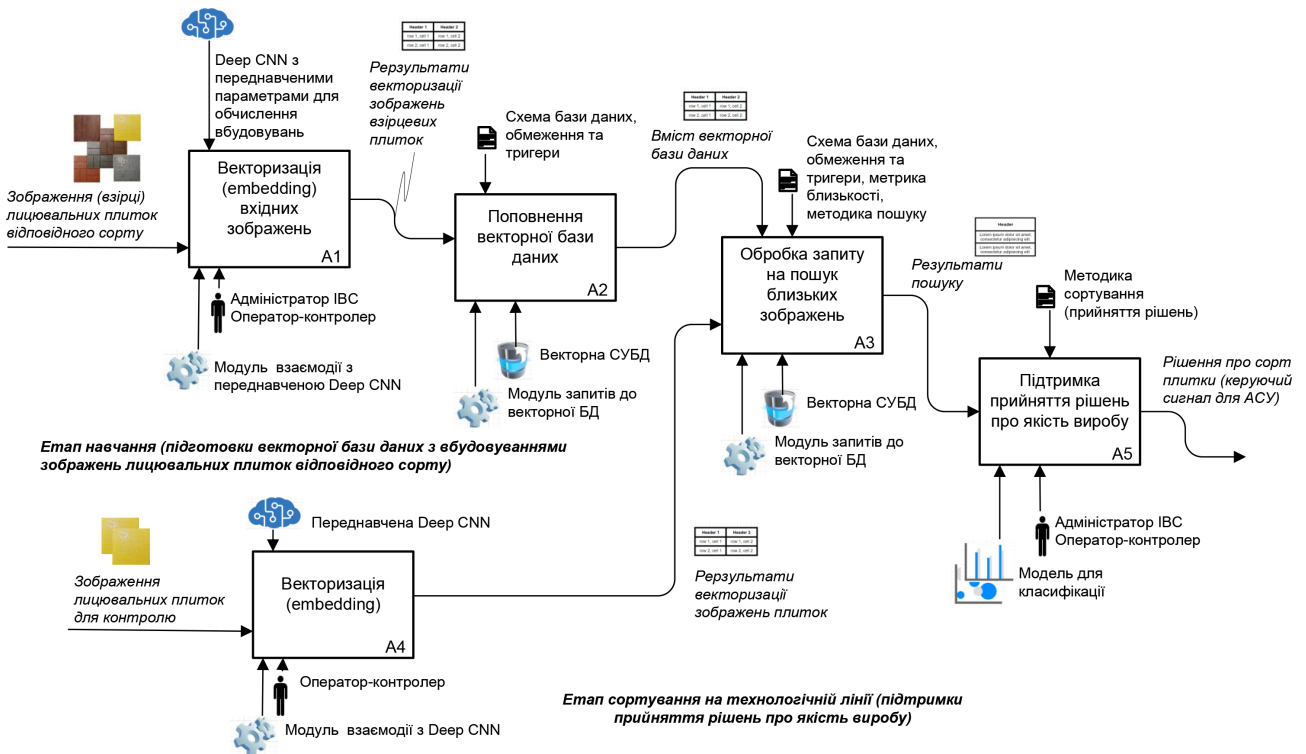


Рис. 1. Структурно-функціональна схема роботи ІВС, що забезпечує процес аналізу та сортування керамічної плитки з використанням глибокої згорткової нейронної мережі (Deer CNN) та векторної бази даних

зображень у базі даних, автоматизовану підтримку ухвалення рішень щодо сортування продукції.

3. Запропоноване технічне рішення дає змогу уникнути проблем, пов'язаних з експертним відбором характеристик зображень та ознак їх сегментів в наявних системах, зменшити обчислювальне навантаження при контролі в реальному часі, підвищити гнучкість системи при зміні

технологічних умов виробництва, забезпечити об'єктивність процесу контролю якості.

4. Практична цінність розробленої системи полягає в зниженні витрат на залучення фахівців-контролерів, зменшенні втрат від помилок сортування, підвищенні ефективності управління виробничим процесом, можливості інтеграції з автоматизованою системою управління підприємством.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Getman I.A. Measuring control of ceramic tiles at processing of their images and decision-making about a sort in the informatively-measuring system. *Research and Technology: Step into the Future*. 2009. Vol. 4, No 4. TSI, Riga. P. 20–21.

2. Meena Y., Mittal A. Blobs and Cracks Detection on Plain Ceramic Tile Surface. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2013. Vol. 3, No. 7. P. 647–652.

3. Sanghadiya, Foram & Mistry, Dr. Surface Defect Detection in a Tile using Digital Image Processing: Analysis and Evaluation. *International Journal of Computer Applications*. 2015. Vol 116, No. 10. P. 33–35. <https://doi.org/10.5120/20375-2592>

4. Гетьман І. А. Рішення задач класифікації при вимірювальному контролі керамічних плиток та прийняття рішення про сорт. *Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод* : матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Краматорськ, 19–21 квітня 2018 р. Краматорськ : ДДМА, 2018. С. 132–133.

5. ДСТУ EN 14411:2019 (EN 14411:2012, IDT) Плитки керамічні. Визначення, класифікація, характеристики, оцінка відповідності та маркування : затв. наказом ДП «УкрНДНЦ» від 18.12.2019 № 442. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0442774-19#Text> (дата звернення: 22.11.2024).

6. Rostami, Mohammad. *Transfer Learning Through Embedding Spaces*. CRC Press LLC, 2021. 220 p.

7. Stephen, Okeke, Maduh, Uchenna, Sain, Mangal. A Machine Learning Method for Detection of Surface Defects on Ceramic Tiles Using Convolutional Neural Networks. *Electronics*. 2022, Vol. 11(1), No. 55. <https://doi.org/10.3390/electronics11010055>

8. John Mylopoulos. Conceptual Modelling III. Structured Analysis and Design Technique (SADT). URL: <http://www.cs.toronto.edu/~jm/2507S/Notes04/SADT.pdf> (дата звернення 22.11.2024).

9. Plaban Nayak. Which Vector Database Should You Use? Choosing the Best One for Your Needs. *Medium*. URL: <https://medium.com/the-ai-forum/which-vector-database-should-you-use-choosing-the-best-one-for-your-needs-5108ec7ba133> (дата звернення 22.11.2024).

REFERENCES:

1. Getman, I.A. (2009). Measuring control of ceramic tiles at processing of their images and decision-making about a sort in the informatively-measuring system. *Research and Technology: Step into the Future*, 4(4), 20–21.

2. Meena, Y., & Mittal, A. (2013). Blobs and Cracks Detection on Plain Ceramic Tile Surface. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 3(7), 647–652.

3. Sanghadiya, Foram & Mistry, Dr. (2015). Surface Defect Detection in a Tile using Digital Image Processing: Analysis and Evaluation. *International Journal of Computer Applications*, 116(10), 33–35. <https://doi.org/10.5120/20375-2592>

4. Getman, I.A. (2018). Rishennia zadach klasyfikatsii pry vymiryvalnomu kontroli keramichnykh plytok ta pryiniattia rishennia pro sort. *Suchasni informatsiini tekhnolohii, zasoby avtomatyzatsii ta elektropryvod* : materialy II Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii [Solving classification problems during the measurement control of ceramic tiles and making a decision on the grade. Modern information technologies, automation tools and electric drive: materials of the II All-Ukrainian scientific and technical conference]. Donbass State Machine Building Academy. Kramatorsk. P. 132–133 [in Ukrainian].

5. DSTU EN 14411:2019 (EN 14411:2012, IDT) Plytky keramichni. Vyznachennia, klasyfikatsiia, kharakterystyky, otsinka vidpovidnosti ta markuvannia [Ceramic tiles. Definition, classification, characteristics, type rating and marking]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0442774-19#Text> [in Ukrainian].

6. Rostami, Mohammad. (2021). *Transfer Learning Through Embedding Spaces*. CRC Press LLC.

7. Stephen, Okeke, Maduh, Uchenna & Sain, Mangal. (2022). A Machine Learning Method for Detection of Surface Defects on Ceramic Tiles Using Convolutional Neural Networks. *Electronics*, 11(55). <https://doi.org/10.3390/electronics11010055>.

8. John Mylopoulos. *Conceptual Modelling III. Structured Analysis and Design Technique (SADT)*. Retrieved from <http://www.cs.toronto.edu/~jm/2507S/Notes04/SADT.pdf>

9. Plaban Nayak. (2024, April 19). *Which Vector Database Should You Use? Choosing the Best One for Your Needs*. Medium. Retrieved from <https://medium.com/the-ai-forum/which-vector-database-should-you-use-choosing-the-best-one-for-your-needs-5108ec7ba133>