

УДК 621.878.25

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-5>

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЗАВАНТАЖЕННЯ ЕКСКАВАТОРА

Налобіна Олена Олександрівна,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-1661-7331

Голотюк Микола Віталійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3661-4437

Бундза Олег Зіновійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3770-0273

Виконання земляних робіт одноківшевим екскаватором зазвичай складається із трьох основних операцій: відокремлення ґрунту від масиву та захоплення, його переміщення та подальше вкладення. Розрахунки продуктивності та встановлення робочих розмірів екскаваторів під час їх проєктування безпосередньо пов'язані з поняттям екскаваторного забою й об'ємом розробленого ґрунту. Для вирішення цього завдання було запропоновано впровадити систему контролю стану екскаваторних зубів і оповіщення в реальному часі. Ця система дозволить працівникам своєчасно оцінити стан зубів і вжити заходів для їх заміни, що запобігатиме простоям обладнання, сприятиме економії грошей і часу.

Одним із варіантів реалізації цієї системи є встановлення на екскаватори обладнання на кшталт Shovel Metrics. Це обладнання дозволяє отримувати інформацію про стан екскаваторних зубів за допомогою датчиків, встановлених на ковші екскаватора. Іншим варіантом є встановлення на стрілу екскаватора камери-датчика, розроблення програмного коду зчитування з картинки та системи оповіщення.

Упровадження системи контролю стану екскаваторних зубів й оповіщення в реальному часі дозволить вирішити проблему позапланової заміни екскаваторних зубів і їх потрапляння до дробильної фабрики. Це приведе до значних економічних вигод для підприємства, як-от: зменшення кількості простоїв обладнання; зменшення витрат на непланову заміну екскаваторних зубів; зменшення ймовірності потрапляння зазначених зубів до дробильної фабрики.

У роботі представлено рішення контролю ковша екскаватора зі штучним інтелектом на основі глибоких нейронних мереж для отримання точних і практично застосовних даних, що забезпечує оновлення інформації про стан у режимі реального часу. Нейронна мережа діє як класифікатор пікселів і надає мітку кожному пікселю на зображенні ковша екскаватора. Даний класифікатор у поєднанні з подальшим обробленням забезпечує комплексне рішення для контролю, що дозволяє виявляти відсутність зубів, відстежувати їх зношування та визначати фрагментацію.

Ця нова архітектура глибокої нейронної мережі замінює колишній алгоритм, який використовував традиційні методи комп'ютерного зору для отримання інформації із вхідних відеокадрів для забезпечення зазначених функцій виробу. Як і всі рішення для глибокого навчання, Shovel Metrics™ удосконалюватиметься лише за наявності великих наборів навчальних даних.

Ключові слова: мехатроніка, система контролю, нейронна мережа, екскаватор, робочий орган, штучний інтелект, система керування, проєктування.

Nalobina Olena, Holotyiuk Mykola, Bundza Oleg. Research of mechatronic excavator loading control systems

Excavation with a single-bucket excavator usually consists of three main operations: separation and capture of soil from the massif, its movement and subsequent placement. Calculations of productivity and setting the working dimensions of excavators during their design are directly related to the concept of excavator cut and the volume of excavated soil. To solve this problem, it was proposed to introduce a system for monitoring and alerting the condition

of excavator teeth in real time. This system will allow employees to assess the condition of the teeth in a timely manner and take measures to replace them, which will prevent equipment downtime and save money and time.

One of the options for implementing this system is to install Shovel Metrics equipment on excavators. This equipment allows you to receive information about the condition of excavator teeth using sensors mounted on the bucket of the excavator. Another option is to install a camera sensor on the excavator boom, develop a program code for reading from the image and a warning system.

Implementation of a real-time monitoring and alert system for the condition of excavator teeth will solve the problem of unscheduled replacement of excavator teeth and their entry into the crushing plant. This will lead to significant economic benefits for the company, namely: reducing the number of equipment downtime; reducing the cost of unscheduled replacement of excavator teeth; reducing the likelihood of excavator teeth entering the crushing plant.

This paper presents an artificial intelligence solution for excavator bucket control based on deep neural networks to obtain accurate and practically applicable data, which provides real-time status updates. The neural network acts as a pixel classifier and assigns a label to each pixel in the excavator bucket image. This classifier, combined with post-processing, provides a comprehensive inspection solution that can detect missing teeth, track wear, and detect fragmentation.

This new deep neural network architecture replaces the previous algorithm, which used traditional computer vision techniques to extract information from incoming video footage while providing the specified product functions. Like all deep learning solutions, Shovel Metrics™ will only improve with large training data sets.

Key words: mechatronics, control system, neural network, excavator, working body, artificial intelligence, control system, design.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Виконання земляних робіт однокішшевим екскаватором зазвичай складається із трьох основних операцій: відокремлення ґрунту від масиву та захоплення, його переміщення та подальше вкладення. Розрахунки продуктивності та встановлення робочих розмірів екскаваторів під час їх проєктування безпосередньо пов'язані з поняттям екскаваторного забою й об'ємом розробленого ґрунту. Методика визначення об'єму розробленого ґрунту та розрахунок забою відомі та широко застосовуються під час проєктування традиційного робочого обладнання [1; 2]. Нині, у зв'язку зі збільшенням обсягів земляних робіт, зросли й обсяги виробництва машин і різноманітного робочого обладнання для цих робіт. На особливу увагу заслуговують екскаватори, оснащені телескопічним мехатронними системами контролю. З використанням такого робочого обладнання досягається значне зміння геометричних параметрів екскаватора, водночас методика розрахунку робочого обладнання зі змінними геометричними параметрами й об'єму розробленого ним ґрунту відсутня.

Мета статті – розроблення методики використання мехатронними системами контролю зубців однокішшового екскаватора зі змінними геометричними параметрами робочого обладнання на прикладі конструкцій телескопічного робочого обладнання, запропонованих авторами [3; 4; 6].

Аналіз досліджень і публікацій. Відомі дослідження [2–7] пропонують декілька варіантів емпіричних залежностей для попереднього визначення основних параметрів

екскаваторів на основі характеристик відомих моделей екскаваторів. На особливу увагу заслуговує праця, де наведено докладний аналіз наявних підходів до попереднього розрахунку параметрів екскаваторів і запропоновано два підходи до формування залежностей для визначення лінійних параметрів робочого обладнання екскаваторів на основі коефіцієнтів, що оцінюють функціональні параметри машини.

Результати дослідження. Екскаваторний забій визначається як робоча зона екскаватора, що включає частину ґрунтового масиву, який розробляється з даної площадки, а також простір для розміщення самого екскаватора та транспортних машин. У разі розроблення ґрунту без транспортування до екскаваторного забою також входить майданчик з відвалом ґрунту, який утворюється з даної площадки.

Розміри та форма забою залежать від типу та робочих розмірів екскаватора та транспортних машин, а також від розмірів земляної споруди. Форма забою визначається робочими траєкторіями ковша, які змінюються залежно від видалення ґрунту. Для опису форми та розмірів забою досить фіксувати кінцеві траєкторії, які обмежують об'єм ґрунту, що розробляється з однієї площадки екскаватора.

Під час дослідження завантаження екскаватора встановлена мехатронна система контролю зубів “Shovel Metrics” – це система моніторингу стану зубів екскаватора, яка використовує датчики для вимірювання зносу зубів і тріщин (рис. 1). Ця система може використовуватися для виявлення проблем із зубами на ранніх стадіях, що може допомогти запобігти передчасному зносу або пошкодженню.

Shovel Metrics™ використовує штучний інтелект і комп'ютерний 3D-зір для контролю відсутності та зносу зубів, контролю корисного навантаження, визначення гранулометричного складу, навіть виявлення небезпечного зближення. Виявлення відсутності зубів для екскаваторів усіх типів знижує ймовірність простою дробарок, убезпечує працівників і запобігає виробничим втратам.

Система “Shovel Metrics”, якій довіряють найбільші світові гірничодобувні підприємства, встановлена на понад 70 об'єктах (рис. 2).

Shovel Metrics складається із двох основних компонентів: датчиків і програмного забезпечення. Датчики встановлюються на зубах екскаватора і вимірюють такі параметри, як товщина зубів, відстань між зубами та тріщини. Дані з датчиків

передаються на програмне забезпечення, яке аналізує їх і визначає стан зубів (рис. 3–5).

Система “Shovel Metrics” має низку переваг, зокрема:

- можливість виявлення проблем із зубами на ранніх стадіях;
- зменшення ризику передчасного зносу або пошкодження зубів;
- збільшення терміну служби зубів;
- зменшення витрат на ремонт і обслуговування.

Shovel Metrics також має деякі недоліки, зокрема:

- вартість установки й обслуговування;
- можливість помилок у вимірюваннях;
- можливість впливу зовнішніх чинників на точність вимірювань.

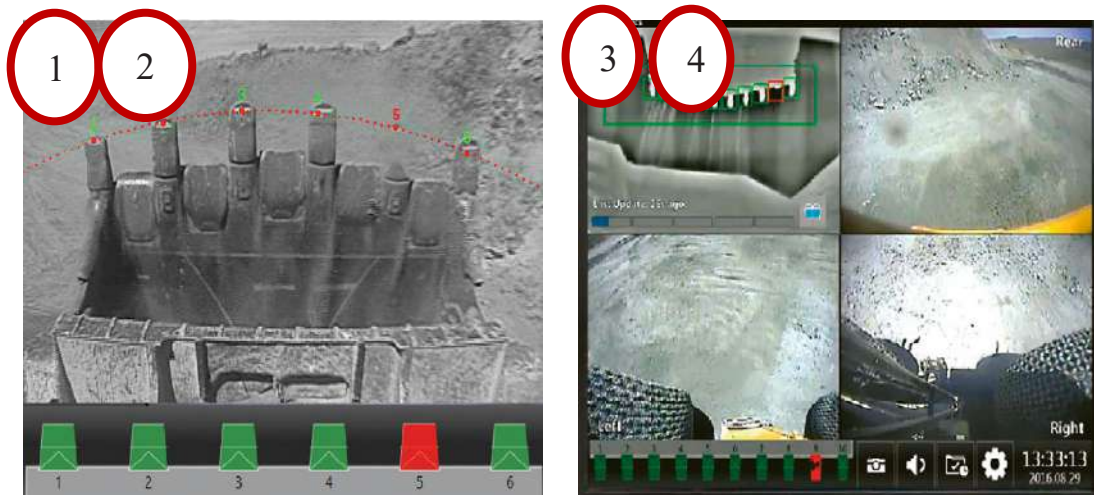


Рис. 1. Візуалізація рішення (у кабіні машиніста екскаватора)

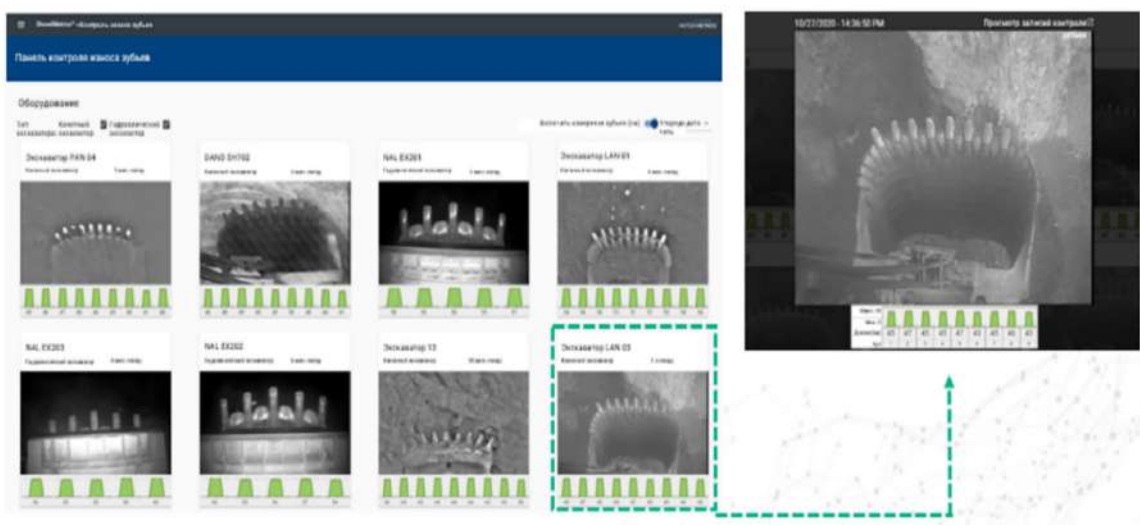


Рис. 2. Візуалізація рішення (віддаленого спостереження)

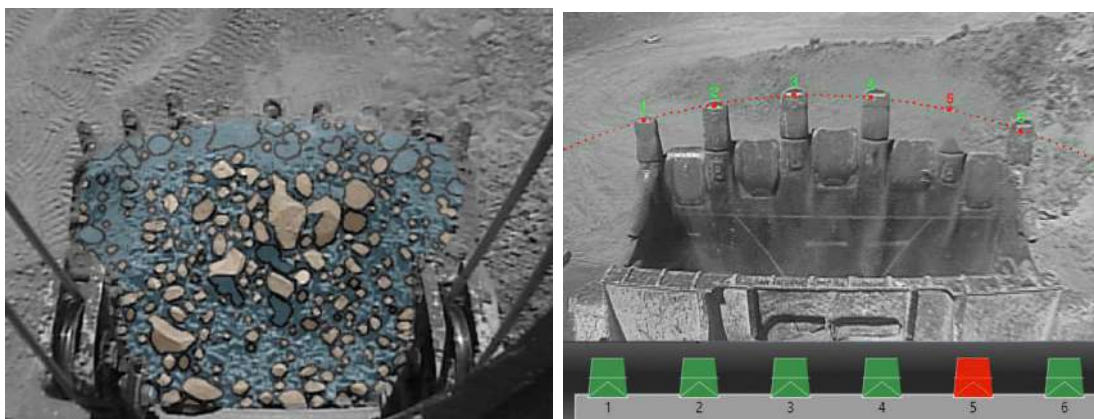


Рис. 3. Аналіз гранулометричного складу. Виявлення відсутності зубів



Рис. 4. Моментальне відображення відсутніх зубів ковша



Рис. 5. Моментальне відображення відсутніх зубів ковша

Пропонуються система “3D Shovel Health Monitor”, яка використовує датчики для вимірювання товщі зубів і відстані між зубами; система “Z-Scan”, яка використовує комп’ютерний зір для аналізу зображень зубів; система “Smart Blade”, яка використовує штучний інтелект для аналізу даних і виявлення проблем із зубами. Ця інформація дозволяє отримати уявлення про поточний стан розвитку автоматизації виявлення зносу зубів екскаватора. Ці системи використовують різні технології для вимірювання зносу зубів, але вони мають подібні цілі та переваги.

Висновки. У роботі представлено рішення контролю ковша екскаватора зі штучним інтелектом на основі глибоких нейронних мереж для отримання точних і практично застосовних даних, що забезпечує оновлення інформації про стан у режимі реального часу. Нейронна мережа діє як класифікатор пікселів і надає мітку кожному пікселю на зображенні ковша екскаватора. Даний класифікатор у поєднанні з наступним обробленням забезпечує комплексне рішення для контролю, що дозволяє виявляти відсутність зубів, відстежувати їхнє зношування та визначати фрагментацію.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Підвищення продуктивності завантаження екскаватора / М.В. Голотюк та ін. The aspects of contemporary scientific research that encompass both theoretical and practical components : VI International scientific and practical conference, January 10–12, 2024, Venice, Italy, International Scientific Unity. 2024. С. 350–352.
2. Сучасні методи моделювання та керування екскаваторами : монографія / О.Г. Гурко та ін. Харків : ХНАДУ, 2020. 204 с.
3. Тенденції розвитку робочого обладнання гідравлічних екскаваторів зі змінними геометричними параметрами / Л.А. Хмара та ін. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування : збірник наукових праць. Рівне, 2015. № 2 (70). С. 433–448.
4. Numerical Evaluation of Contemporary Excavator Bucket Designs using Finite Element Analysis / К.Н. Mughal et al. *J. Kejuruter*. 2021. № 33. P. 579–591.

5. Hao D. Fatigue life prediction and optimization design of sign of loader bucket based on load spectrum. *Qingdao Univ. Technol.* 2021.

6. Формування і оцінка інноваційних технічних рішень одноківшевих екскаваторів з телескопічним робочим обладнанням / Л.А. Хмара та ін. *Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування* : збірник наукових праць. Серія «Підйомно-транспортні, будівельні і дорожні машини і обладнання». Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. Дніпро, 2017. № 97. С. 47–61.

7. Review of the Modeling Methods of Bucket Tooth Wear for Construction Machinery / Zhengxing Dong et al. *Lubricants.* 2023. № 11. P. 253.

REFERENCES:

1. Holotyiuk, M.V., Nalobina, O.O., Bundza, O.Z., Samokhin, O.V. (2024). Pidvyshchennia produktyvnosti zavantazhennia ekskavatora [Increasing the productivity of excavator loading]. VI International scientific and practical conference "The aspects of contemporary scientific research that encompass both theoretical and practical components", January 10–12, 2024, Venice, Italy, International Scientific Unity. S. 350–352 [in Ukrainian].

2. Hurko, O.H., Kyrychenko, I.H., Avrunin, H.A., Yaryzhko, O.V. (2020). Suchasni metody modeliuvannia ta keruvannia ekskavatoramy : monohrafiia [Modern methods of modeling and control of excavators: monograph]. Kharkiv: KhNADU. 204 s. [in Ukrainian].

3. Khmara, L.A., Dakhno, O.O., Romanovskyi, O.L. (2015). Tendentsii rozvytku robochoho obladnannia hidravlichnykh ekskavatoriv zi zminnyimi heometrychnymi parametramy [Trends in the development of working equipment of hydraulic excavators with variable geometric parameters]. *Visnyk NUVHTP: zb. nauk. prats. Rivne.* № 2 (70). S. 433–448 [in Ukrainian].

4. Mughal, K.H., Bugvi, S.A., Qureshi, M.A.M., Khan, M.A., Hayat, K. (2021). Numerical Evaluation of Contemporary Excavator Bucket Designs using Finite Element Analysis. *J. Kejuruter.* 33, 579–591.

5. Hao, D. (2021). Fatigue life prediction and optimization design of sign of loader bucket based on load spectrum. *Qingdao Univ. Technol.*

6. Khmara, L.A., Dakhno, O.O., Konstantinov, A. M. (2017). Formuvannia i otsinka innovatsiinykh tekhnichnykh rishen odnokivshevykh ekskavatoriv z teleskopichnym robochym obladnanniam [Formation and evaluation of innovative technical solutions of single-bucket excavators with telescopic working equipment]. *Budivnytstvo. Materialoznavstvo. Mashynobuduvannia: zb. nauk. pr. Serii "Pidiomno-transportni, budivelni i dorozhni mashyny i obladnannia"*. Prydniprovaska derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury. Dnipro. № 97. S. 47–61 [in Ukrainian].

7. Zhengxing, Dong, Feng Jiang, Yuanqiang, Tan, Fuzeng, Wang, Rong, Ma, and Jiawen, Liu (2023). Review of the Modeling Methods of Bucket Tooth Wear for Construction Machinery. *Lubricants.* 11, 253.