

УДК 681.5.015:622.271.4

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359913

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОЧОГО ЦИКЛУ КАР'ЄРНИХ ЕКСКАВАТОРІВ

- Сергієнко С.А.** канд. техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3977-5239>, e-mail: serhiy.serhiyenko@gmail.com;
- Онищенко А.О.** викладач вищої категорії, Відокремлений структурний підрозділ «Фаховий коледж Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського», м. Кременчук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3793-331X>, e-mail: onishchenko@kkrnu.ukr.education

Виконано систематизований аналіз наукових публікацій 2016–2025 рр., присвячених оптимізації робочого циклу екскавації кар'єрних екскаваторів типу пряма лопата та драглайн. Методи оптимізації систематизовано у шість основних груп: оператор-орієнтовані методи керування; оптимальне керування і багатокритеріальна оптимізація траєкторії; онлайн-адаптивне траєкторне планування; перцептивно-автономні методи екскавації; робастне траєкторне керування з компенсацією збурень; енергооптимізація циклу екскавації. Особливо розглянуто напрями цифрових двійників, симуляційних методів та нейромережевого керування. Показано, що переважна більшість методів розроблена для гідравлічних маніпуляторних систем і потребує суттєвої адаптації для канатних електромеханічних екскаваторів типу пряма лопата та драглайн з урахуванням іншої кінематичної структури, значно більших рівнів потужності та специфічної динаміки канатної системи. Встановлено, що дослідження в напрямі вибору критерію оптимізації робочого циклу залишаються актуальними. Визначено три напрями подальших досліджень: розробка багатопараметричного критерію оптимізації, що враховує час, енергію, вплив на стан обладнання та операційну продуктивність; розробка спостерігача рівня завантаження ковша в режимі реального часу; верифікація запропонованих рішень на електромеханічній системі екскаваторів типу пряма лопата та драглайн.

Ключові слова: кар'єрний екскаватор; пряма лопата; драглайн; оптимізація робочого циклу; траєкторне планування; енергоефективність електроприводу; прогнозне регулювання; цифровий двійник.

Постановка проблеми

У сучасних умовах зростання вартості енергоносіїв, посилення вимог до ресурсозбереження та підвищення конкуренції в гірничодобувній галузі особливої ваги набуває задача скорочення тривалості робочого циклу екскавації при одночасному зменшенні енергоспоживання та втрат у електроприводах. Кар'єрні екскаватори типу пряма лопата та драглайн є базовими засобами виїмки й навантаження гірничої маси у відкритих гірничих роботах. Ефективність їх експлуатації безпосередньо визначає продуктивність кар'єру, собівартість видобутку та енергетичне навантаження на систему електропостачання підприємства.

Робочий цикл екскавації включає послідовність взаємопов'язаних операцій: відрив ковша з породою, підйом, поворот платформи до місця розвантаження, розвантаження в кузов самоскида або на відвал і повернення робочого органу в точку черпання. Для екскаватора за схемою прямої лопати (зокрема ЕКГ-8І, 10І тощо) вирішальне значення має узгоджена робота приводів підйому та повороту, які формують просторову траєкторію руху ковша. Для драглайна додатковою складністю є коливальна динаміка канатної системи, що обмежує допустимі прискорення та вимагає стабілізації ковша перед розвантаженням. В обох випадках якість траєкторії визначає не лише швидкість, а й енергетичну ефективність, рівень пікових навантажень, величину втрат у приводах, а також технологічну надійність: уникнення розсипу породи, ударних режимів,

небезпечних зближень з кузовом самоскида чи елементами конструкції.

Важливою особливістю реальної експлуатації є змінність навантаження: маса породи в ковші змінюється від циклу до циклу внаслідок неоднорідності забою, різної щільності матеріалу та особливостей копання. Це призводить до зміни інерційних характеристик системи та формує вимоги до моментів і потужностей електроприводів, режимів розгону та гальмування, а отже – до зростання варіативності часу циклу й енерговитрат. Традиційні підходи, що спираються на фіксовані типові траєкторії або операторський досвід, не гарантують оптимальних показників у широкому діапазоні завантаження ковша та умов роботи. Тому актуальним є розроблення науково обґрунтованої методики оптимізації просторової траєкторії руху ковша та узгодження законів керування приводами підйому й повороту з урахуванням обмежень електромеханічної системи, технологічних вимог і змінної маси вантажу.

Дослідження, спрямоване на синтез оптимальних (у сенсі швидкодії та/або енергоефективності) тривимірних траєкторій робочого циклу екскавації та формування критеріїв їх обґрунтування, є своєчасним і практично значущим.

Тому набуває необхідності проведення системного аналізу сучасних літературних джерел з проблеми оптимізації циклу екскавації. Останні роки характеризуються швидким розвитком методів багатокритеріальної оптимізації (час – енергія – ударні навантаження), онлайн-адаптації траєкторій до змінного

заповнення ковша та інтеграції сенсорного сприйняття (sensor perception) і робастного керування (robust control). Узагальнення цих результатів є передумовою коректної постановки задачі, вибору метрик валідації та обґрунтування практичної придатності запропонованих рішень.

У розрізі зазначених питань в роботі надається чітке формулювання наукової та практичної складових проблеми, що розглядається, та обґрунтування її актуальності в сучасних умовах. Визначається предмет дослідження та окреслюються його основні складові.

Мета статті

Метою роботи є проведення систематизованого аналізу сучасних наукових публікацій, присвячених оптимізації робочого циклу екскавації кар'єрних екскаваторів типу пряма лопата та драглайн.

Виклад основного матеріалу

Методи оптимізації робочого циклу екскавації за період 2016–2025 рр. систематизовано у шість основних груп.

«Оператор-орієнтовані методи керування».

У роботі [1] на основі даних роботи драглайна показано, що операторська техніка суттєво змінює компоненти операційного циклу екскаватора – копання, вивантаження, повернення (dig/swing/return) – а отже й загальну продуктивність. Запропонована схема: декомпозиція циклу, статистика по компонентах, виявлення «вузьких місць» і формування найкращих практик (best practice) як базової лінії порівняння. Показано, що оптимізація траєкторії без урахування «людського» критерію може виглядати переконливою в моделі, але програвати добре навченому оператору або бути нестійкою до змін забою.

Робота [2] будує аналітичну модель оцінювання енергоефективності циклу екскаватора типу пряма лопата на основі часових компонентів та вимірної потужності і показує, що енерговитрати нерівномірні по фазах циклу – вони зосереджуються в окремих операціях. Це відкриває шлях до оптимізації не лише траєкторії, а й узгодження фаз та зниження піків навантаження. Метрики порівняння (кВт-год/цикл, кВт-год/тонну) та потенціал економії у відсотках дозволяють порівнювати сценарії у нормованому вигляді. Робота [3] додає ще один пласт: вимірювання ефекту допоміжної й автономної стратегій на реальній продуктивності, що задає прийнятний формат порівняння для гірничої техніки на статистиці циклів за різних умов навантаження й забою.

«Оптимальне керування і багатокритеріальна оптимізація траєкторії (Pareto)».

Роботи [4–8] присвячені формулюванню задачі оптимального керування з жорсткими обмеженнями (кінематика, межі приводів, безпека, технологічні умови) і вибору цільових функцій. У [4] розглянуто екскаватор за схемою прямої лопати і показано, що

траєкторне планування може мінімізувати вхідну енергію процесу, зберігаючи потрібні технологічні показники – наповнення ковша та придатність для різних профілів забою. Акцент зроблено не на геометрії траєкторії, а на енергетичній функції цілі, що враховує реальні силові й потужнісні режими приводів.

Робота [5] є показовою для сучасного тренду: вводиться триєдина функція цілі час – енергія – ударні навантаження (time–energy–impact), де ударні навантаження є показником зносу та ризику. Пропонований метод генерує траєкторії, що одночасно скорочують час, енергію й операційний вплив на стан обладнання. Для реального екскаватора це принципово: оптимізація лише за швидкістю може вимагати надмірних ударів, коливання платформи й розсип породи. Таким чином, [5] формує правильний критерій оптимальності: не мінімум часу, а мінімум часу за умови контрольованої енергії і «м'якості» руху.

Роботи групи [6–8] направлені на розв'язання задачі оптимізації чисельно та отримання траєкторії, придатної для реального відстеження приводами без автоколивань. При цьому пропонується використовувати псевдоспектральні методи (pseudospectral methods), гладкі представлення траєкторій, оптимізацію ривка.

Для вибору критерію оптимальності у подібних задачах важливим теоретичним підґрунтям є робота [9], в якій запропоновано системно обґрунтований критерій оптимального керування.

«Онлайн-адаптивне траєкторне планування».

Роботи [10–13] розглядають ситуацію, коли умови кожного циклу екскавації змінюються: маса породи в ковші, геометрія забою, кут стоянки самоскида. Автоматизована система має адаптуватись до цих змін без повного перерахунку моделі, що вимагає не одноразової оптимізації, а адаптивного планування. Ідея прогнозного регулятора (Model Predictive Control, MPC), реалізована в [10] через базу попередньо обчислених рішень, дозволяє коригувати отримані раніше оптимальні режими відповідно до поточних обмежень.

Роботи [11] і [13] розвивають ідею використання стилю роботи оператора як джерела траєкторій і декомпозицію задачі на елементарні підзадачі (task units): замість однієї великої оптимізації послідовно оптимізуються підзадачі – вихід з забою, підйом із утриманням породи, поворот до місця розвантаження, розвантаження, повернення до точки черпання – з наступним зшиванням у гладку спільну траєкторію.

Робота [12] доповнює групу підходами до планування руху великих екскаваторів із урахуванням просторових перетворень, що особливо важливо для тривимірних задач і коректного повернення в фіксовану точку черпання.

«Перцептивно-автономні методи екскавації».

Роботи [14–19] вирішують питання стійкості оптимальної траєкторії до невизначеностей реального середовища (форма забою, поверхня матеріалу, краї

уступу, положення кузова самоскида), яке може бути не відоме заздалегідь і змінюється в процесі роботи.

Робота [14] дає систематичну рамку автономного екскаватора як ланцюга «сприйняття – розпізнавання – прийняття рішення/планування – дія» (sensing – perception – decision/planning – action). Робота [15] демонструє автономну систему завантаження матеріалу в реальних умовах (пил, нестабільність ґрунту, скочування каміння) і показує, що працездатність системи визначається не лише якістю траєкторії, а здатністю перепланувати при зміні сцени й підтримувати безпеку при прийнятній продуктивності.

Робота [16] формулює ключові складові автоматизації землерийних машин: важко формалізована взаємодія ківш–матеріал, невизначеність вхідних умов, необхідність надійної сенсорики й оцінювання стану. Це пояснює, чому оптимізація траєкторії завжди має супроводжуватись інтеграцією сенсорного сприйняття і робастним керуванням. Робота [17] пропонує побудову траєкторії на основі хмари точок (point cloud), отриманої від лідара або 3D-сканера, тоді як [18] використовує сприйняття поверхні матеріалу для адаптації траєкторії копання у реальному часі. Шведські дослідники з Університету технологій Лулео [19] вирішували суміжне питання взаємодії ковша з породою у контексті моделювання зносу й показали, що урахування реальної геометрії матеріалу та контактної механіки є умовою адекватного моделювання динаміки ковша.

«Робастне траєкторне керування з компенсацією збурень».

Роботи [20–22] та частково [23] присвячені забезпеченню відтворюваності оптимальної траєкторії у виконавчому контурі. Роботи [20] і [21] демонструють семантичний підхід: спочатку забезпечується надійність контуру керування, потім – оптимальність траєкторії. При застосуванні нелінійних ПІ-регуляторів, крос-з'язаної компенсації або еволюційного підлаштування параметрів ПІД-регуляторів досягаються краща точність відстеження, зниження перерегулювання і коливань, стабільний час фази. Це прямо впливає на швидкість циклу: навіть ідеальний план мінімального часу програє, якщо виконавчий контур породжує затримки або перерегулювання. Тобто оптимізацію циклу слід розуміти як двошарову задачу: планування траєкторії і її виконання.

Робота [22] показує, що при коливальному характері зовнішніх збурень (вібрації, змінні навантаження, нерівномірність ґрунту) потрібен координований контроль, що узгоджує кілька приводів. Для екскаватора це відповідає синхронізації підйому й повороту, а також режиму повернення в точку черпання, де часто виникає гальмівний режим повороту з ризиком розгойдування. Робота [23] показує можливість застосування навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) як альтернативу класичним регуляторам: для складних нелінійних систем можливо навчити політику відстеження траєкторії без ручного налаштування під кожен режим, але це накладає вимоги до обсягу даних і до

валідації перенавчання.

«Енергооптимізація циклу екскавації».

У роботах [2, 4, 24] і частково [5] розглядається компромісний вибір критерію оптимізації: швидкодія чи енергоспоживання. Основна ідея полягає в тому, що енергія циклу формується не лише інтегралом механічної роботи, а й втратами у приводах, піками струмів і моментів, режимами гальмування та узгодженістю фаз рухів. Робота [2] показує, що реальні вимірювання часу й потужності по фазах дозволяють будувати аналітичну модель оптимізації енерговитрат і оцінювати потенціал економії при зміні режиму роботи.

Робота [4] реалізує енергооптимізацію через траєкторне планування для екскаватора за схемою прямої лопати. Енергія стає цільовою функцією, а траєкторія – інструментом перерозподілу навантажень у приводах. При цьому правильна траєкторія може залишатися близькою до оптимальної за швидкодією, усуваючи лише енергетично неефективні ділянки (надмірні розгони й гальмування, зайві вертикальні переміщення, невдале узгодження повороту й підйому тощо). Робота [24] дає системний погляд на енергооптимізацію із урахуванням траєкторії та загального енергоменеджменту силової установки, що для екскаваторів означає урахування обмежень мережі кар'єру, вимог до зниження піків і теплових обмежень двигунів.

Робота [25] пропонує критерій енергоефективності виробничого циклу ЕКГ-8І, що закладає основу для верифікації на вітчизняній техніці.

Окремо необхідно виділити напрямки, що виникли на перетині задач оптимізації траєкторії і потреби враховувати структурний стан машини в режимі реального часу.

«Цифрові двійники і симуляційні методи».

Ключова ідея такого підходу полягає в тому, що замість побудови спрощеної аналітичної моделі або використання експериментальних даних створюється цифровий двійник (*digital twin*) – інтегрована віртуальна модель екскаватора, що охоплює кінематику, динаміку, модель опору копанню, реконструкцію середовища і, що принципово, модель структурної поведінки несучих елементів у реальному часі.

Центральною для цієї групи є робота [26], де для безпілотного канатного екскаватора побудовано цифровий двійник типу «форма – несуча здатність» (*shape-performance digital twin*). Структурна відповідь машини на траєкторію визначається методом скінчених елементів, але не у вигляді важких розрахунків у реальному часі, а через заздалегідь навчені сурогатні моделі (*surrogate models*), що вбудовані в планувальник як додаткові обмеження. Тобто оптимізатор траєкторії «бачить» не лише кінематичні й енергетичні межі, а й умову збереження конструктивної цілісності ковша, рукояті й стріли. Результатом є оптимальна за продуктивністю й енергією траєкторія, що водночас безпечна з погляду механічного навантаження. Це особливо актуально для кар'єрних екскаваторів, де несподівана відмова металоконструкції призводить до

багатогадинного простою й значних економічних втрат.

Додаткове застосування цифрового двійника полягає у можливості ідентифікації параметрів реальної динамічної моделі без зупинки машини. В [27] запропоновано метод ідентифікації параметрів динамічної моделі переднього механізму канатного екскаватора на основі оптимально спроектованих збуджувальних траєкторій (*excitation trajectories*) з гібридною фільтрацією сигналів. Отримана модель надалі використовується як основа для планувальника і системи керування. Цей підхід вирішує одну з головних практичних проблем: точна динамічна модель великого екскаватора в реальних умовах недоступна – її доводиться ідентифікувати «на ходу», не порушуючи технологічного процесу.

Проте варто зазначити, що обидві роботи [26, 27] виконано на прототипах зменшеного масштабу, і питання масштабування результатів на реальні машини залишається відкритим.

Цифровий двійник переводить оптимізацію траєкторії з рівня «геометрія – енергія» на рівень «геометрія – енергія – стан конструкції – ідентифікована модель». Для промислового впровадження це критично: саме такий рівень інтеграції дозволяє говорити про реальну автономізацію, а не про симуляційний результат.

«Методи машинного навчання і нейромережеве керування».

Ця група охоплює підходи, де нейронні мережі й алгоритми навчання використовуються не як допоміжний інструмент усередині класичного оптимізатора, а як основний механізм або планування траєкторії, або побудови контролера відстеження. Від робастного керування вона відрізняється тим, що регулятор не синтезується аналітично, а навчається на даних або у взаємодії із середовищем.

Робота [28] пропонує фреймворк планування траєкторії на основі фізично-інформованих нейронних мереж (*Physics-Informed Neural Networks, PINN*). Великий масив оптимальних траєкторій, розрахованих офлайн класичними методами, використовується для навчання мережі, яка потім здатна генерувати оптимальну траєкторію онлайн за поточними умовами (стан машини, форма матеріальної поверхні) без ітераційного розв'язання задачі оптимізації. При цьому фізичні закони (динамічні обмеження, обмеження по потужності, цільова функція) вбудовані безпосередньо у функцію втрат мережі. Це гарантує, що згенерована траєкторія залишається у фізично допустимій області навіть для умов, яких не було в навчальній вибірці. Для задачі онлайн-адаптації траєкторії екскаватора – де цикл короткий і часу на перерахунок немає – такий підхід виглядає перспективним.

Робота [29] вирішує задачу відстеження траєкторії через адаптивне керування на основі нейронної мережі з радіальними базисними функціями (*Radial Basis Function Neural Network, RBFNN*). Мережа навчається в реальному часі апроксимувати невідому нелінійну

збурювальну функцію системи (зміни маси ковша, нелінійності привода, зовнішні збурення) і передавати цю оцінку до контролера для компенсації. Така система не потребує точної апріорної динамічної моделі, що для великих екскаваторів із змінним завантаженням є суттєвою практичною перевагою.

Варто відзначити підхід навчання на даних оператора (*imitation learning*) для планування траєкторій, що представлений у роботі [30]. Система навчається відтворювати характеристики траєкторій досвідченого оператора за набором ключових точок циклу. Цей підхід співвідноситься з першою групою огляду. *Операторський досвід стає навчальними даними для нейромережевого планувальника – таким чином дві групи методологічно замикаються в єдиний цикл.*

Порівняння підходів за типом екскаватора.

Більшість методів оптимізації траєкторій у сучасній літературі розроблено для гідравлічних екскаваторів із маніпуляторним типом рухів (незалежне керування стрілою, рукояттю, ковшем). Перенесення цих методів на канатний екскаватор типу прямої лопати (ЕКГ-8І) або драглайн потребує суттєвої адаптації. По-перше, у канатних екскаваторів відсутній гідравлічний маніпулятор: рух ковша визначається узгодженою роботою електроприводів підйому й тяги, що формує суттєво відмінну кінематичну структуру. По-друге, для драглайна вирішальним обмежувальним чинником є коливальна динаміка канатної системи, яка практично не зустрічається у гідравлічних машинах і вимагає специфічних методів демпфування. По-третє, типові потужності кар'єрних електромеханічних систем (1000–4000 кВт) на порядок перевищують потужності досліджуваних у більшості публікацій гідравлічних маніпуляторів, що змінює масштаб задачі керування й вимоги до обмежень по струму і нагріву. Таким чином, при практичному використанні результатів огляду для екскаватора ЕКГ-8І необхідна критична оцінка застосовності кожного методу з урахуванням зазначених відмінностей.

Однією з ключових проблем теорії автоматичного керування (ТАК) визнається проблема постановки мети керування [9, 25, 31]. Ця проблема виходить за рамки власне ТАК, будучи водночас першим етапом вирішення проблеми керування будь-яким процесом. Незважаючи на значну кількість наукових праць і широту охоплення, необхідно констатувати, що дискусія щодо вибору критерію оптимізації робочого циклу кар'єрних екскаваторів залишається відкритою і не має загальноприйнятого вирішення. Важливою є ідея багатокритеріального підходу, запропонованого в [5]: урахування витраченого часу, витраченої електроенергії та операційного впливу на стан обладнання. Проте цей підхід не враховує операційну продуктивність роботи екскаватора – кількість перевантаженої гірської маси, що є суттєвим недоліком з погляду оцінювання реальної ефективності технологічного процесу.

Висновки

Розширений огляд наукових матеріалів показує, що оптимізація циклу екскавації у сучасних дослідженнях розглядається як багаторівнева задача, де оптимальна траєкторія є лише одним із елементів системи.

Роботи з польової аналітики й порівняльного оцінювання доводять необхідність декомпозиції циклу на фази та формування ключових показників ефективності (KPI), а саме час циклу й фаз, продуктивність, пікова потужність, втрати в приводах, простої. Це створює сталонну базу для коректного порівняння методів.

Траєкторна оптимізація формулюється як задача оптимального керування з обмеженнями кінематики й приводів; ключовий тренд – перехід до багатокритеріального підходу (час – енергія – ударні навантаження) та побудови множини Парето (Pareto front) компромісних рішень.

Через змінність умов акцент зміщується на схеми попередній розрахунок – онлайн-адаптація: бібліотека оптимальних режимів, прогнозне регулювання (MPC) або швидкі сурогатні моделі (surrogate models), що забезпечують адаптацію без дорогого перерахунку в реальному часі.

Автономність і висока якість оптимізації неможливі без сенсорного сприйняття: оцінювання поверхні матеріалу, меж забою та положення кузова/відвалу є обов'язковим джерелом обмежень для планувальника траєкторії.

Критичною є стадія виконання. Робастні контури керування і компенсація збурень необхідні, щоб оптимальна траєкторія реально відтворювалась без зривів і коливань. Для екскаваторів типу прямої лопати домінують обмеження потужності й ударних навантажень, тоді як для драглайна вирішальним є розгойдування канатної системи й час її демпфування.

Переважає більшість розглянутих методів розроблена для гідравлічних маніпуляторів. Їх застосування до канатних екскаваторів типу ЕКГ-8І та драглайнів потребує адаптації: інша кінематична структура, відсутність маніпуляторного руху, значно більша потужність та специфічна динаміка канатної системи для драглайна.

Використання цифрових двійників та нейромережеві підходи надають якісно новий рівень адаптивності й обчислювальної ефективності онлайн-планування, але висувають підвищені вимоги до репрезентативності навчальних даних, верифікації поза межами навчальної вибірки і прозорості рішень. Для промислового застосування ці методи перебувають на стадії концептуального обґрунтування й потребують валідації на реальних або масштабованих моделях.

Отже, як напрямки подальших досліджень необхідно визначити наступне:

1. Розробка критерію оптимізації робочого циклу кар'єрних екскаваторів на основі багатокритеріального підходу, який враховував би витрачений час,

витрачену електроенергію, операційний вплив на стан обладнання та операційну продуктивність виробничого циклу, тобто кількість перевантаженої гірської маси за одиницю часу.

2. Розробка спостерігача рівня завантаження ковшу екскаватора гірською масою в режимі реального часу як необхідної складової для визначення операційної продуктивності та адаптації закону керування до змінних умов циклу.

3. Верифікація запропонованого критерію оптимізації на реальних або модельних даних електромеханічної системи екскаватора із порівнянням за метриками часу циклу, питомого енергоспоживання та продуктивності відносно базових траєкторій і результатів попередніх досліджень.

Перелік використаних джерел

- [1] Babaei Khorzoughi M., Hall R. A Study of Digging Productivity of an Electric Rope Shovel for Different Operators. *Minerals*. 2016. Vol. 6, no. 2. Article 48. DOI: <https://doi.org/10.3390/min6020048>.
- [2] Yaghini A., Hall R., Apel D. Autonomous and Operator-Assisted Electric Rope Shovel Performance Study. *Mining*. 2022. Vol. 2, no. 4. Pp. 699–711. DOI: <https://doi.org/10.3390/mining2040038>.
- [3] Topno S., Sahoo L., Umre B. S. Energy efficiency assessment of electric shovel operating in opencast mine. *Energy*. 2021. Vol. 230. Article 120703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120703>.
- [4] Energy-minimum optimization of the intelligent excavating process for large cable shovel through trajectory planning / Wang X., Sun W., Li E., Song X. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018. Vol. 58. Pp. 2219–2237. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2011-6>.
- [5] Multi-objective time-energy-impact optimization for robotic excavator trajectory planning / H. Feng et al., *Automation in Construction* 2023. Vol. 156. Article 105094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105094>.
- [6] Fan R., Li Y., Yang L. Multiobjective trajectory optimization of intelligent electro-hydraulic shovel. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 17. Article 50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0706-2>.
- [7] Multi-objective trajectory planning of earth excavation robots using continuous trajectory representation / Zhang T., Fu T., Song X., Qu F. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 136. Article 104176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104176>.
- [8] Time-jerk optimal trajectory planning of hydraulic robotic excavator / Y. Zhang et al. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 13, no. 7. DOI: <https://doi.org/10.1177/16878140211034611>.
- [9] Lutsenko I., Tytiuk V., Mikhailenko O. Development of a system-grounded criterion of optimal control. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного*

університету. 2010. Вип. 5(64). С. 15–23.

- [10] Database-driven model predictive control system for online adaptation of an autonomous excavator to environmental conditions / T. Okada et al. *Control Engineering Practice*. 2024. Vol. 145. Article 105843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.105843>.
- [11] Real-time task-oriented continuous digging trajectory planning for excavator arms / Z. Yao et al. *Automation in Construction*. 2023. Vol. 152. Article 104916. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104916>.
- [12] Trajectory planning and control of large robotic excavators based on inclination-displacement mapping / H. Ding et al. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. Article 105209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105209>.
- [13] Task-unit based trajectory generation for excavators utilizing expert operator skills / C. Feng et al. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. Article 105247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105247>.
- [14] Eraliev O., Shin D., Lee Ch. Sensing, perception, decision-making and planning-action for autonomous excavators: A review. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 141. Article 104428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104428>.
- [15] An autonomous excavator system for material loading tasks / L. Zhang et al. *Science Robotics*. 2021. Vol. 6, iss. 55. Article eabc3164. DOI: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abc3164>.
- [16] Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 68. Pp. 212–222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009>.
- [17] Toward autonomous mining: Design and development of an unmanned electric shovel via point cloud-based optimal trajectory planning / Zhang T., Fu T., Cui Y., Song X. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 17, no. 3. Article 30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0686-2>.
- [18] Excavating Trajectory Planning of a Mining Rope Shovel Based on Material Surface Perception / Feng Y., Wu J., Lin B., Guo C. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 15. Article 6653. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156653>.
- [19] Full-Scale Simulation and Validation of Wear for a Mining Rope Shovel Bucket / Svanberg A., Larsson S., Mäki R., Jonsén P. *Minerals*. 2021. Vol. 11, no. 6. Article 623. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11060623>.
- [20] Robotic excavator motion control using a nonlinear proportional–integral controller and cross-coupled pre-compensation / D. Wang et al. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 64. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.024>.
- [21] Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller / H. Feng et al. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 105. Pp. 153–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.12.014>.
- [22] Coordinated trajectory tracking control for mining excavator with oscillating external disturbance / R. Fan et al. *Journal of Field Robotics*. 2024. Vol. 41, no. 2. Pp. 258–272. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.22257>.
- [23] Egli P., Hutter M. A General Approach for the Automation of Hydraulic Excavator Arms Using Reinforcement Learning. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022. Vol. 7, no. 2. Pp. 5679–5686. DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3152865>.
- [24] Nguyen V. H., Do T. C., Ahn K. K. Investigation and Optimization of Energy Consumption for Hybrid Hydraulic Excavator with an Innovative Powertrain. *Actuators*. 2023. Vol. 12, no. 10. Article 382. DOI: <https://doi.org/10.3390/act12100382>.
- [25] Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators / V. Tytiuk et al. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 280. Article 05013. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128005013>.
- [26] Data-driven excavation trajectory planning for unmanned mining excavator / T. Fu et al. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 162. Article 105395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105395>.
- [27] Wang X., Song X., Sun W. Surrogate based trajectory planning method for an unmanned electric shovel. *Mechanism and Machine Theory*. 2021. Vol. 158. Article 104230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104230>.
- [28] Physics-Informed Neural Networks-Based Online Excavation Trajectory Planning for Unmanned Excavator / T. Fu et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 37. Article 131. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01109-2>.
- [29] Adaptive neural network tracking control for unmanned electric shovel intelligent excavation system / K. Lian et al. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 19, no. 6. Article 45. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-024-0816-0>.
- [30] Mining Trajectory Planning of Unmanned Excavator Based on Machine Learning / T. Zhang et al. *Mathematics*. 2024. Vol. 12, no. 9. Article 1298. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12091298>.
- [31] Influence of human-operator parameters on the energy consumption and cycle time of an excavator electromechanical system / V. Tytiuk et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. Vol. 3. Pp. 131–138. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-3/131>.

MODERN APPROACHES TO EXCAVATION CYCLE OPTIMIZATION FOR SURFACE MINING EXCAVATORS

- Serhiienko S.A.** PhD (Engineering), professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3977-5239>, e-mail: serhiy.serhiyenko@gmail.com;
- Onyshchenko A.O.** senior lecturer, Separate Structural Unit «Professional College of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University», Kremenchuk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3793-331X>, e-mail: onishchenko@kkrnu.ukr.education

A systematic review of research publications from 2016–2025 on the optimization of the excavation cycle of surface mining excavators of the rope shovel and dragline types has been conducted. The relevance of the review is determined by rising energy costs, increasingly stringent resource conservation requirements, and heightened competition in the mining industry, where excavation efficiency directly governs quarry productivity and extraction cost. The excavation cycle is treated as a multiphase sequence of interrelated operations (bucket breakout, hoisting, swing to the dump position, payload discharge, and return to the digging point), the trajectory quality of which determines cycle time, energy efficiency, peak load levels, and operational reliability. Variable bucket loading is identified as a critical feature of field operation, giving rise to variability in cycle time and energy consumption. The optimization methods are systematized into six principal groups. Operator-oriented control methods provide decomposition of the cycle into phases and formation of key performance indicators as a reference baseline for rigorous method comparison. Methods of optimal control and multi-objective trajectory optimization implement the transition from single-criterion time minimization to the time–energy–impact format with construction of a Pareto front of compromise solutions. Online adaptive trajectory planning based on Model Predictive Control and pre-computed solution libraries provides adaptation to varying cycle conditions without costly real-time recomputation. Perceptive-autonomous methods integrate sensor perception of the environment (dig face geometry, truck body position, and material surface profile) as a mandatory source of constraints for the trajectory planner. Robust trajectory control with disturbance compensation ensures reproducibility of the optimal trajectory in the execution loop through nonlinear controllers, cross-coupled compensation, and evolutionary tuning of controller parameters. Energy optimization methods address the electrical energy consumption objective function accounting for drive losses, current peaks, and phase motion coordination. Approaches based on digital twins and neural network control are considered separately, including Physics-Informed Neural Networks and adaptive control based on Radial Basis Function Neural Networks. It is shown that these approaches provide a qualitatively new level of adaptability and computational efficiency; however, for industrial application they remain at the stage of conceptual validation and require verification on full-scale or appropriately scaled physical systems. It is shown that the substantial majority of the methods have been developed for hydraulic manipulator systems and require significant adaptation for rope-type electromechanical excavators of the rope shovel and dragline types, accounting for the different kinematic structure, substantially higher power levels, and the specific dynamics of the rope system. It is established that research into the selection of the optimization criterion for the excavation cycle remains relevant. Three directions for further research are identified: development of a multi-objective optimization criterion accounting for cycle time, energy consumption, impact on equipment condition, and operational productivity; development of a real-time bucket fill level observer; and verification of the proposed solutions on an electromechanical system of the rope shovel or dragline type.

Keywords: surface mining excavator; rope shovel; dragline; excavation cycle optimization; trajectory planning; multi-objective optimization; electric drive energy efficiency; model predictive control; digital twin.

References

- [1] M. Babaei Khorzoughi, and R. Hall, “A Study of Digging Productivity of an Electric Rope Shovel for Different Operators,” *Minerals*, vol. 6, no. 2, article 48, 2016. doi: [10.3390/min6020048](https://doi.org/10.3390/min6020048).
- [2] A. Yaghini, R. Hall, and D. Apel, “Autonomous and Operator-Assisted Electric Rope Shovel Performance Study,” *Mining*, vol. 2, no. 4, pp. 699–711, 2022. doi: [10.3390/mining2040038](https://doi.org/10.3390/mining2040038).
- [3] S. Topno, L. Sahoo, and B. S. Umre, “Energy efficiency assessment of electric shovel operating in open-cast mine,” *Energy*, vol. 230, article 120703, 2021. doi: [10.1016/j.energy.2021.120703](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120703).
- [4] X. Wang, W. Sun, E. Li, and X. Song, “Energy-minimum optimization of the intelligent excavating process for large cable shovel through trajectory planning,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 58, pp. 2219–2237, 2018. doi: [10.1007/s00158-018-2011-6](https://doi.org/10.1007/s00158-018-2011-6).
- [5] H. Feng et al., “Multi-objective time-energy-impact optimization for robotic excavator trajectory planning,” *Automation in Construction*, vol. 156, article 105094, 2023. doi: [10.1016/j.autcon.2023.105094](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105094).
- [6] R. Fan, Y. Li, and L. Yang, “Multiobjective trajectory optimization of intelligent electro-hydraulic shovel,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 17, article 50, 2023. doi: [10.1007/s11465-022-0706-2](https://doi.org/10.1007/s11465-022-0706-2).
- [7] T. Zhang, T. Fu, X. Song, and F. Qu, “Multi-objective trajectory planning of earth excavation robots using continuous trajectory representation,” *Automation in*

- Construction*, vol. 136, article 104176, 2022. doi: **10.1016/j.autcon.2022.104176**.
- [8] Y. Zhang, Z. Sun, Q. Sun, Y. Wang, X. Li, and J. Yang, "Time-jerk optimal trajectory planning of hydraulic robotic excavator," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 7, 2021. doi: **10.1177/16878140211034611**.
- [9] I. Lutsenko, V. Tytiuk and O. Mikhailenko, "Development of a system-grounded criterion of optimal control", *Bulletin of Kremenchuk State Polytechnic University*, vol. 5(64), pp. 15–23, 2010.
- [10] T. Okada, T. Yamamoto, T. Doi, K. Koiwai, and K. Yamashita, "Database-driven model predictive control system for online adaptation of an autonomous excavator to environmental conditions," *Control Engineering Practice*, vol. 145, article 105843, 2024. doi: **10.1016/j.conengprac.2024.105843**.
- [11] Z. Yao, S. Zhao, X. Tan, W. Wei, and Y. Wang, "Real-time task-oriented continuous digging trajectory planning for excavator arms," *Automation in Construction*, vol. 152, article 104916, 2023. doi: **10.1016/j.autcon.2023.104916**.
- [12] H. Ding, Z. Sang, Z. Li, J. Shi, Y. Wang, and D. Meng, "Trajectory planning and control of large robotic excavators based on inclination-displacement mapping," *Automation in Construction*, vol. 158, article 105209, 2024. doi: **10.1016/j.autcon.2023.105209**.
- [13] C. Feng, Y. Shen, J. Wang, Q. Wang, Z. Suo, and F. Su, "Task-unit based trajectory generation for excavators utilizing expert operator skills," *Automation in Construction*, vol. 158, article 105247, 2024. doi: **10.1016/j.autcon.2023.105247**.
- [14] O. Eraliev, D. Shin, and Ch. Lee, "Sensing, perception, decision-making and planning-action for autonomous excavators: A review," *Automation in Construction*, vol. 141, article 104428, 2022. doi: **10.1016/j.autcon.2022.104428**.
- [15] L. Zhang et al., "An autonomous excavator system for material loading tasks," *Science Robotics*, vol. 6, iss. 55, article eabc3164, 2021. doi: **10.1126/scirobotics.abc3164**.
- [16] S. Dadhich, U. Bodin, and U. Andersson, "Key challenges in automation of earth-moving machines," *Automation in Construction*, vol. 68, pp. 212–222, 2016. doi: **10.1016/j.autcon.2016.05.009**.
- [17] T. Zhang, T. Fu, Y. Cui, and X. Song, "Toward autonomous mining: Design and development of an unmanned electric shovel via point cloud-based optimal trajectory planning," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 3, article 30, 2022. doi: **10.1007/s11465-022-0686-2**.
- [18] Y. Feng, J. Wu, B. Lin, and C. Guo, "Excavating Trajectory Planning of a Mining Rope Shovel Based on Material Surface Perception," *Sensors*, vol. 23, no. 15, article 6653, 2023. doi: **10.3390/s23156653**.
- [19] A. Svanberg, S. Larsson, R. Mäki, and P. Jonsén, "Full-Scale Simulation and Validation of Wear for a Mining Rope Shovel Bucket," *Minerals*, vol. 11, no. 6, article 623, 2021. doi: **10.3390/min11060623**.
- [20] D. Wang, L. Zheng, H. Yu, W. Zhou, and L. Shao, "Robotic excavator motion control using a nonlinear proportional–integral controller and cross-coupled pre-compensation," *Automation in Construction*, vol. 64, pp. 1–6, 2016. doi: **10.1016/j.autcon.2015.12.024**.
- [21] H. Feng et al., "Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 105, pp. 153–168, 2018. doi: **10.1016/j.ymssp.2017.12.014**.
- [22] R. Fan, Y. Li, L. Yang, T. Qin, Y. Zhang, and Z. Wang, "Coordinated trajectory tracking control for mining excavator with oscillating external disturbance," *Journal of Field Robotics*, vol. 41, no. 2, pp. 258–272, 2024. doi: **10.1002/rob.22257**.
- [23] P. Egli, and M. Hutter, "A General Approach for the Automation of Hydraulic Excavator Arms Using Reinforcement Learning," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 5679–5686, 2022. doi: **10.1109/LRA.2022.3152865**.
- [24] V. H. Nguyen, T. C. Do, and K. K. Ahn, "Investigation and Optimization of Energy Consumption for Hybrid Hydraulic Excavator with an Innovative Powertrain," *Actuators*, vol. 12, no. 10, article 382, 2023. doi: **10.3390/act12100382**.
- [25] V. Tytiuk, K. Khandakji, G. Sivyakova, N. Karabut, O. Chorny, and V. Busher, "Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators," *E3S Web of Conferences*, vol. 280, article 05013, 2021. doi: **10.1051/e3sconf/202128005013**.
- [26] T. Zhang, T. Fu, T. Ni, H. Yue, Y. Wang, and X. Song, "Data-driven excavation trajectory planning for unmanned mining excavator," *Automation in Construction*, vol. 162, article 105395, 2024. doi: **10.1016/j.autcon.2024.105395**.
- [27] X. Wang, X. Song, and W. Sun, "Surrogate based trajectory planning method for an unmanned electric shovel," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 158, article 104230, 2021. doi: **10.1016/j.mechmachtheory.2020.104230**.
- [28] T. Fu, Z. Hu, T. Zhang, Q. Bi, and X. Song, "Physics-Informed Neural Networks-Based Online Excavation Trajectory Planning for Unmanned Excavator," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 37, article 131, 2024. doi: **10.1186/s10033-024-01109-2**.
- [29] K. Lian, Z. Hu, X. Long, Y. Zhang, W. Xie, and X. Song, "Adaptive neural network tracking control for unmanned electric shovel intelligent excavation system," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 6, article 45, 2024. doi: **10.1007/s11465-024-0816-0**.
- [30] T. Zhang et al., "Mining Trajectory Planning of Unmanned Excavator Based on Machine Learning," *Mathematics*, vol. 12, no. 9, article 1298, 2024. doi: **10.3390/math12091298**.

- [31] V. Tytiuk, D. Mrachkovskiy, O. Chornyi, V. Kuznetsov, M. Tryputen, and G. Sivyakova, "Influence of human-operator parameters on the energy consumption and cycle time of an excavator electromechanical system," *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 3, pp. 131–138, 2025. doi: **10.33271/nvngu/2025-3/131**.

Стаття надійшла 10.12.2025
Стаття прийнята 05.01.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Сергієнко С. А., Онищенко А. О. Сучасні підходи до оптимізації робочого циклу кар'єрних екскаваторів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 56–64. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359913>.