

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.89:681.5

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2026.112.100

СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕКСКАВАТОРА НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Мірошник В. А., Гурко О. Г.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Запропоновано ієрархічну структуру інформаційно-керувальної системи маніпулятора одноковшового екскаватора в умовах невизначених збурень. Структуру сформовано на основі функціональної декомпозиції процесів керування та їх поділу за частотою оновлення інформації. Синтезовано підсистему реалізації керування у вигляді комбінованої двоконтурної архітектури, що поєднує каскадне ПД-керування з адаптивним інтелектуальним модулем, призначеним для компенсації невизначених факторів. Для реалізації інтелектуального модуля використано метод класу «актор-критик» у межах навчання з підкріпленням.

Ключові слова: екскаватор, інформаційно-керувальна система, структурний синтез, адаптивне керування, ПД-регулятор, навчання з підкріпленням, актор-критик.

Вступ

Земляні роботи є одним із перших та найбільш трудомістких етапів процесу будівництва. Під час цього процесу застосовують різноманітні типи машин для земляних робіт, що здійснюють підготовку місцевості та розчищення територій від перешкод, риття траншей і котлованів різної глибини та конфігурації, насипання, переміщення або ущільнення ґрунту тощо.

Одноковшеві екскаватори (ОЕ) є найбільш поширеним типом машин для земляних робіт; їхня частка становить орієнтовно 40–45 % від загальної кількості [1, 2]. Широке розповсюдження ОЕ обумовлено їхньою універсальністю: вони застосовуються для розроблення котлованів і траншей, навантаження ґрунту, планування майданчиків, демонтажу конструкцій тощо.

Крім того, традиційні ОЕ керуються оператором вручну, що істотно впливає на його психофізичне навантаження. Тривале керування екскаватором призводить до втоми та підвищує рівень імовірності помилок під час здійснення технологічних операцій. Процеси, що потребують високої точності (зокрема планування поверхні або формування укосів), значною мірою залежать від кваліфікації та досвіду оператора. Будівельні майданчики часто визначаються складними та потенційно небезпечними умовами праці, що підвищує ризик аварійних ситуацій і травматизму. Варто також зазначити, що ОЕ застосовуються

під час ліквідації наслідків аварій і техногенних катастроф, де умови здійснення робіт можуть бути особливо небезпечними. За таких умов актуальним є розроблення та впровадження роботизованих екскаваторів, здатних в автоматичному режимі забезпечити якість й ефективність проведення робіт на рівні не гіршому за рівень здійснення роботи досвідченим оператором.

Аналіз публікацій

На початку 1990-х робоче обладнання ОЕ стало розглядатися як маніпулятор промислового робота, а визначення завдання керування здебільшого було зведене саме до керування рухом зубів ковша заданою траєкторією в умовах силової взаємодії з ґрунтом. Різноманітні підходи до побудови та вдосконалення кінематичних і динамічних моделей робочого обладнання ОЕ були застосовані в [3–6]. Для врахування сил взаємодії ковша з ґрунтом використано відомі на той час емпіричні моделі.

Потім вони були використані для побудови систем автоматичного керування (САК) маніпулятором ОЕ для здійснення процесу копання з використанням класичних ПД- та ПД-регуляторів [7–10]. Проте швидко з'ясувалося, що наявні емпіричні моделі взаємодії ковша з ґрунтом є недосконалими, а в системі керування наявна велика кількість невизначеностей як щодо взаємодії ковша з ґрунтом, так і щодо процесів у механічних та гідравлічних вузлах і механізмах ОЕ. Тому традиційні

ПД-регулятори виявилися недостатньо ефективними, і дослідники звернули увагу на інші, більш досконалі регулятори: оптимальні, робасні, а згодом й інтелектуальні методи керування.

Зокрема в [11] розглянуто оптимальне керування системою повороту екскаватора з метою зменшення енергетичних втрат у гідросистемі та покращення плавності руху. Водночас використано метод оптимізації на основі аналізу балансу енергії й побудови оптимальних законів керування гідроприводом. Результати експериментів продемонстрували зниження енергоспоживання приблизно на 15 % і зменшення вібрацій під час гальмування платформи.

Методологія безмодельної оптимізації під час керування ковшем ОЕ застосована в [12]. Метою оптимізації була максимізація потужності. Цей підхід дозволяє автоматично шукати оптимальні значення керувальних параметрів без точної моделі системи, забезпечуючи ефективне використання енергії робочого обладнання.

Загальним недоліком оптимального керування є значна залежність результатів керування від точності математичної моделі об'єкта. В умовах реальної експлуатації ОЕ побудова достатньо точної математичної моделі є майже неможливою через велику кількість невизначених факторів, що виникають внаслідок взаємодії ковша з ґрунтом, наявності люфтів і зазорів у механічних вузлах, зміни тиску в гідроприводі тощо.

Для підвищення ефективності САК ОЕ в умовах невизначеності почали застосовувати робастний підхід. Зазвичай передбачається, що невизначеності відомі лише з точністю до їх належності до певних інтервалів. Саме такий підхід використано в роботах [13–15], де поточний стан САК маніпулятором екскаватора визначався способом перетинання відповідних множин.

У статті [16] для керування маніпулятором ОЕ автори використали робастний регулятор, отриманий способом μ -синтезу. Він гарантує робасну стійкість САК та показники продуктивності машини в заданих межах невизначених збурень і нелінійностей. Проведені з 21-тонним екскаватором експерименти довели істотну перевагу робастного регулятора, який забезпечив компенсацію невідомих збурень під час копання, тоді як ПД-регулятор не зміг впоратися зі збуреннями.

Робасні властивості системи керування забезпечують також керування із запізнен-

ням, який ґрунтується на використанні спостерігача із затримкою, що дозволяє аналізувати динамічні властивості системи без побудови її точної математичної моделі. Зокрема такий регулятор разом із додатковими компенсаторами для зменшення впливу нелінійностей гідроприводу застосовують для керування маніпулятором ОЕ в [17]. Експериментальні результати на 13-тонному екскаваторі показали, що система здатна забезпечити точність руху до 3 см за швидкості ковша 0,5 м/с, що перевищує можливості досвідченого оператора.

Подальшим розвитком цього підходу є робота [18], де запропоновано вдосконалений регулятор із запізненням у часі з функцією утримання, що ґрунтується на гіперболічному тангенсі. Така функція дозволяє підвищити швидкість збіжності похибки керування завдяки використанню модифікованого сигналу помилки. Результати моделювання продемонстрували переваги запропонованого регулятора, як порівняти з ПД- й адаптивними регуляторами.

Таким чином, робастний підхід застосовують для подолання пригнічень впливу збурень за наявності компенсацій немодельованої динаміки маніпулятора ОЕ та невизначеностей, що виникають через зміни умов роботи екскаватора.

Водночас навіть удосконалені регулятори значною мірою залежать від якісної апріорної інформації про систему, що ускладнює їх практичне застосування в умовах значної мінливості робочого середовища. Саме це обґрунтовує подальший інтерес дослідників до методів штучного інтелекту та машинного навчання, здатних адаптуватися до змінних умов експлуатації.

У більшості досліджень, наприклад [19, 20], штучні нейронні мережі різної архітектури використовуються для прогнозування навантажень та апроксимації нелінійної динаміки маніпулятора екскаватора. Проте в цих та аналогічних роботах мережі тренуються офлайн на попередньо зібраних великих наборах даних, що вимагає ретельної підготовки, але не гарантує урахування кожного можливого сценарію роботи [21].

Перспективним щодо цього є використання навчання з підкріпленням [22, 23], коли САК поступово формує стратегію дій на основі отриманої винагороди за здійснені дії. Однак реалізація навчання з підкріпленням безпосередньо на реальному ОЕ вимагає істотних витрат часу та матеріально-технічних ресурсів, а також створює сутте-

вий ризик виникнення аварійних ситуацій і передчасного зносу вузлів та агрегатів машини. Тому останнім часом тренування нейронних мереж САК екскаватора за цим методом здійснюють на моделях [24, 25].

Проведений аналіз сучасних публікацій свідчить про перспективність застосування методів машинного навчання для інтелектуального керування маніпулятором ОЕ з метою адаптації САК до змінних умов роботи. Водночас більшість досліджень зосереджується на вирішенні окремих завдань: прогнозуванні навантажень, моделюванні динаміки або навчанні окремих моделей без комплексного розгляду структури інформаційно-керувальної системи (ІКС) ОЕ.

Ієрархічну структуру системи керування ОЕ розглянуто в [26]. Проте в цій роботі акцент зроблений на територіально-розподіленій системі керування, в якій на рівні керування робочим процесом окремої машини виокремлено підсистеми планування рухів маніпулятора ОЕ, реалізації цих рухів в умовах невизначеності, а також переміщення самого ОЕ вздовж місцевості.

Детальний структурний синтез зазначених підсистем не здійснювався. Крім того, не розглядалися питання інтелектуалізації ОЕ. Наведене обумовлює актуальність теми цієї роботи, присвяченої структурному синтезу такої системи.

Мета і постановка завдань

Метою роботи є підвищення адаптивності керування маніпулятором одноковшевого екскаватора в умовах невизначеності завдяки удосконаленню структури інформаційно-керувальної системи з інтеграцією до підсистеми реалізації керування адаптивного модуля машинного навчання.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- формалізація задачі керування в просторі станів з урахуванням дискретної реалізації контролера;
- формування вимог до структури ІКС;
- розроблення узагальненої структури ІКС маніпулятора ОЕ;
- обґрунтування вибору адаптивного інтелектуального модуля та визначення методу його реалізації.

Формалізація задачі керування

Маніпулятор ОЕ є нелінійною багатовимірною динамічною системою, що складається з механічної та гідравлічної складових.

Динаміка механічної складової описується відомим рівнянням руху багатоланкового маніпулятора:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau, \quad (1)$$

де q – вектор узагальнених координат (кутів повороту ланок маніпулятора ОЕ); $D(q)$ – матриця сил інерції маніпулятора ОЕ; $C(q, \dot{q})$ – матриця відцентрових та коріолісових складових; $G(q)$ – вектор гравітаційних сил; $B(\dot{q})$ – вектор сил тертя; τ – вектор керувальних моментів, що створюються гідроприводом; τ_L – вектор моментів сил опору, що виникають під час взаємодії ковша з ґрунтом.

Динаміка гідроприводу також є нелінійною та визначається взаємозв'язком між витратою робочої рідини Q_L , тиском у порожнинах гідроциліндра P_L та параметрами гідравлічної системи:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = f(y, z, I_L, Q_L, P_L, C_d, \omega, \rho, P_s, A, V_t, C_t, \beta_e), \quad (2)$$

де y, z – переміщення та швидкість штока гідроциліндра, відповідно; P_s – тиск робочої рідини в напірній магістралі гідроприводу; C_d – коефіцієнт витрати робочої рідини; ω – градієнт площі відкриття золотника; ρ – густина робочої рідини; A – ефективна площа поршня; V_t – сумарний об'єм робочих порожнин; C_t – коефіцієнт внутрішніх витоків у гідроциліндрі; β_e – ефективний модуль об'ємної пружності робочої рідини; $h(\cdot)$ – нелінійна вектор-функція.

Скомбінувавши рівняння (1) і (2), з огляду на те, що керування здійснюється цифровим керувальним контролером у дискретному вигляді, динаміку маніпулятора ОЕ можна записати в просторі станів так:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), d(k)), \quad (3)$$

де $x(k)$ – вектор стану системи, $x(k) \in X$; $u(k)$ – вектор керувальних впливів, $u(k) \in U$; $d(k)$ – вектор внутрішніх і зовнішніх невизначених збурень (моментів опору ґрунту τ_L , витоків у гідроприводі тощо), компоненти яких відомі з точністю до належності відповідним множинам, $d_i(k) \in D_i$; k – номер кроку дискретизації за часом.

Компонентами вектора стану $x(k)$ є узагальнені координати маніпулятора $q(k)$, їхні швидкості $\dot{q}(k)$, а також змінні, що визначають стан гідроприводу та взаємодію ковша з робочим середовищем.

Метою керування є забезпечення відстеження заданої траєкторії ковша в глобальній системі координат за мінімізації похибки та енергетичних витрат [27]:

$$J = \sum_{k=0}^N (e_k^T Q e_k + u_k^T R u_k), \quad (4)$$

де e_k – похибка керування; Q та R – матриці відповідних розмірностей; N – кількість кроків дискретизації.

Вимоги до інформаційно-керувальної системи маніпулятора ОЕ

Як зазначено в математичній моделі (3), маніпулятор ОЕ є нелінійним багатовимірним об'єктом керування з невизначеними збуреннями, джерелами яких є змінні сили взаємодії ковша з ґрунтом, внутрішні витоки в гідроприводі, варіації параметрів робочої рідини й інші немодельовані динамічні ефекти. Ці фактори суттєво впливають на якість системи керування, а їх врахування в аналітичній моделі є ускладненим. З огляду на це структура інформаційно-керувальної системи (ІКС) має задовольняти таким вимогам (рис. 1):

- забезпечення робастної стійкості системи керування та якості здійснення робіт відповідно до заданого критерію (4) за наявності збурень $d_i(t) \in D_i$ в межах допустимих областей стану X , керувальних впливів U й обмежень на кінематичні та динамічні параметри виконавчих підсистем;

- здатність забезпечувати збір та попереднє оброблення інформації. Оскільки ОЕ є багатовимірним об'єктом керування, а вимірювальні параметри мають різне фізичне походження, ІКС має забезпечувати узгоджений прийом сигналів від різноманітних датчиків, їх перетворення у форму, придатну для подальшого використання, синхронізацію в часі та фільтрацію перешкод;

- здатність оцінювання стану ОЕ та його робочого середовища на підставі доступних результатів вимірювань, що полягає в їх інтерпретації з урахуванням динамічних зв'язків маніпулятора ОЕ та умов здійснення робіт з метою формування достовірної інформаційної основи для прийняття рішень у межах ІКС;

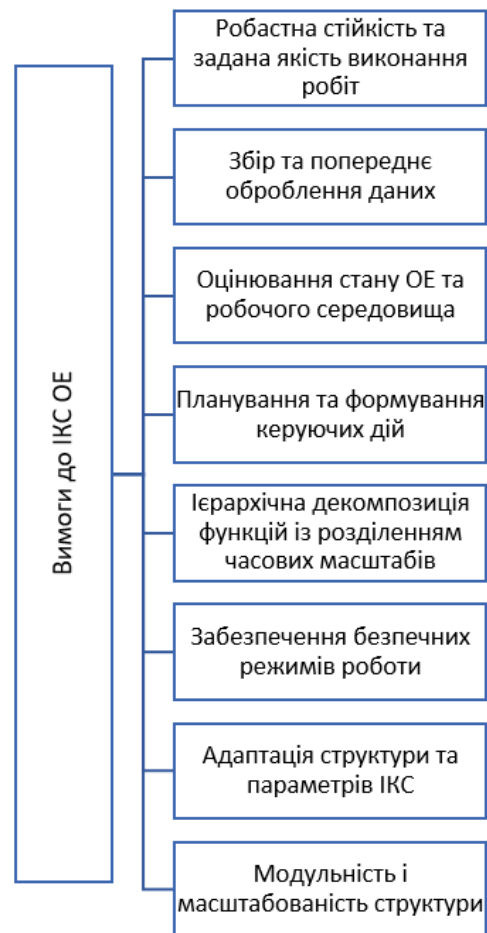


Рис. 1. Вимоги до ІКС маніпулятора ОЕ

- здатність планування та формування керувальних дій на підставі оціненого стану маніпулятора ОЕ та умов проведення робіт з урахуванням заданого критерію (4) і поточних обмежень, а також коригування прийнятих рішень відповідно до змін навантаження та зовнішніх умов без зміни базової структури керування;

- підтримка ієрархічної декомпозиції функцій із розділенням часових масштабів, що передбачає структурний поділ процесів керування на рівні, які відрізняються швидкістю та функціональним призначенням: оцінювання стану, планування дій, формування та коригування керувальних впливів тощо. ІКС має забезпечувати узгоджену взаємодію цих рівнів без порушення функціональності та без втрати актуальності інформації за переходу між часовими масштабами. Це дозволяє розмежувати задачі стратегічного формування мети й оперативного керування;

- здатність здійснювати моніторинг критичних параметрів ІКС та виконавчих підсистем і забезпечувати безпечні режими роботи

в разі виходу зазначених параметрів за визначені межі;

- здатність до адаптації структури або параметрів ІКС на основі аналізу накопиченої інформації та результатів функціонування ІКС;

- модульність і масштабованість структури для можливості незалежного розвитку, інтеграції додаткових інформаційних або обчислювальних модулів та заміни окремих функціональних блоків ІКС без порушення їх узгодженої взаємодії.

Загальна структура інформаційно-керувальної системи маніпулятора ОЕ

Узагальнену структуру ІКС маніпулятора ОЕ наведено на рис. 2. Вона реалізує замкнутий цикл перетворення інформації від вимірювань до формування керувальних впливів на виконавчі підсистеми та містить підсистеми планування робіт, збору й попереднього оброблення інформації, оцінювання стану, формування траєкторій, реалізації керування та забезпечення безпечної роботи.

Визначення загального завдання керування здійснюється на верхньому рівні ІКС, де підсистемою планування робіт визначаються вимоги до просторового положення ОЕ, траєкторій ковша у світовій системі координат і критерій завершення процесу будівництва земляної споруди.

Для цього використовуються завантажений до ІКС цифровий проєкт земляної споруди й апріорна інформація про будівельний

майданчик. Цифровий проєкт містить проєктні контури майбутньої споруди, поверхні та відмітки, а апріорна інформація про будівельний майданчик описує умови здійснення робіт і обмеження робочої зони (геометричні межі, локальні особливості ділянки, апріорна оцінка типу ґрунту тощо). Критерієм завершення процесу будівництва земляної споруди є досягнення її проєктних параметрів у межах заданих допусків.

Досягнення критерію контролюється підсистемою планування робіт способом постійного порівняння поточного аналізу геометричних параметрів робочої поверхні з цифровим проєктом. Після досягнення критерію система переходить у режим завершення робіт або розпочинає процес створення наступної споруди. За потреби підсистема планування може уточнювати мету та параметри здійснення операції на основі поточного аналізу стану ОЕ й умов проведення робіт.

Результати процесу глобального планування передаються до підсистеми формування траєкторій. Вона поєднує планову мету, отримані від підсистеми планування з аналізом поточного стану маніпулятора та робочого середовища, визначає закони зміни узагальнених координат маніпулятора ОЕ, їхніх швидкостей і прискорень у локальній системі координат маніпулятора, що забезпечують проходження кромки ковша заданими траєкторіями. Визначені закони надходять до підсистеми реалізації керування.

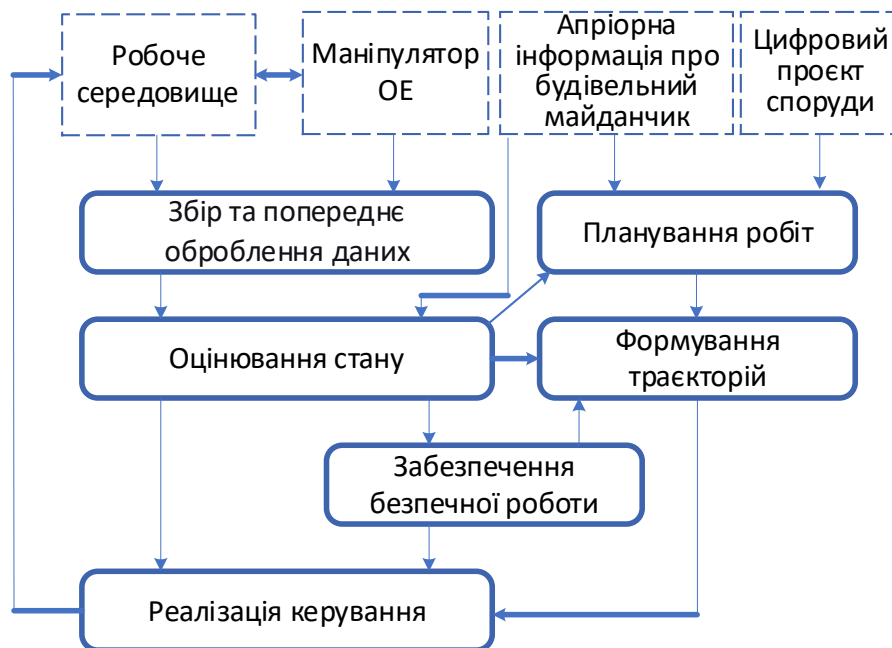


Рис. 2. Структура інформаційно-керувальної системи маніпулятора ОЕ

Підсистема реалізації керування формує послідовність керувальних впливів на виконавчі підсистеми гідроприводу відповідно до заданого критерію якості (4) з урахуванням обмежень, забезпечуючи відпрацювання заданих рухів маніпулятора. Реалізація керувальних впливів призводить до зміни стану маніпулятора ОЕ й робочого середовища. Інформація від сенсорної системи ОЕ та зовнішніх засобів вимірювання щодо поточного стану маніпулятора ОЕ та робочого середовища надходить до підсистеми збору та попереднього оброблення, де здійснюють синхронізацію вимірювань у часі, фільтрацію, нормалізацію з метою підготовки отриманої інформації для подальшого використання.

Результати попереднього оброблення інформації передаються до підсистеми оцінювання стану, яка формує узагальнену оцінку поточного стану маніпулятора та параметрів взаємодії з робочим середовищем. Результати роботи підсистеми оцінювання стану використовуються паралельно з проектом споруди й апріорними даними про будівельний майданчик для подальшого формування траєкторій і реалізації керування, забезпечуючи зворотний зв'язок у контурі керування.

Підсистема забезпечення безпечної роботи отримує інформацію з підсистеми оцінювання стану та здійснює контроль допустимості режимів функціонування. У разі виходу критичних параметрів за встановлені межі вона формує коригувальні сигнали, які враховуються на етапах формування траєкторій і керувальних дій.

Структуру розроблено на основі декомпозиції загальної задачі керування за функціональними ознаками із поділом підсистем за частотою їх функціонування.

Формування керувальних впливів на виконавчі підсистеми здійснюється з найвищою частотою.

Збір, попереднє оброблення результатів вимірювань величин різного фізичного походження й оцінювання стану здійснюються з частотами, узгодженими з частотами відповідних контурів керування.

Формування траєкторій здійснюється з частотою, меншою за частоту реалізації керування, але достатньою для оновлення параметрів руху відповідно до оціненого стану та результатів планування робіт.

Підсистема планування робіт, у межах якої визначається план зведення земляної споруди відповідно до цифрового проекту та апріорної інформації про будівельний майданчик, належить до процесів нижчої частоти оновлення.

Підсистема забезпечення безпечної роботи є наскрізною, оскільки контролює допустимість режимів функціонування ОЕ в усіх підсистемах незалежно від частоти їх оновлення.

Структура підсистеми реалізації керування маніпулятором ОЕ

Запропонована загальна структура ІКС маніпулятора ОЕ (рис. 2) відображає укрупнену структурну модель системи. Кожна її підсистема має власну внутрішню організацію, що містить інформаційні канали, алгоритмічні модулі та механізми узгодження сигналів, необхідні для здійснення своїх функцій.

У цій роботі пропонується структура підсистеми реалізації керування (рис. 3), оскільки вона є кінцевою ланкою ІКС, де інформаційні рішення верхніх рівнів перетворюються на фізичні впливи на гідропривід і ківш. Саме на цьому рівні проявляються невизначеності, що безпосередньо визначають якість здійснення робочого процесу ОЕ



Рис. 3. Структура підсистеми реалізації керування маніпулятором ОЕ

З урахуванням невизначених збурень, зумовлених взаємодією ковша з ґрунтом і параметричними відхиленнями гідросистеми, підсистема керування реалізується як комбінована двоконтурна схема (див. рис. 3).

Базовий контур формує основний керувальний вплив і забезпечує відпрацювання заданих рухів маніпулятора, тоді як адаптивний інтелектуальний модуль формує додатковий коригувальний вплив, спрямований на компенсацію невизначеностей і підвищення якості керування без зміни базової архітектури ікс

На вхід підсистеми реалізації керування надходять сформована підсистемою формування бажана траєкторія узагальнених координат $q_d(k)$, а також результати оцінювання поточного стану $x(k)$ маніпулятора ОЕ та робочого середовища. Вихідними сигналами підсистеми керування є керувальні впливи на виконавчі підсистеми гідроприводу, що реалізуються через електрогідравлічні перетворювачі та виконавчі гідроциліндри та забезпечують відпрацювання заданих рухів маніпулятора ОЕ.

Формування керувальних впливів здійснюється цифровим керувальним контролером із використанням каскадної структури керування зі зворотними зв'язками за узагальненими координатами маніпулятора $q(k)$ та тиском у гідроприводі $p(k)$.

Як основний закон керування положенням маніпулятора ОЕ доцільно використати класичний регулятор ПІД-типу, який формує керувальний вплив на основі похибки відпрацювання заданого сигналу. Для цифрового контролера приріст керувального сигналу можна описати таким виразом:

$$\begin{aligned} \Delta u_{pid}(k) &= u_{pid}(k) - u_{pid}(k-1) = \\ &= k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + \\ &+ k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{aligned} \quad (5)$$

де $e = q_d(k) - q(k)$ – похибка керування,

k_p, k_i, k_d – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових.

Застосування регулятора ПІД-типу забезпечує відпрацювання сформованих траєкторій руху $q(k)$ маніпулятора ОЕ в номінальному режимі роботи.

Для регулювання тиску робочої рідини в гідроприводі також може бути використаний регулятор ПІД-типу, який працює з вищою частотою дискретизації, на відміну від регу-

лятора основного контуру, та формує керувальний вплив $u_p(k)$ на електрогідравлічний пропорційний клапан.

Проте вище було зазначено, що наявність невизначених факторів призводить до зниження якості системи керування з традиційними ПІД-регуляторами. З огляду на це пропонується комбінована структура регулятора: паралельно до основного регулятора ПІД-типу використовується додатковий регулятор у вигляді інтелектуального модуля, що генерує коригувальний вплив, спрямований на компенсацію невизначеностей і підвищення якості керування:

$$u(k) = u_{pid}(k) + u_c(k), \quad (6)$$

де $u_c(k)$ – керувальний вплив додаткового регулятора.

Проведений вище аналіз літератури демонструє доцільність використання для керування ОЕ інтелектуальних методів машинного навчання, зокрема навчання з підкріпленням, що дозволяє формувати керувальні впливи з урахуванням накопиченого досвіду функціонування системи й адаптувати їх до змінних умов здійснення робіт. Оскільки керування маніпулятором ОЕ визначається неперервним простором керувальних дій, то для формування додаткового керувального впливу в інтелектуальному модулі доцільно використати метод класу «актор-критик» [23, 28].

Зазначений метод поєднує формування керувальних дій (актор) з оцінюванням їхньої ефективності (критик), що забезпечує адаптацію закону керування до реальних умов роботи ОЕ без зміни структури ПІД-регулятора.

Актор на основі оціненого стану системи $x(k)$ формує додатковий коригувальний вплив $u_c(k)$ у (6):

$$u_c(k) = \pi_\theta(x(k)), \quad (7)$$

де π – функція політики актора,

θ – параметри актора.

Критик здійснює оцінювання якості поточної стратегії керування відповідно до заданого критерію (4): $V_\omega(s(k))$, де ω – параметри критика [28].

Оцінка, сформована критиком, використовується для оновлення параметрів політики актора θ , що забезпечує поступове уточнення

параметрів інтелектуального модуля та компенсацію невизначених збурень під час роботи ІКС.

Навчання й оновлення параметрів інтелектуального модуля здійснюються з огляду на обмеження, задані підсистемою забезпечення безпечної роботи.

Таким чином, запропонована структура підсистеми реалізації керування поєднує класичні й інтелектуальні методи, забезпечуючи адаптацію системи керування маніпулятором ОЕ до дії невизначених факторів.

Висновки

Автоматизація та роботизація одноковшевих екскаваторів є актуальним завданням, вирішення якого дозволить підвищити ефективність і безпеку здійснення будівельних робіт.

Проведений аналіз сучасних підходів до керування одноковшевидами екскаваторами довів перспективність застосування в їхніх інформаційно-керувальних системах методів машинного навчання, що дозволяють забезпечити адаптацію керувальних впливів до невизначених збурень через змінні сили взаємодії ковша з ґрунтом, внутрішні витоки в гідроприводі, варіації параметрів робочої рідини та інші немодельовані динамічні ефекти.

Незважаючи на значні досягнення в застосуванні методів машинного навчання для керування екскаваторами, їх подальшому поширенню перешкоджає відсутність єдиної узагальненої структури інформаційно-керувальної системи, яка б була методологічною основою інтелектуального керування екскаваторами та забезпечувала інтеграцію нових функціональних можливостей без порушення її цілісності та узгодженості функціонування.

Формалізовано задачу керування маніпулятором одноковшевого екскаватора в дискретному просторі станів з урахуванням вектора невизначених збурень, що дозволило узгодити математичну модель маніпулятора з цифровою реалізацією керувального контролера.

На основі аналізу робочого процесу одноковшевого екскаватора та сучасних досліджень у галузі керування екскаваторами визначено вимоги до інтелектуальної інформаційно-керувальної системи екскаватора, що передбачають забезпечення робасної стійкості та якості керування за наявності збурень,

організацію збору й попереднього оброблення багатовимірних вимірjuвальних даних, оцінювання стану маніпулятора та робочого середовища, забезпечення планування та формування керувальних дій з урахуванням обмежень, ієрархічну декомпозицію функцій із розділенням часових масштабів, моніторинг безпечних режимів роботи, адаптацію структури або параметрів ІКС до змін умов функціонування та збурень, а також модульність її побудови для забезпечення можливості інтеграції та розвитку окремих функціональних підсистем.

На основі сформульованих вимог запропоновано структурну модель інтелектуальної інформаційно-керувальної системи екскаватора, що задовольняє визначеним вимогам і відрізняється від наявних підходів тим, що інтегрує класичну каскадну схему ПІД-керування з адаптивним інтелектуальним модулем у межах єдиної ієрархічної архітектури з розділенням часових масштабів.

Запропоноване рішення забезпечує адаптивну компенсацію невизначених збурень за умови збереження робасних властивостей базового контуру керування та без зміни його структури.

Обґрунтовано доцільність використання методу класу «актор-критик» для реалізації адаптивного інтелектуального модуля в підсистемі реалізації керування з метою компенсації невизначених збурень і немодельованих динамічних впливів.

Отримані результати визначають методологічну основу синтезу інтелектуальних інформаційно-керувальних систем маніпуляторів одноковшевих екскаваторів.

Подальші дослідження спрямовані на синтез інтелектуального модуля на основі методу «актор-критик» з метою підвищення адаптивності інформаційно-керувальної системи екскаватора в умовах невизначених збурень.

Література

1. Earthmoving Equipment Market Size, Industry Analysis and Forecast 2032. *Acumen Research and Consulting, Advisory Company*. URL: <https://www.acumenresearchandconsulting.com/earthmoving-equipment-market>
2. Earthmoving Heavy Equipment Market Insights. *Verified Market Reports*. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/earthmoving-heavy-equipment-market>
3. Vähä P. K., Koivo A. J., Skibniewski M. J. Excavator Dynamics and Effect of Soil on

- Digging. *8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Stuttgart, Germany, 3–5 June 1991. P. 297–306. <https://doi.org/10.22260/isarc1991/0030>
4. Vähä P., Skibniewski M., Koivo A. Kinematics and trajectory planning for robotic excavation. *International Conference on Construction Congress '91*, Cambridge, MA, Apr. 1991. New York, 1991. P. 787–793.
 5. Khoshzaban M., Sassani F., Lawrence P. D. Autonomous kinematic calibration of industrial hydraulic manipulators. *4th International Symposium on Robotics and Manufacturing (ISRAM'92)*, Santa Fe, N.M., November 11–13, 1992. P. 577–584.
 6. Vähä P. K., Skibniewski M. J. Dynamic Model of Excavator. *Journal of Aerospace Engineering*. 1993. Vol. 6. No. 2. P. 148–158. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(1993\)6:2\(148\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(1993)6:2(148))
 7. Plonecki L., Cendrowicz J. A Digital Control System for Hydraulic Excavator Fixtures. *12th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Warsaw, Poland, 30 May – 1 June 1995. P. 533–537. <https://doi.org/10.22260/ISARC1995/0064>
 8. Modeling and Control of Excavator Dynamics during Digging Operation / A. J. Koivo et al. *Journal of Aerospace Engineering*. 1996. Vol. 9. No. 1. P. 10–18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(1996\)9:1\(10\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(1996)9:1(10))
 9. LUCIE the robot excavator-design for system safety / D. Seward et al. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, USA. Vol. 1. P. 963–968. <https://doi.org/10.1109/robot.1996.503897>
 10. Gurko A., Kyrychenko I., Yaryzhko A. Trajectories Planning and Simulation of a Backhoe Manipulator Movement. *2nd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)*, Zaporizhzhia, Ukraine, April 15–19, 2019. P. 771–785. <https://doi.org/10.32782/cmisis/2353-61>
 11. Research on Optimal Control of Excavator Negative Control Swing System / L. Zhang et al. *Processes*. 2020. Vol. 8. No. 9. P. 1096. <https://doi.org/10.3390/pr8091096>
 12. Sotiropoulos F. E., Asada H. H. A Model-Free Extremum-Seeking Approach to Autonomous Excavator Control Based on Output Power Maximization. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. Vol. 4. No. 2. P. 1005–1012. <https://doi.org/10.1109/lra.2019.2893690>
 13. Robust Control of Mobile Transport Object with 3D Technical Vision System / Gurko A. et al. *IEEE Vigesimosegunda Reunión Internacional de otoño ROC&C2011*, 27.11 – 3.12.2011, Acapulco, Mexico, 6p.
 14. Gurko A. G., Eryemenko I. F. Control of Discrete System under Bounded Disturbances. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2011. Vol. 43. No. 11. P. 18–29. <https://doi.org/10.1615/jau-tomatinfscien.v43.i11.30>
 15. Robust Control of Excavation Mobile Robot with Dynamic Triangulation Vision. *9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics / Gurko A. et al.* Rome, Italy, 28–31 July 2012. Vol. 2. P. 481–484. <https://doi.org/10.5220/0004044604810484>
 16. A Robust Control Approach for Hydraulic Excavators Using μ -synthesis / S. Kim et al. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2018. Vol. 16. No. 4. P. 1615–1628. <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0071-9>
 17. Lee S-J, Pyung H. C., Kwon Y-M. An experimental study on Cartesian tracking control of automated excavator system using TDC-based robust control design. *Proceedings of the 1999 American Control Conference*, San Diego, CA, USA, 2–4 June 1999. P. 3180–3185. <https://doi.org/10.1109/acc.1999.782351>
 18. Kim D. W., Park P. An advanced time-delay controller for robust trajectory control of manipulator in the excavator. *2021 Second International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP)*, Bangkok, Thailand, 20–22 January 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ica-symp50206.2021.9358246>
 19. Intelligent prediction for digging load of hydraulic excavators based on RBF neural network / D. Huo et al. *Measurement*. 2022. P. 112210. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112210>
 20. Prediction of digging force using artificial neural network / M. A. I. Tantowi et al. *International Symposium on Earth Science and Technology*, Fukuoka. 2022. P. 4. URL: <https://digilib.itb.ac.id/assets/files/2023/MjAyMiBNVUhhBTU1BRCBBTkdHQVJBIEINQU0gVEFOVE9XSSAxLVBBUEVSLnBkZg.pdf>
 21. Application of physics-informed machine learning for excavator working resistance modeling / S. Li et al. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024. Vol. 209. P. 111117. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111117>
 22. Мірошник В. А., Гурко В. О., Гурко О. Г. Використання навчання з підкріпленням для планування шляху будівельного робота. *Біоніка інтелекту*. 2024. № 2 (101). С. 34–38. [https://doi.org/10.30837/bi.2024.2\(101\).05](https://doi.org/10.30837/bi.2024.2(101).05)
 23. Кириченко, І. Г., Гурко В. О. Застосування машинного навчання в інтелектуальній системі керування ковшем навантажувача. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2025. Вип. 108. С. 78–88. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.78>
 24. 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. P. 5679–5686. <https://doi.org/10.1109/lra.2022.3152865>

25. Soil-Adaptive Excavation Using Reinforcement Learning / P. Egli et al. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/lra.2022.3189834>
 26. Гурко О. Г. Структурна модель системи керування робочим процесом екскаватора. *Автомобільний транспорт*. 2016. Вип. 39. С. 33–38.
 27. Linear Quadratic Gaussian Control for Robotic Excavator / A. Gurko et al. *3rd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, Zaporizhzhia, Ukraine, April 27–May 1, 2020. Vol. 2608. P. 144–155. <https://doi.org/10.32782/cmisis/2608-12>
 28. Ганенко Л. Д., Жебка В. В. Застосування методів навчання з підкріпленням для планування шляху мобільних роботів. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2024. № 1. С. 16–25. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.011625>
- References**
1. Earthmoving Equipment Market Size, Industry Analysis and Forecast 2032. Acumen Research and Consulting. [Online]. Available: <https://www.acumenresearchandconsulting.com/earthmoving-equipment-market>
 2. Earthmoving Heavy Equipment Market Insights. Verified Market Reports. [Online]. Available: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/earthmoving-heavy-equipment-market>
 3. Vähä, P. K., Koivo, A. J. and Skibniewski, M. J. (1991). Excavator dynamics and effect of soil on digging, in *Proceedings of the 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Stuttgart, Germany, Jun. 3–5, pp. 297–306, doi: 10.22260/isarc1991/0030.
 4. Vähä, P., Skibniewski, M. and Koivo, A. (1991). Kinematics and trajectory planning for robotic excavation, in *Proceedings of Construction Congress '91*, Cambridge, MA, USA, Apr. pp. 787–793.
 5. Khoshzaban, M., Sassani, F. and Lawrence, P. D. (1992). Autonomous kinematic calibration of industrial hydraulic manipulators, in *Proceedings of the 4th International Symposium on Robotics and Manufacturing (ISRAM'92)*, Santa Fe, NM, USA, Nov. 11–13, pp. 577–584.
 6. Vähä, P. K. and Skibniewski, M. J. (1993). Dynamic model of excavator. *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 148–158, doi: 10.1061/(ASCE)0893-1321(1993)6:2(148).
 7. Plonecki, L. and Cendrowicz, J. (1995). A digital control system for hydraulic excavator fixtures, in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Warsaw, Poland, May 30–Jun. 1, pp. 533–537, doi: 10.22260/ISARC1995/0064.
 8. Koivo, A. J. et al. (1996). Modeling and control of excavator dynamics during digging operation. *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 10–18, doi: 10.1061/(ASCE)0893-1321(1996)9:1(10).
 9. Seward, D., Margrave, F., Sommerville, I. and Morrey, R. (1996). LUCIE the robot excavator-design for system safety. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, USA, pp. 963–968 vol.1, doi: 10.1109/ROBOT.1996.503897.
 10. Gurko, A., Kyrychenko, I. and Yaryzhko, A. (2019). Trajectories planning and simulation of a backhoe manipulator movement, in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)*, Zaporizhzhia, Ukraine, Apr. 15–19, pp. 771–785, doi: 10.32782/cmisis/2353-61.
 11. Zhang L. et al. (2020). Research on optimal control of excavator negative control swing system. *Processes*, vol. 8, no. 9, Art. no. 1096, doi: 10.3390/pr8091096.
 12. Sotiropoulos, F. E. and Asada, H. H. (2019). A Model-Free Extremum-Seeking Approach to Autonomous Excavator Control Based on Output Power Maximization, in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1005–1012, April doi: 10.1109/LRA.2019.2893690.
 13. Gurko, A. et al. (2011). Robust control of mobile transport object with 3D technical vision system, in *Proceedings of the IEEE Vigesimo Segunda Reunión Internacional de Otoño ROC&C 2011*, Acapulco, Mexico, Nov. 27–Dec. 3, pp. 1–6.
 14. Gurko, A. G. and Eryemenko, I. F. (2011). Control of discrete system under bounded disturbances. *Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 43, no. 11, pp. 18–29, doi: 10.1615/JAutomatInfScien.v43.i11.30.
 15. Gurko, A. et al. (2012). Robust control of excavation mobile robot with dynamic triangulation vision,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Rome, Italy, Jul. 28–31, vol. 2, pp. 481–484, doi: 10.5220/0004044604810484.
 16. Kim, S. et al. (2018). A robust control approach for hydraulic excavators using μ -synthesis. *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 1615–1628, doi: 10.1007/s12555-017-0071-9.
 17. Lee, S.-J., Pyung, H. C. and Kwon, Y.-M. (1999). An experimental study on Cartesian tracking control of automated excavator system using TDC-based robust control design, in *Proceedings of the American Control Conference*, San Diego, CA, USA, Jun. 2–4, pp. 3180–3185, doi: 10.1109/ACC.1999.782351.
 18. Kim, D. W. and Park, P. (2021). An advanced time-delay controller for robust trajectory control of manipulator in the excavator, in *Proceedings of the Second International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP)*, Bangkok, Thailand, Jan. 20–22, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICA-SYMP50206.2021.9358246.
 19. Huo, D. et al. (2022). Intelligent prediction for digging load of hydraulic excavators based on

- RBF neural network. *Measurement*, Art. no. 112210, doi: 10.1016/j.measurement.2022.112210.
20. Tantowi, M. A. I. et al. (2022). Prediction of Digging Force Using Artificial Neural Network, in *Proceedings of the International Symposium on Earth Science and Technology*, Fukuoka, Japan, 4. [Online]. Available: <https://digilib.itb.ac.id/assets/files/2023/MjAyMiBNVUhBTU1BRCBBTkdHQVJBIEN-QU0gVEFOVE9XSSAxLVBBUEVSLnBkZg.pdf>
 21. Li, S. et al. (2024). Application of Physics-Informed Machine Learning for Excavator Working Resistance Modeling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 209, p. 111117, doi: 10.1016/j.ymsp.2024.111117.
 22. Mirosnyk, V. A., Hurko, V. O. and Gurko, O. G. (2026). The use of reinforcement learning to plan the path of a construction robot. *Bionics of intelligence*, vol. 2, no. 101, pp. 34–38, Dec. 2024. Accessed: Feb. 27, doi: 10.30837/bi.2024.2(101).05 (in Ukrainian).
 23. Kyrychenko, I. and Hurko, V. (2025). Machine learning applications in intelligent wheel loader bucket control systems. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, no. 108, pp. 78–88, doi: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.78 (in Ukrainian).
 24. Egli, P. and Hutter, M. (2022). A General Approach for the Automation of Hydraulic Excavator Arms Using Reinforcement Learning," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 5679–5686, April 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3152865.
 25. Egli, P., Gaschen, D., Kerscher, S., Jud, D. and Hutter, M. (2022). Soil-Adaptive Excavation Using Reinforcement Learning, in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 9778–9785, Oct., doi: 10.1109/LRA.2022.3189834.
 26. Gurko, O. (2016). A structural model of an excavator workflow control system. *Automobile Transport*, no. 39, pp. 33–38 (in Ukrainian).
 27. Gurko, A., Kyrychenko, I., Yaryzhko, A. and Konyukhin, O. (2020). Linear Quadratic Gaussian Control for Robotic Excavator, in *Proceedings of the 3rd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, Zaporizhzhia, Ukraine, April 27 – May 1, 2020, vol. 2608, pp. 144–155, doi: 10.32782/cmisi/2608-12.
 28. Hanenko, L. D., Zhebka, V. V. (2024). Application of reinforcement learning methods for path planning of mobile robots. *Telecommunication and Information Technologies*, vol. 82, no. 1, pp. 16–25, doi: [10.31673/2412-4338.2024.011625](https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.011625) (in Ukrainian).

Мірошник Владислав Андрійович, аспірант, mirovla@ukr.net,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8585-8258>,

Гурко Олександр Геннадійович, д.т.н., професор, кафедра автоматизації та комп'ютерно-

інтегрованих технологій, gurko@khadi.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9905-8584>, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Structural synthesis of an intelligent information and control system for an excavator based on machine learning

Abstract. Problem. The automation and robotization of hydraulic excavators is a relevant issue, and the solution will increase the efficiency and safety of construction work. This issue, however, is complicated by high uncertainty stemming from variable forces between the bucket and the soil, internal leaks in the hydraulic drive, changes in the working fluid's parameters, and other unmodeled dynamic effects. Under these conditions, traditional PID controllers are not effective enough. The use of machine learning methods in excavator information and control systems (ICS) is a promising direction. Yet, their widespread use is hindered by the lack of a unified generalized ICS structure. **Goal.** This paper aims to enhance the adaptability of excavator manipulator control under uncertainty by structurally improving the information and control system and integrating an adaptive machine-learning module into the control implementation subsystem. **Methodology.** The development of the ICS structure was preceded by formalizing the control task in the state space, taking into account the controller's discrete-time implementation. Next, the requirements for the ICS were formulated. A generalized ICS structure for an excavator manipulator was then developed, the choice of an adaptive intelligent module was justified, and a method for its implementation was proposed. **Results.** Requirements for an intelligent excavator ICS have been formulated based on an analysis of the excavator's working process and current research in excavator control. The requirements include robust stability and control performance in the presence of disturbances; collection and preprocessing of multidimensional measurement data; estimation of the manipulator and working-environment states; planning and generation of control actions under constraints; hierarchical functional decomposition with separation of time scales; monitoring of safe operating modes; adaptation of the ICS structure or parameters to changes in operating conditions and disturbances; and a modular architecture enabling the integration and further development of individual functional subsystems. Based on the formulated requirements, a structural model of an excavator's intelligent ICS is proposed that differs from existing approaches by integrating a classic cascade PID controller with an adaptive intelligent module within a single hierarchical architecture with time-scale separation. The proposed solution provides adaptive compensation for uncertain disturbances while maintaining the robust properties of the baseline control loop, without altering its structure.

*The appropriateness of using an actor-critic method for implementing an adaptive intelligent module in the control implementation subsystem to compensate for disturbances and unmodelled dynamic influences is justified. **Originality.** The work provides a unified methodological architecture that integrates classical cascade PID control with an adaptive actor-critic module within a single hierarchical, time-scale-separated ICS. **Practical value.** The obtained results form a methodological basis for intelligent excavator control and enable the integration of new functional capabilities without compromising system integrity or the coordinated operation of its structural elements.*

Key words: excavator, information control system, structural synthesis, adaptive control, PID controller, reinforcement learning, actor-critic.

Miroshnyk Vladyslav, PhD student,
mirovla@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8585-8258>,

Gurko Oleksandr, professor, Doct. of Science,
Automation and Computer-Integrated Technologies
Department, gurko@khadi.kharkov.ua.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9905-8584>,

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received:
07.01.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 19.01.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.
