

ВІРТУАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСКАВАТОРІВ В AUTODESK INVENTOR

Кириченко І. Г., Черніков О. В., Мілих А. О., Бакаєв Д. І.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті розглянуто результати віртуальних досліджень щодо визначення кінематичних і силових параметрів модульного гідравлічного екскаватора середнього класу, а також подано статистичні дослідження складників гідропривода на прикладі екскаваторів середнього класу з масою 25–30 т. Окрему увагу приділено питанню відтворення змін центра мас машини.

Ключові слова: модульний екскаватор, Autodesk Inventor, 3D-моделювання, шарнірне з'єднання, кутова швидкість, розподіл мас, центр мас, силове навантаження.

Вступ

Екскаватори – найбільш поширені засоби механізації у виконанні багатьох технологічних операцій у цивільному, промисловому й дорожньому будівництві, а також у комунальному й лісотехнічному господарствах. За останні роки здійснено революційний прорив у царині технологічних можливостей цих машин. Застосування на екскаваторах адаптерів *Quick-Coupler* дало змогу дуже швидко змінювати робочі органи, і не тільки звичайні ковшові, а й різноманітні технологічні активної дії з подачею робочої рідини гідроприводів. Упровадження засобів *Tiltrotator* і *Steelwrist* зробило екскаватори ще більш універсальними машинами. Одна й та сама машина може виконувати функції як «прямої», так і «зворотної» лопати. Сучасні екскаватори оснащені комп'ютерними системами контролю робочих параметрів, а також інтелектуалізованими засобами керування робочим обладнанням. Саме цей факт усе частіше надихає дослідників звертатися до комп'ютеризованих методів у проєктуванні й пошуку нових технічних рішень у царині екскаваторобудування.

Аналіз публікацій

Немало досліджень присвячено загальному розгляду наявних екскаваторів для дослідження їх конструктивних особливостей і зіставлення техніко-економічних показників [1]. Метою таких праць є, наприклад, аналіз гідравлічних систем, пошук додаткових факторів, що впливають на роботу механізмів. Надалі такі знання допоможуть краще розуміти поведінку машин і знаходити кращі способи розв'язання поставлених завдань з оптимізації конструкції та роботи важкої техніки. Так, наприклад, автори статей [2–4] пропону-

ють оцінювати продуктивність екскаваторів за допомогою більш глибокого розуміння загальних закономірностей опору копанню. Дослідження спрямоване на з'ясування, як різні умови роботи й типи машин позначаються на характеристиках опору. Зроблено висновок, що тип машини впливає сильніше, ніж умови копання. Результати цієї роботи закладають основу для вдосконалення моделей оцінювання продуктивності екскаваторів. Основні інтервали можуть використовуватися в моделях теоретичної сили копання, а розуміння динаміки опору важливе для оптимізації проєктування та планування траєкторій.

Автори робіт [5–6] дослідили продуктивність копання та властивості напружень ковша екскаватора, використовуючи методи кінцево-елементного аналізу. Комбінований підхід для моделювання складних процесів дає змогу одночасно моделювати рух механізму, взаємодію ковша з матеріалом, напруження та знос деталей. Тобто це метод, який поєднує механіку руху, фізику частинок і міцність конструкцій в одному аналізі для точного прогнозування режимів навантаження екскаваторів.

Дослідження телескопічного екскаватора-планувальника UDS 214 на базі автомобільного шасі [7] було спрямовано на визначення впливу параметрів гідравлічного контуру на продуктивність і енергоефективність цієї машини. Отримано практичні рекомендації щодо заміни елементної бази гідропривода й встановлено вплив модернізації на техніко-економічні показники. За попередніми розрахунками така модернізація дає змогу зменшити витрати в гідравлічній системі екскаватора на 15 %, що призводить до економії палива 0,2 л/год, а за 2000 мотогодин на рік, відповідно, 400 л.

Значну кількість досліджень присвячено оптимізації конструкцій і підвищенню міцності. Основною метою було зниження ваги конструкції за умови збереження міцності, оптимізація форм, товщин і матеріалів для збільшення довговічності та зменшення споживання палива. Так, одні фахівці змоделювали взаємодію ковша й середовища для аналізу робочого циклу за допомогою використання методу скінченних елементів, а інші провели параметричну оптимізацію для аналізу напружень у стрілі та рукояті [4, 8–10]. Завдяки такому підходу вдалось зменшити масу робочого обладнання екскаватора на понад 10 %, максимальні напруження були зменшені на 15 %.

Світова наукова спільнота в галузі машинобудування зосереджена також на створенні передумов для розроблення й подальшого впровадження інтелектуальних, адаптивних і енергоефективних машин, зокрема й екскаваторів, які можуть працювати автономно або під дистанційним контролем у складних технологічних умовах. Ключовий тренд – поєднання інженерної оптимізації металоконструкцій і гідропривода з цифровими технологіями, щоб підвищити продуктивність, надійність, економічну ефективність, безпеку й стійкість будівельної техніки, тобто йдеться про створення мехатронних систем машинобудівного комплексу.

Дослідження у сфері дистанційного керування передбачають застосування VR-інтерфейсу [2, 11] для управління земляними роботами. Використання VR для дистанційного керування екскаватором значно покращує контроль і точність роботи машини. Крізь VR-окуляри оператор отримує панорамний огляд робочої зони майже так, ніби він перебуває безпосередньо на екскаваторі. Це дає змогу бачити деталі, які звичайні камери могли б не охопити, а також краще оцінювати відстані, кут нахилу стріли й положення ковша.

Також VR-інтерфейс допомагає створити інтуїтивну систему керування: рухи рук і положення контролера можна точно передавати стрілі та ковшу екскаватора. Це робить дистанційне управління більш природним і точним порівняно з традиційними джойстиками чи кнопками, зменшує ризик помилок і підвищує продуктивність.

Чимало дослідників розробляють системи управління для автономних екскаваторів. Одною з таких систем [3] є система управління з прогнозуванням на основі бази даних і моделей. Така система містить три компо-

ненти: *DD-Modeling*, *DD-MPC* та *Trajectory Planner*. Система протестована на радіокерованому екскаваторі в масштабі 1:12. Експерименти продемонстрували: здатність слідувати заданій траєкторії, успішне виявлення та обходження підземних перешкод, досягнення кінцевої точки траєкторії навіть у разі зміни умов. Як результат, система дає змогу автономному екскаватору адаптуватися до властивостей ґрунту й перешкод, виконуючи задану операцію без зупинки роботи.

Фахівці кафедри будівельних і дорожніх машин упродовж багатьох років моделюють технологічні машини в *Autodesk Inventor* [12–16] і проводять наукові дослідження на комп'ютерних моделях. Водночас організовувалися експерименти й на фізичних моделях, а потім їх результати порівнювалися. Іноді графічні моделі експортувалися в ANSYS, де розраховувалися напруження в металоконструкціях різних машин [13–17]. Значну увагу приділено моделюванню мобільних підйомників із робочими платформами, їх транспортних і робочих операцій.

Упровадження систем автоматичного керування екскаваторами потребує подання рівнянь кінематики й динаміки робочого обладнання у вигляді, зручному для використання в бортових обчислювальних комплексах машин. Ці питання розглянуто в монографії [13], де надано способи розв'язання прямої та оберненої задач кінематики з позицій робастного підходу до автоматизованого керування маніпулятором екскаваторного типу. Продемонстровано можливості взаємодії таких програмних засобів, як MATLAB і *Autodesk Inventor*. На підставі аналізу джерел останніх років зроблено висновки щодо того, де і як можуть використовуватись відомості про центр мас (ЦМ) конструкції [18–21].

Однак у наведених джерелах не визначено залежності між ходом гідроциліндрів і кутами повороту елементів робочого обладнання. Також немає інструменту, який дав би змогу відтворити траєкторію зміни ЦМ.

Мета й постановка завдання

У цій статті подано результати віртуальних досліджень кінематичних і силових параметрів двох типів екскаваторів як традиційного конструктивного виконання, так і машини з шарнірно-зчленованою стрілою. Необхідно було визначити траєкторії руху шарнірних з'єднань робочого обладнання, швидкості та прискорення, а також побудувати траєкторію центра мас залежно від переміщення елементів робочого обладнання.

У дослідженні значну увагу надано кінематичним параметрам екскаваторів із моноблочною та шарнірно-зчленованою стрілою. Проаналізовано такі параметри, як кут нахилу ланок робочого обладнання до горизонту, трасування шарнірів, що з'єднують елементи стріли рукояті й ковша, а також швидкості та прискорення цих шарнірів.

Щодо силових параметрів можна визначити та розв'язати такі питання: оцінювання вірогідності перекидання в процесі роботи – аналіз координат проекції ЦМ на опорну площину; оцінювання розподілу навантажень для правильного розташування опор, вальниць тощо з метою уникнення перевантаження; оцінювання та коригування конструкції для переміщення ЦМ у безпечне положення – додавання вантажів, противаг тощо; використання в динамічному моделюванні під час моделювання робочих рухів на цифрових двійниках; важливо зауважити, що 3D-модель дає точно обчислений ЦМ з огляду на геометрію та розподіл матеріалів.

У статті також окреслено напрями подальших наукових досліджень у царині екскаваторобудування, які можуть бути виконані за допомогою широкого застосування комп'ютерно-інтегрованих технологій і програмного продукту *Autodesk Inventor*. До цих віртуальних досліджень будуть долучені студенти механічного факультету.

Виклад основного матеріалу

На першому етапі відбувалося геометричне моделювання екскаватора середнього класу з гусеничним ходовим обладнанням. Для цього використано кресленики загального вигляду машини й робочого обладнання. Показники маси елементів робочого обладнання (стріла, рукоять, ківш) визначалися безпосередньо в середовищі *Autodesk Inventor*. Було поставлено завдання модернізації робочого обладнання, а саме перетворення стріли в шарнірно-зчленовану конструкцію та оснащення цих екскаваторів таким устаткуванням, як *Quick-Coupler* і *Tiltrotator*. На рис. 1 зображено 3D-моделі екскаваторів з моноблочною стрілою та планувальним ковшем (а), а також з шарнірно-зчленованою стрілою та стандартним ковшем (б).

Графічне моделювання поворотної платформи й рушія виконувалося за спрощеною схемою, тобто маси відповідних складників цієї частини екскаваторів призначалися з огляду на оброблення статистичних показників машин подібного типорозміру. Відтворення роботи гусеничного рушія та віртуаль-

ні дослідження транспортних режимів не планувалися.

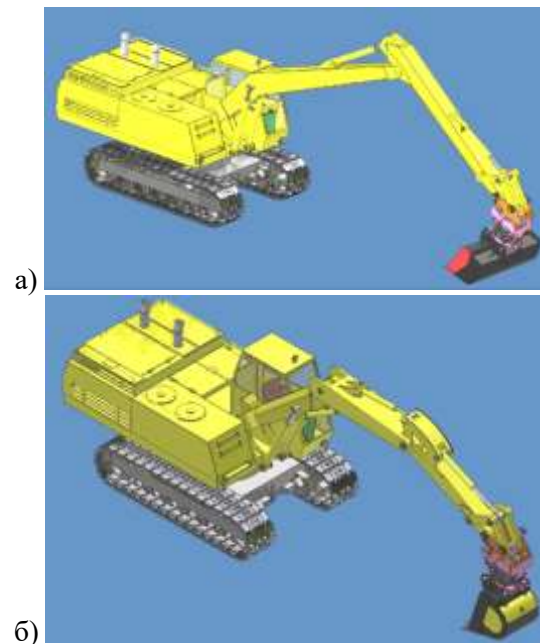


Рис. 1. 3D-моделі екскаваторів з моноблочною та шарнірно-зчленованою стрілами

Крім того, перші спроби виконання кінематичних віртуальних досліджень в *Dynamic Simulation* на 3D-моделях продемонстрували, що виникають певні труднощі й час симуляції рухів елементів робочого обладнання занадто великий. У зв'язку з цим було розроблено спрощені 3D-моделі (рис. 2), на яких можна було більш ефективно досліджувати тільки кінематичні параметри робочого обладнання.

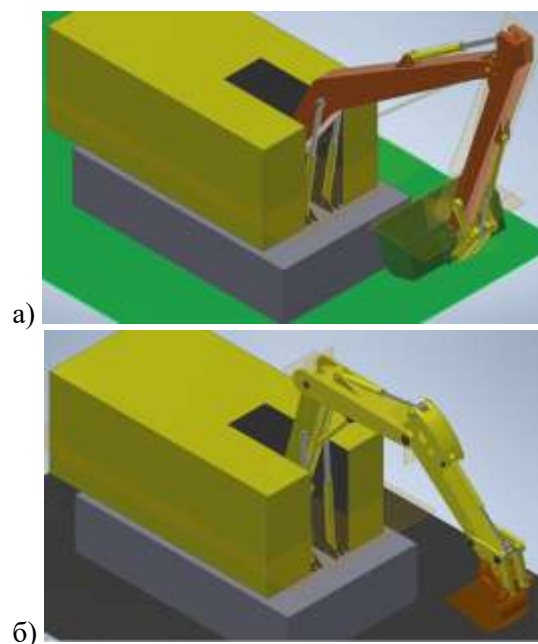


Рис. 2. Спрощені 3D-моделі для кінематичних і силових досліджень

Сучасні екскаватори можуть мати різноманітне робоче обладнання щодо геометричних параметрів стріл і рукоятей. Від довжини стріли й рукояті залежить розмір робочої зони, яка може розташовуватися як нижче від опорної поверхні, так і значно вище. Тому насамперед було поставлено завдання визначення траєкторії рухів усіх шарнірних елементів робочого обладнання. Траєкторії рухів шарнірів залежать не тільки від геометричних параметрів стріл і рукоятей, а ще й від параметрів гідроциліндрів і способів їх закріплення в металоконструкціях робочого обладнання.

Відповідно до тієї конструктивної схеми робочого обладнання, що моделюється, кут нахилу стріли відхиляється на 20 градусів щодо горизонтальної лінії під час опускання стріли й на 40 градусів щодо цієї самої лінії внаслідок підйому. Було отримано графік залежності та рівняння для кута повороту стріли від ходу штока гідроциліндра її привода (рис. 3).

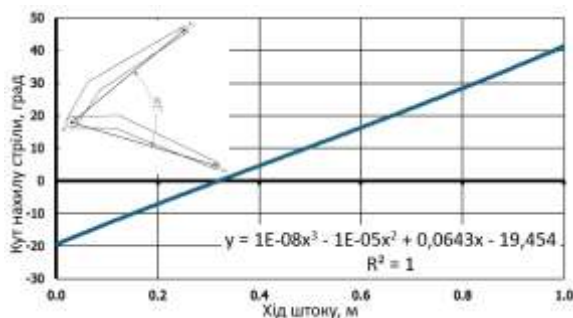


Рис. 3. Залежність кута нахилу стріли від ходу штока гідроциліндра

На рис. 4 зображено графіки зміни кута нахилу рукояті від ходу штока, які визначалися за умови як нижнього, так і верхнього положення стріли. Кут руху рукояті щодо стріли становить 109°.

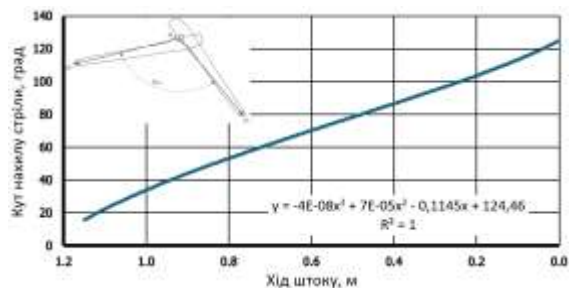


Рис. 4. Зміна кута нахилу рукояті з моноблочною стрілою

Процес отримання графіків залежностей нахилу ковша аналогічний попереднім побу-

довам. Таких графіків буде чотири залежно від взаємного положення стріли й рукояті щодо один одного в просторі. Площиною, від якої розраховуватиметься кут нахилу ковша, прийнято площину, що проходить крізь шарнір кріплення ковша до рукояті та крізь різальну крайку ножа. На рис. 5 продемонстровано графіки залежностей кута нахилу ковша від ходу штока, який становить 900 мм.

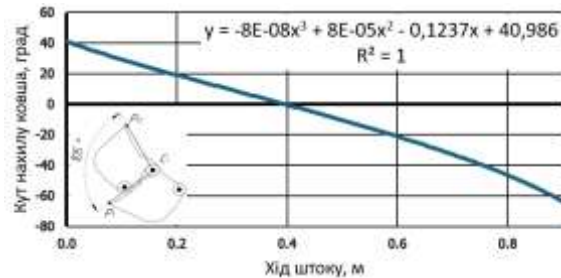


Рис. 5. Зміна кута нахилу ковша

Зміни кутів нахилу робочого обладнання надалі досліджувались на моделі екскаватора, що має шарнірно-зчленовану стрілу з іншими геометричними параметрами. На попередній моделі кількість досліджуваних рухомих елементів становила три: стріла, рукоять і ківш; у цій моделі кількість таких елементів дорівнює чотирьом, оскільки стріла має дві частини, і всі кінематичні параметри визначалися для обох секцій стріли.

Розглянемо питання розподілу мас складових частин гусеничних екскаваторів середнього класу *Volvo*, *Kobelco* і *Komatsu*. Робоче обладнання (стріла, рукоять, ківш) – це орієнтовно 10–18 % від загальної маси машини, зокрема стріла 5–9 %, рукоять 3–6 %, ківш 2–5 %. Необхідно зауважити, що ці співвідношення можуть суттєво змінюватися залежно від конструктивного виконання робочого обладнання. Так, застосування *Quick-Coupler* і *Tiltrotator* призводить до збільшення маси робочого обладнання на 5–7 %. Ще сильніше впливають на збільшення маси стріли й рукояті їх геометричні розміри. Для наших віртуальних моделей маса шарнірно-зчленованої стріли більша, ніж моноблочної. Найбільшу вагу має гусеничне ходове обладнання. У його проектуванні не варто намагатися зменшувати маси складових частин, а навіть навпаки, оскільки цей баласт позитивно впливає на стійкість екскаватора як в робочому, так і в транспортному режимах. Інакше розв'язується питання щодо проектування робочого обладнання. Маса робочого обладнання впливає на розрахунок

противаги, що встановлюється в задній частині поворотної платформи. Маса противаги практично дорівнює масі робочого обладнання. У табл. 1 і на рис. 6 подано можливі діапазони зміни конструктивних частин і прийняті в моделюванні значення.

Таблиця 1

Складові частини	Питома вага (%)		Розподіл мас (т)
	діапазон	прийнято	
Обертова платформа	20–40	40	12,8
Гусеничний візок	25–40	30	9,6
Противага	10–20	15	4,8
Стріла	5–9	7	2,24
Рукоять	3–6	5	1,6
Ківш	2–5	3	0,96

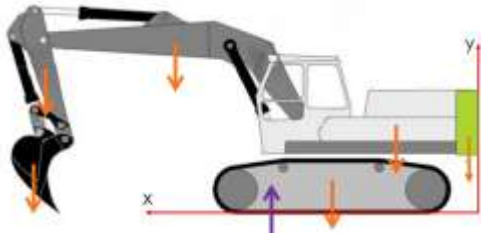


Рис. 6. Розподіл мас по конструктивних елементах екскаватора

Як відомо, основні формули для визначення координат ЦМ конструкції як дискретного набору елементів мають такий вигляд:

$$x_{ЦМ} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k m_k}{\sum_{k=1}^n m_k}; \quad y_{ЦМ} = \frac{\sum_{k=1}^n y_k m_k}{\sum_{k=1}^n m_k}; \quad (1)$$

$$z_{ЦМ} = \frac{\sum_{k=1}^n z_k m_k}{\sum_{k=1}^n m_k};$$

де x_k , y_k , z_k – координати центра мас k -го елемента конструкції; m_k – його маса.

Отже, центр мас – фундаментальна характеристика конструкції, що впливає на її стійкість, динаміку, безпеку експлуатації та можливість управління. ЦМ вираховують аналітично, чисельно (CAD/FEA) або експериментально, потім використовують для проектування опор, контролю перекидання, визначення допустимих завантажень, балансування й динамічного аналізу.

У нашому дослідженні розрахунки щодо ЦМ «захиті» в програмі, і завдання полягає в тому, щоб візуалізувати рух точки центра

мас усієї машини й зберегти всі проміжні координати для подальших розрахунків.

Зауважимо, що в середовищі динамічного моделювання *Autodesk Inventor* є інструмент *Trace*, який дає змогу будувати траєкторію руху будь-якої фізичної точки моделі. Для точки ЦМ цей інструмент не спрацьовує [21], тому було розроблено спеціальний застосунок мовою VBA, який дав змогу візуалізувати зміни положення центра мас під час роботи.

Після запуску програми користувач може задати дискретність цієї кривої.

На рис. 7 крива лінія з позначками проміжних точок демонструє траєкторію ЦМ у процесі підйому й повороту робочого обладнання: зображено початкове (а) й кінцеве положення (б) машини, а також рух у просторі (в); додатково показано траєкторії руху ковша й елементів стріли.

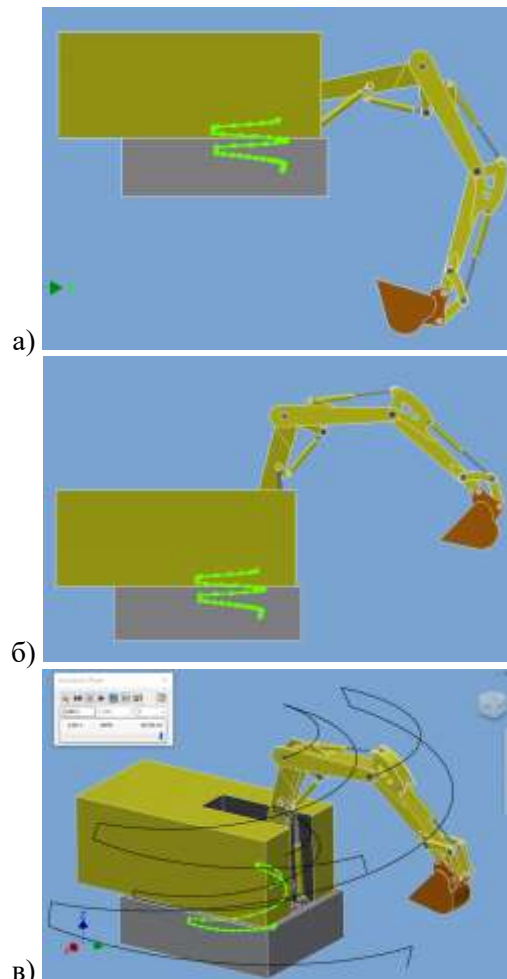


Рис. 7. Траєкторії опорних точок і ЦМ під час роботи екскаватора

Висновки

Моделювання універсальних гідравлічних екскаваторів усесвітньо відомих виробників у програмному комплексі *Autodesk Inventor*

дає змогу опанувати досвід проектування машинобудівної продукції та накопичувати базу даних графічної документації, що дуже корисно для студентів під час набуття професійних знань за спеціалізацією G11.03. «Технологічні машини і обладнання».

Кінематичні дослідження дали змогу встановити закономірності зміни таких параметрів робочого обладнання, як кут повороту стріли, рукояті та ковша, а також швидкості й прискорення в шарнірах, що з'єднують ці елементи. Крім графічних залежностей, отримані рівняння регресії для відповідних розрахунків гідропривода цих машин. Кінематичні параметри робочого обладнання залежать як від швидкості руху елементів гідромоторів поступальної дії, так і від їх положення й закріплення між рухомими частинами екскаватора.

Параметри маси також суттєво впливають на робочі процеси екскаваторів. У межах цього дослідження запропоновано програмний модуль для визначення положення центра мас залежно від переміщення рухомих частин робочого обладнання. У подальших випробуваннях передбачено встановити закономірності, що впливають на стійкість екскаваторів як у транспортному, так і в робочому режимах.

Література

1. Кириченко, І. Г., Ковалевський, С. Г., Хачатурян, С. Л. (2024). Статистичне моделювання кваліметричних показників універсальних гідравлічних екскаваторів. *Вісник ХНАДУ*. 106. 43–50. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.106.0.43>
2. Exploring Human-Machine Interfaces for Teleoperation of Excavator. URL: https://www-researchgate.net/publication/359065967_Exploring_Human-Machine_Interfaces_for_Teleoperation_of_Excavator (дата звернення: 26.02.26).
3. Database-driven model predictive control system for online adaptation of an autonomous excavator to environmental conditions. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066124000030> (дата звернення: 26.02.26).
4. Research on Excavator Trajectory Control Based on Hybrid Interpolation. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/8/6761> (дата звернення: 26.02.26).
5. Digging Performance and Stress Characteristic of the Excavator Bucket. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/20/11507> (дата звернення: 26.02.26).
6. Comparative analysis study of resistance characteristics of backhoe hydraulic excavators. URL: https://www.mechanics-industry.org/articles/meca/full_html/2024/01/mi230039/mi230039.html (дата звернення: 26.02.26).
7. Influence of the excavator hydraulic system efficiency on the productivity. URL: https://rae.agriculturejournals.cz/artkey/rae-202301-0003_influence-of-the-excavator-hydraulic-system-efficiency-on-the-productivity.php (дата звернення: 26.02.26).
8. Методика вибору схем руху екскаваторів при влаштуванні котлованів. URL: <https://ena.lpnu.ua/items/0f793707-f384-4783-ace2-3476f8b5079a> (дата звернення: 26.02.26).
9. Порівняльний аналіз локальної та системної оптимізації режиму роботи кар'єрних екскаваторів. URL: <https://ela.kpi.ua/items/e132e361-6f78-4f16-b621-10188e5dc750> (дата звернення: 26.02.26).
10. Фролов, О. О., Литвинчук, І. Д., Остапчук, А. О. (2023). Оптимізація роботи екскаваторно-автомобільного комплексу при відробітці флювіогляціальних відкладів розкриття на кар'єрі Соснівського родовища гранітів. *Технічна інженерія*. 1(91), 366–376. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-366-376](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-366-376)
11. HEAP – The autonomous walking excavator. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658052100234X> (дата звернення: 26.02.26).
12. Кириченко, І. Г., Черніков, О. В. (2023). Можливості та обмеження комп'ютерного моделювання технологічних машин. *Вісник ХНАДУ*. 101(1). 53–60. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.0.53>
13. Гурко, О. Г., Кириченко, І. Г., Аврунін, Г. А., Ярижко, О. В. (2020). Сучасні методи моделювання та керування екскаваторами: монографія. Харків: ХНАДУ. 203 с.
14. Кириченко, І. Г., Черніков, О. В., Корецький Я. Г. (2023). Моделювання ходового обладнання мобільних підйомників. *Вісник ХНАДУ*. 101(1). 68–74. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.0.68>
15. Роговий А. С. (2019). Використання методів числового вирішення задач інженерного аналізу: навч. посібник. Харків: ХНАДУ. 112 с.
16. Kyrychenko, I., Chernikov, O., Koretskyi, Ya., Rukavysnikov, Yu., Kovalevskyi, S., Khachaturian, S. (2025). Virtual exploration of mobile lifts with working platforms. *AIP Conference Proceedings*. 3238(1), 070004. <https://doi.org/10.1063/5.0248968>
17. Gurko, A., Kyrychenko, I., Yaryzhko, A. (2019). Trajectories panning and simulation of a backhoe manipulator movement. *CEUR Workshop Proceedings*. 2353, 771–785. <https://ceur-ws.org/Vol-2353/paper61.pdf>
18. Yang, S., Wang, Y., Lu, S. (2020). Influence of Center of Mass Movement on Steering Characteristics of Front-Wheel Steering Vehicles and Four-Wheel Steering Vehicles. In: Liang, Q., Liu, X., Na, Z., Wang, W., Mu, J., Zhang, B. (eds) *Communications, Signal Processing, and Systems*. CSPA 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 517. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6508-9_64

19. Kun Xu, Hao Chen, Andreas Mueller, Xilun Ding (2022). Kinematics of the center of mass for robotic mechanisms based on lie group theory. *Mechanism and Machine Theory*. V. 175, 104933. <https://doi.org/10.1016/j.mechmach-theory.2022.104933>
20. Москаленко, А. І., Черніков, О. В. (2012). Вплив положення центру ваги на роботу фронтального навантажувача. *Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка»*. № 746. 104–107.
21. Tracing the center of gravity of assembly in a dynamic simulation environment. (2018). *Inventor Programming Forum*. URL: <https://forums.autodesk.com/t5/inventor-programming-forum/tracing-the-center-of-gravity-of-assembly-in-a-dynamic/m-p/7825736> (дата звернення: 26.02.26).

References

1. Kyrychenko, I. G., Kovalevskyi, S. G., Khachaturian, S. L. (2024). Statystychny modelyuvannya kvalimetrychnykh pokaznykiv universal'nykh hidravlichnykh ekskavatoriv [Statistical modeling of qualimetric indicators of universal hydraulic excavators]. *Visnyk Harkivs'kogo Nacional'nogo Avtomobil'no-dorozhn'ogo Universytetu – Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 106. 43–50. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.106.0.43> [in Ukrainian].
2. Exploring Human-Machine Interfaces for Teleoperation of Excavator. URL: https://www.researchgate.net/publication/359065967_Exploring_Human-Machine_Interfaces_for_Teleoperation_of_Excavator (accessed: 26.02.26).
3. Database-driven model predictive control system for online adaptation of an autonomous excavator to environmental conditions. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066124000030> (accessed: 26.02.26).
4. Research on Excavator Trajectory Control Based on Hybrid Interpolation. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/8/6761> (accessed: 26.02.26).
5. Digging Performance and Stress Characteristic of the Excavator Bucket. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/20/11507> (accessed: 26.02.26).
6. Comparative analysis study of resistance characteristics of backhoe hydraulic excavators. URL: https://www.mechanics-industry.org/articles/meca/full_html/2024/01/mi230039/mi230039.html (accessed: 26.02.26).
7. Influence of the excavator hydraulic system efficiency on the productivity. URL: https://rae.agriculturejournals.cz/artkey/rae-2023-01-0003_influence-of-the-excavator-hydraulic-system-efficiency-on-the-productivity.php (accessed: 26.02.26).
8. Metodyka vyboru sxem ruxu ekskavatoriv pry vlashtuvanni kotlovaniv [Methodology for selecting excavator movement patterns when constructing excavation pits]. URL: <https://ena.lpnu.ua/items/0f793707-f384-4783-ace2-3476f8b5079a> [in Ukrainian].
9. Porivnyal'nyj analiz lokal'noyi ta systemnoyi optymizaciyi rezhymu roboty kar'yernykh ekskavatoriv [Comparative analysis of local and system optimization of quarry excavator operation mode]. URL: <https://ela.kpi.ua/items/e132e361-6f78-4f16-b621-10188c5dc750> [in Ukrainian].
10. Frolov, O. O., Lytvynchuk, I. D., Ostapchuk, A. O. (2023). Optyimizaciya roboty ekskavatorno-avtomobil'noho kompleksu pry vidrobci flyuviohlyacial'nykh vidkladiv rozkryvu na kar'yeri Sosnivs'koho rodovyshha hranitiv [Optimization of the excavator-automobile complex during the development of fluvioglacial overburden deposits in the quarry of the Sosniv granite deposit]. *Texnichna inzheneriya – Technical engineering*. 1(91), 366–376. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-366-376](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-366-376) [in Ukrainian].
11. HEAP – The autonomous walking excavator. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658052100234X> (accessed: 26.02.26).
12. Kyrychenko, I. G., Chernikov, O. V. (2023). Mozhlyvosti ta obmezheniya komp'yuternoho modelyuvannya tehnolohichnykh mashyn [Opportunities and limitations of computer simulation of technological machines]. *Visnyk Harkivs'kogo Nacional'nogo Avtomobil'no-dorozhn'ogo Universytetu – Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 101(1). 53–60. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.0.53> [in Ukrainian].
13. Hurko, O. G., Kyrychenko, I. G., Avrunin, G. A., Yaryzhko, O. V. (2020). Suchasni metody modelyuvannya ta keruvannya ekskavatoramy (monohrafiya) [Modern methods of modeling and controlling excavators (monograph)]. Kharkiv, KhNAHU. 203 c. [in Ukrainian].
14. Kyrychenko, I. G., Chernikov, O. V., Koretskyi, Y. G. (2023). Modelyuvannya xodovoho obladnannya mobil'nykh pidjomnykiv [Modeling of Running Equipment of Mobile Lifts]. *Visnyk Harkivs'kogo Nacional'nogo Avtomobil'no-dorozhn'ogo Universytetu – Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 101(1). 68–74. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.0.68> [in Ukrainian].
15. Rogovyi, A. S. (2019). Vykorystannya metodiv chyslovoho vyrishennya zadach inzhenernoho analizu (posibnyk) [Using numerical methods for solving engineering analysis problems (manual)]. Kharkiv, KhNAHU. 112 c. [in Ukrainian].
16. Kyrychenko, I., Chernikov, O., Koretskyi, Ya., Rukavyshnikov, Yu., Kovalevskyi, S., Khachaturian, S. (2025). Virtual exploration of mobile lifts with working platforms. *AIP Conference Proceedings*. 3238(1), 070004. <https://doi.org/10.1063/5.0248968>

17. Gurko A., Kyrychenko I., Yaryzhko A. (2019). Trajectories panning and simulation of a backhoe manipulator movement. *CEUR Workshop Proceedings*. 2353, 771–785. <https://ceur-ws.org/Vol-2353/paper61.pdf>
18. Yang, S., Wang, Y., Lu, S. (2020). Influence of Center of Mass Movement on Steering Characteristics of Front-Wheel Steering Vehicles and Four-Wheel Steering Vehicles. In: Liang, Q., Liu, X., Na, Z., Wang, W., Mu, J., Zhang, B. (eds) *Communications, Signal Processing, and Systems*. CSPA 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 517. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6508-9_64
19. Kun Xu, Hao Chen, Andreas Mueller, Xilun Ding (2022) Kinematics of the center of mass for robotic mechanisms based on lie group theory. *Mechanism and Machine Theory*. V. 175, 104933. <https://doi.org/10.1016/j.mechmach-theory.2022.104933>
20. Moskalenko, A. I., Chernikov, O. V. (2012) Vplyv polozhennya centru vahy na robotu frontal'noho navantazhuvacha [The influence of the position of the center of gravity on the operation of the front loader]. *Visn. Nac. un-tu "L'viv. politexnika" – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*. № 746. 104–107. [in Ukrainian].
21. Tracing the center of gravity of assembly in a dynamic simulation environment. (2018). *Inventor Programming Forum*. URL: <https://forums.autodesk.com/t5/inventor-programming-forum/tracing-the-center-of-gravity-of-assembly-in-a-dynamic/m-p/7825736> (accessed: 26.02.26).

Кириченко Ігор Георгійович, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних і дорожніх машин, igk160450@gmail.com, тел. +38 067 705-54-74;
Черніков Олександр Вікторович, д-р техн. наук, професор кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки, cherni@khadi.kharkov.ua, тел. +38 067 578-23-12;
Мілих Андрій Олександрович, магістр кафедри будівельних і дорожніх машин, andriimilykh@gmail.com, тел. +358 46 958-43-92;
Бакаєв Дмитро Іванович, магістр кафедри будівельних і дорожніх машин, тел. +38 066 05-09-812, dbakaev92@gmail.com.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Virtual Researches of Excavators in Autodesk Inventor

Abstract. Problem. This article discusses the objectives of virtual research aimed at determining the kinematic and force parameters of a modular mid-size hydraulic excavator. Particular attention is paid to the issue of modeling changes in the machine's center of mass. **Goal.** The paper outlines directions for future research in the field of excavator engineering, which can be carried out through the extensive use of computer-integrated technologies and, first and foremost, soft-

ware such as Autodesk Inventor with its parametric modeling capabilities. These virtual experiments were conducted with participation of students of the Faculty of Mechanical Engineering KhNAHU. **Methodology.** To solve the defined tasks, methods of geometric and computer modeling of objects, processes, and phenomena were applied, in particular, the ability to create parametric digital twins of objects using Autodesk Inventor. **Results.** The results of virtual studies of the kinematic and force parameters of two types of excavators are presented: both the conventional design and the machine with an articulated boom. The motion trajectories of the articulated joints of the working equipment, velocities, and accelerations, as well as the trajectory of the center of mass, have been determined as a function of the displacement of the working equipment elements. **Originality.** Modeling of universal hydraulic excavators designed by world-renowned manufacturers in the Autodesk Inventor software complex allows students to gain experience in the design of mechanical engineering products and build a database of technical drawings, which is extremely useful for students majoring in G11.03 "Process Machinery and Equipment," to acquire professional knowledge. **Practical value.** Kinematic studies have revealed patterns in the variation of such working equipment parameters as the swing angle of the boom, the arm, and the bucket, as well as the velocity and acceleration at the joints connecting these elements. In addition to graphical dependencies, regression equations were obtained to perform the corresponding calculations for the hydraulic drive of these machines.

Key words: modular excavator, Autodesk Inventor, 3D modeling, hinged joint, angular velocity, mass distribution, center of mass, force load.

Kyrychenko Igor, Professor, Doct. of Science, Construction and Road Machines Department, ORCID: 0000-0002-2128-3500, igk160450@gmail.com;

Chernikov Oleksandr, Professor, Doct. of Science, Bridges, Structures and Construction Mechanics Department, ORCID: 0000-0002-6636-4566, cherni@khadi.kharkov.ua;

Milykh Andrii, Master of Construction and Road Machines Department, ORCID: 0009-0004-7402-4643, andriimilykh@gmail.com;

Bakaiev Dmytro, Master of Construction and Road Machines Department, ORCID: 0009-0005-2948-6037, dbakaev92@gmail.com.

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

Стаття надійшла до редакції / Received: 17.02.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 25.02.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.