

УДК 621.879

DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-151-161

УДК 621.879

**ОПТИМІЗАЦІЯ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ ЗЕМЛЕРИЙНОЇ
МАШИНИ**

**OPTIMIZATION OF THE LIFTING MECHANISM FOR THE WORKING EQUIPMENT OF
AN EARTHMOVING MACHINE**



Високович Євген Вадимович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, e-mail: y.vysokovych@ntu.edu.ua, тел.: +380677537367,

<https://orcid.org/0000-0002-6522-4537>



Коваль Андрій Борисович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: kandr6104@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0003-1295-8200>, SCOPUS id 57220055768



Пасенко Юрій Васильович, аспірант кафедри інженерії машин транспортного будівництва, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: 280bar@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-2986-8781>



Рагулін Віталій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин, e-mail: ragulinrvm@ukr.net, тел.: +380972957392,

<https://orcid.org/0000-0003-2083-4937>, SCOPUS id 57224351936



Тополь Олександр Сергійович, студент, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: topolsasha@gmail.com, тел.: +380731387873

<https://orcid.org/0009-0002-9702-430X>

Анотація: В статті розглянуто питання оптимізації конструктивних параметрів механізму підйому рами робочого обладнання універсальної роторної землерийної траншейно-котлової машини безперервної дії для зменшення зусиль в його гідроциліндрах за умови збереженні заданої кінематики механізму.

Конструктивно механізми підйому-опускання робочого обладнання виконані у варіанті розташування гідроциліндра над стрілою (рамою) і для підйому робочого обладнання рідина подається в штокову порожнину гідроциліндра.

Сформульована задача оптимізації полягає у потребі спроектувати механізм, який міг би займати задані початкове та кінцеве положення та розвивати водночас мінімальне пікове зусилля на штоку гідроциліндра. Як відомо, така задача на пошук мінімального значення із ряду максимальних, називається задачею на «мінімакс». Як змінні проектні параметри обрано лінійні відстані від вісі обертання ґрунторозробного робочого органа до місць кріплення гідроциліндра та конструктивний кут; визначено цільову функцію. Викладено розрахункові залежності для визначення проектних параметрів та зусиль на штоку гідроциліндра. Додатково введено обмеження діапазону значень параметру конструктивного кута.

Для проведення розрахунків використовувався табличний процесор MS Excel з надбудовою «Пошук рішення» (Solver).

В результаті проведеної оптимізації для фізичної моделі робочого обладнання універсальної роторної землерийної траншейно-котлової машини безперервної дії знайдено параметри розташування місць кріплення гідроциліндра підйому робочого обладнання, що забезпечують зменшення навантаження на гідроциліндрах у 1,39 рази та збереження заданої кінематики механізму.

Запропоновану методику можна рекомендувати до використання у розрахунках механізмів підйому інших механізмів, де циліндр розташований над стрілою і для підйому робочого обладнання коли рідина подається в штокову порожнину гідроциліндра.

Ключові слова: гідроциліндр, землерийна машина, зусилля, робоче обладнання, силовий розрахунок, програмне забезпечення, шарнірно-важільний механізм

Вступ. Переважна більшість сучасних будівельних та землерийних для приводу робочого обладнання машин використовують гідроциліндри, які є одним із самих дорогих елементів робочого обладнання. Причому їх вартість і вага в значній мірі залежать від зусиль на штоку. Виходячи з цього, під час проектування механізму важливо мати можливість вибрати таке положення шарнірів гідроциліндра, за якого зусилля на штоку буде мінімальним.

Задача найбільш актуальна для механізмів підйому-опускання стріл або всього робочого обладнання з робочого в транспортне положення оскільки циліндри в цих механізмах сприймають вагу всього робочого обладнання і найбільше навантажені. Прикладом такого механізму є механізм підйому робочого обладнання універсальної роторної землерийної траншейно-котлової машини безперервної дії. Експериментальні дослідження фізичної моделі робочого обладнання такої машини (рисунки 1) проведені на ґрунтовому каналі кафедри інженерії машин транспортного будівництва Національного транспортного університету в режимах розробки робочим обладнанням траншей різної ширини.

Дослідження роботи на сталих режимах роботи машини не висували особливих вимог до механізму підйому-опускання робочого обладнання, однак подальшим напрямком досліджень є процес спорудження в'їзних і виїзних апарелей котлованів, під час якого підйом і опускання робочого обладнання є не допоміжною операцією, а елементом основного робочого процесу з високими вимогами до точності позиціонування робочого обладнання [1, 2]. Позаяк машина створюється як машина подвійного використання: для спорудження протяжних виїмок у цивільному будівництві і для забезпечення фортифікаційного облаштування позицій військ і бойової техніки, то проблеми забезпечення надійної роботи всіх вузлів і механізмів робочого обладнання машини є надзвичайно актуальними.

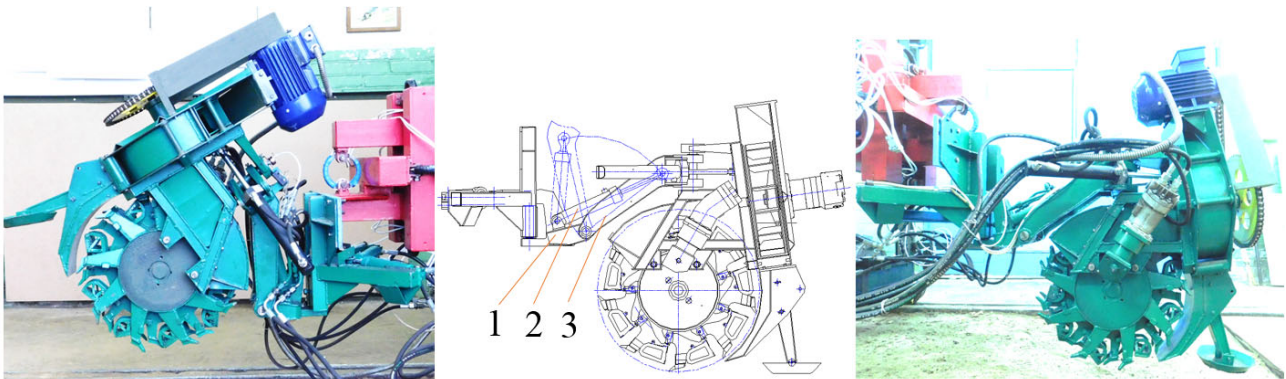


Рисунок 1 – Фізична модель робочого обладнання:
 1 – передня рама; 2 – проміжна рама; гідроциліндр підйому.
Figure 1 – Physical model of working equipment:
 1 – front frame; 2 – intermediate frame; hydraulic lift cylinder.

Аналіз результатів досліджень і публікацій. В основу методик розрахунків положення кріплення робочого обладнання можуть бути покладені плоскі [3] та тривимірні [4–6] розрахункові схеми, що пропонують прикладати зовнішні навантаження в площині поздовжніх осей гідроциліндрів, що управляють.

Конструктивно механізми підйому-опускання робочого обладнання можуть бути виконані в двох варіантах:

- 1) циліндр розташований під стрілою (рамою) і підйом робочого обладнання здійснюється подачею тиску в поршневу порожнину гідроциліндра;
- 2) циліндр розташований над стрілою (рамою) і для підйому робочого обладнання рідина подається в штокову порожнину гідроциліндра.

Розв'язання задачі для першого варіанта зустрічається в літературі, наприклад, у [7–9]. У той же час, другий варіант розташування циліндра ще більш гостро ставить питання пошуку раціонального розташування точок кріплення циліндра. Це пояснюється тим, що площа штокової порожнини менша за площу поршневої і для реалізації потрібної сили в другому варіанті потрібен циліндр більшого діаметру і ваги.

Сучасні методики використовують різні підходи до проектування параметрів важливих механізмів. Зазвичай пропонують підбирати параметри встановлення гідроциліндрів, по аналогії з існуючими механізмами [10, 11], близькими за типорозміром, з подальшою перевіркою, яка зводиться до графічних побудов вручну, що займає багато часу.

З розвитком CAD-систем і технологій 3D-моделювання останнім часом з'явилося багато робіт, присвячених симуляції роботи гідравлічних універсальних екскаваторів [12–15]. Роботи [12–14] направлені на створення систем автоматичного або дистанційного управління роботою екскаватора. Вивченню компонентів екскаватора з метою виявлення проблем, які виникають під час виконання операцій підйому та копання, і надання проектного рішення за допомогою систем CAD-CAE присвячено роботу [15]. Використання методик, запропонованих в цих роботах, ускладнюється необхідністю створення 3D-моделей механізмів для кожного варіанту, що перевіряється.

Також до уваги взяті підходи до вирішення питання синтезу параметрів базової геометрії робочого обладнання одноківшевих екскаваторів [16] та автоматизації розрахунку робочого обладнання машин з використанням теорії граф [17].

Мета дослідження. Оптимізувати конструктивні параметри механізму підйому рами (стріли) робочого обладнання універсальної роторної землерийної траншейно-котлованної машини

безперервної дії для зменшення зусиль в його гідроциліндрах за умови збереженні заданої кінематики механізму.

Основна частина. Розрахункова схема механізму підйому-опускання робочого обладнання для загального випадку показана на рис. 2. Як видно стріла (проміжна рама підйому робочого обладнання, див. рис. 1) тут не прямолінійна, а зігнута на певний конструктивний кут, що дуже часто зустрічається на екскаваторах, обладнаних зворотною лопатою. Усі подальші викладки будуть справедливі і для прямолінійних стріл, у яких конструктивний кут буде прийматись нульовим.

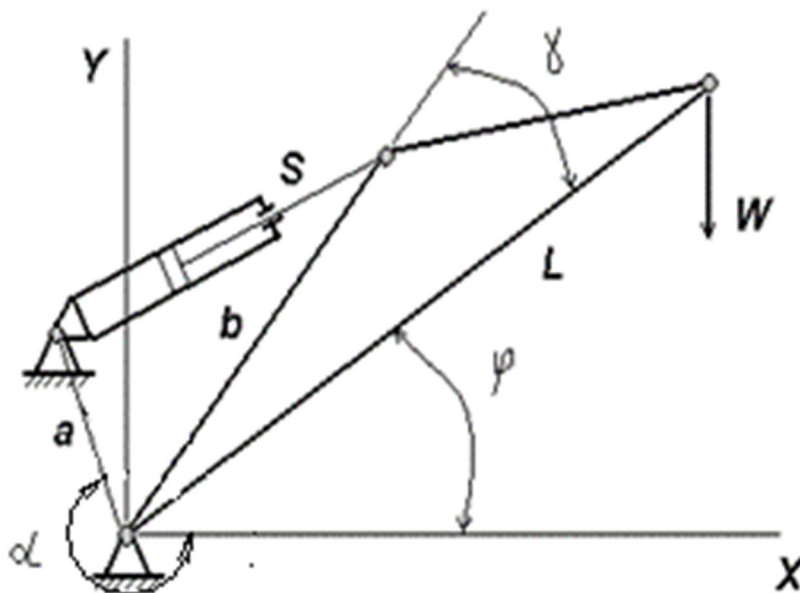


Рисунок 2 – Схема до розрахунку оптимальних параметрів підйомного механізму.
Figure 2 – Scheme for calculating the optimal parameters of the lifting mechanism.

Сформулюємо задачу оптимізації. Треба спроектувати механізм, який міг би займати початкове (φ_{\min}) та кінцеве (φ_{\max}) положення та розвивати водночас мінімальне пікове зусилля T на штоку гідроциліндра. Як відомо, така задача на пошук мінімального значення із ряду максимальних, називається задачею на «мінімакс».

Таким чином в нашому випадку задача оптимізації включає:

- змінні проектні параметри a, b, β ;
- цільову функцію $T = T_{\min}(T_{\max}(\varphi), a, b, \beta)$.

Зусилля на штоку T для верхнього варіанту розташування гідроциліндра можна визначити із умови рівноваги:

$$T = \frac{LW \cos \phi \sqrt{k_2 - k_1 \cos(2\pi - (\beta + \phi))}}{ab \sin(2\pi - (\beta + \phi))}, \quad (1)$$

де $k_1 = 2ab$;

$$k_2 = a^2 + b^2;$$

L – довжина стріли;

W – вага вантажу;

β – конструктивний кут, що дорівнює сумі кутів α та γ ;

a, b – розміри, що показані на рис. 2.

Зв'язок між лінійними геометричними параметрами можна знайти за теоремою косинусів:

$$k_1 \cos(2\pi - (\beta + \phi)) - k_2 = S^2, \quad (2)$$

де S – довжина гідроциліндру.

Тоді, під час зміни положення стріли від мінімального до максимального кутів справедливі обмеження-рівності:

$$k_1 \cos(2\pi - (\beta + \varphi_{min})) - k_2 = -S_{min}^2; \quad (3)$$

$$k_1 \cos(2\pi - (\beta + \varphi_{max})) - k_2 = -S_{max}^2. \quad (4)$$

Розв'язавши одержану систему рівнянь відносно k_1 та k_2 , знайдемо:

$$k_1 = \frac{S_{min}^2 - S_{max}^2}{\cos(2\pi - (\beta + \varphi_{max})) - \cos(2\pi - (\beta + \varphi_{min}))}; \quad (5)$$

$$k_2 = k_1 \cos(2\pi - (\beta + \varphi_{max})) + S_{max}^2. \quad (6)$$

Тоді два з трьох проектних параметрів a та b можна представити в наступному вигляді:

$$a = \frac{k_1}{2b}; \quad (7)$$

$$b = \sqrt{\frac{k_2 + \sqrt{k_2^2 - k_1^2}}{2}}. \quad (8)$$

Залишається один параметр β . Таким чином, одержана задача одновимірної оптимізації зусилля T в залежності від одного проектного параметру.

Додатково належить відмітити, що для запобігання перевертання в безкінечність цільової функції необхідно обмежувати діапазон значень параметру β :

$$\pi - \varphi_{min} \leq \beta^B \leq 2\pi - \varphi_{max}. \quad (9)$$

Для проведення розрахунків використовувався табличний процесор MS Excel з надбудовою «Пошук рішення» (Solver).

Лист з розрахунком для фізичної моделі робочого обладнання універсальної роторної землерийної траншейно-котлованної машини безперервної дії, представлений на рис. 3.

В комірки A4:F4, виділені жовтим кольором, вносяться вихідні дані:

- найменший і найбільший кут підйому стріли;
- найменша та найбільша довжина гідроциліндру підйому РО;
- довжина стріли (рами);
- вага РО.

Слід зазначити, що останні два параметри не вплинуть на знайдені в результаті оптимізації координати кріплення циліндру. Але щоб отримати одночасно абсолютне значення сили в циліндрі, бажано правильно задати і ці параметри.

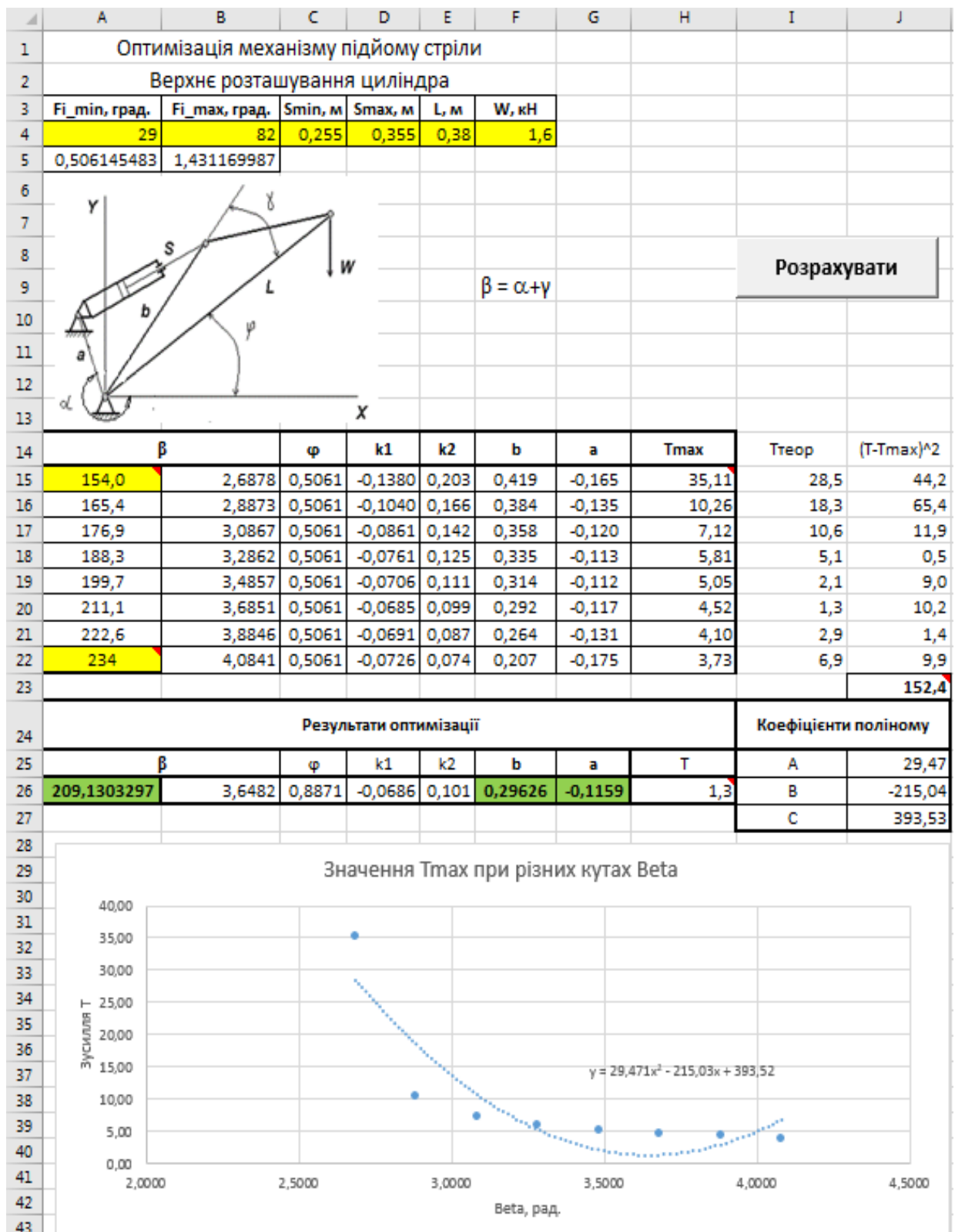


Рисунок 3 – Лист Excel з розрахунком для фізичної моделі машини.
 Figure 3 – Excel sheet with the calculation for the physical model of the machine.

Кнопка «Розрахувати» запускає макрос, розроблений з урахуванням рекомендацій [18]. В макросі багаторазовим викликом надбудови Solver виконуються наступні розрахунки:

- пошук максимальних T (комірки H15:H22) підбором φ (C15:C22) для кожного значення шуканого кута β ;
- у комірках I15:I22 розраховуються значення $T_{теор.}$ (як апроксимація поліномом точок H15:H22) і пошук мінімуму суми квадратів відхилень (J23) підбором коефіцієнтів поліному (J25:J27);
- використовуючи отриманий поліном, виконується пошук мінімального серед усіх максимальних T_{max} (H26) підбором β (B26);
- результати виводяться у комірки A26, F26 та G26 із зеленим фоном і у вигляді графіку.

В результаті проведеної оптимізації для фізичної моделі робочого обладнання універсальної роторної землерийної траншейно-котлованної машини безперервної дії отримано оптимальне значення кута $\beta = 209,13^\circ$.

З конструктивних міркувань, зважаючи на можливість швидко та з найменшими витратами провести модернізацію існуючої фізичної моделі робочого обладнання, прийнято рішення:

- змінити положення кріплення провусини циліндра, що розташована на передній рамі робочого обладнання, згідно до розрахункових значень ($\alpha = \beta = 209^\circ$, $a = 116$ мм) рисунок 4;
- положення кріплення провусини штока гідроциліндра, що розташовано на проміжній, залишити без змін, позаяк розрахункове значення $b = 296$ мм відрізняється від існуючого ($b = 293$ мм) на 3 мм, тобто на 1%.

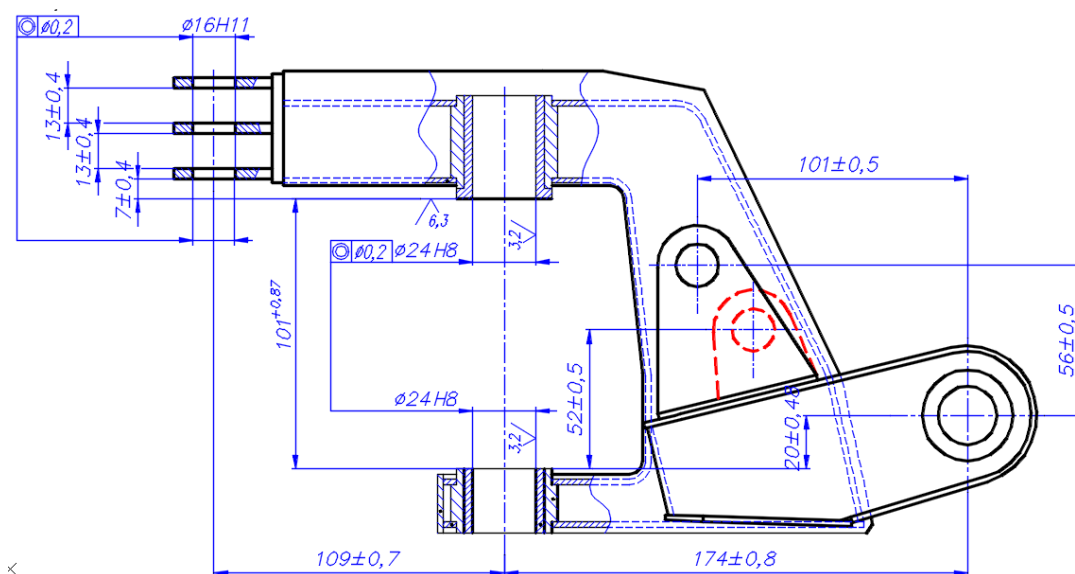


Рисунок 4 – Скориговане креслення передньої рами механізму підйому.
Figure 4 – Corrected drawing of the front frame of the lifting mechanism.

Додаткові розрахунки підтверджують правильність прийнятих рішень. Проведена модернізація механізму підйому робочого обладнання забезпечує потрібний кут підйому робочого обладнання з забою та дозволяє зменшити навантаження на гідроциліндрах і потрібний тиск в гідравлічній системі в 1,39 рази у порівнянні з існуючим.

Висновки та рекомендації

1. Сформульовано задачу оптимізації механізму підйому – опускання робочого обладнання як пошук мінімального значення зусилля на штоку гідроциліндра із ряду максимальних.
2. Запропоновано проводити розрахунки з використанням залежностей (1) – (8) з урахуванням обмежень (9) у табличному процесорі MS Excel з надбудовою «Пошук рішення» (Solver).
3. В результаті проведеної оптимізації для фізичної моделі робочого обладнання універсальної роторної землерийної траншейно-котлованної машини безперервної дії знайдено параметри розташування місць кріплення гідроциліндра підйому-опускання робочого обладнання, що забезпечує зменшення навантаження на гідроциліндрах у 1,39 рази та збереження заданої кінематики механізму.
4. Запропоновану методику можна рекомендувати до використання у розрахунках механізмів підйому інших механізмів, де циліндр розташований над стрілою і для підйому робочого обладнання рідина подається в штокову порожнину гідроциліндра.

Перелік посилань

1. Мусійко В.Д., Коваль А.Б., Лазарук Ю.В. Проблеми, напрямки та перспективи створення і модернізації землерийних машин безперервної дії спеціального призначення. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. Київ, 2021. Вип. 48. С. 223-232. DOI: 10.33744/2308-6645-2021-1-48-223-232.
2. Мусійко В.Д., Коваль А.Б., Лазарук Ю.В., Пасенко Ю.І. Підвищення продуктивності та розширення технологічних можливостей універсальних землерийних машин удосконаленням кінематики переміщення їх робочих органів в забої. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Науково-технічний збірник. Київ, 2023. Вип. 114. Частина 2. С. 230-244. DOI:10.33744/0365-8171-2023-114.2-230-244.
3. Ковалевський С. Г., Білякович М. О. Дослідження міцності робочого обладнання малогабаритного навантажувача. Вісник ХНАДУ. Харків, 2023. Вип. 101. т.2, С. 40–45. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.40.
4. Гурко О. Г., Доля Ю. О. Дослідження параметрів руху автогідропідіймача з обертальними зчленуваннями. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. Запоріжжя, 2016, №2, С. 121-126.
5. Рагулін В.М., Ярижко О.В., Назарько О.О. Комп'ютерне моделювання як метод та засіб удосконалення будівельних машин. Міжвідомчий науково-технічний збірник “Прикладна геометрія та інженерна графіка”. Випуск 102. Київ, 2022. С. 181–187. DOI: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2022.102>.
6. Шевченко В. О., Рагулін В. М., Ходирев С.Я. Дослідження навантаження модернізованого механізму підвіски тягової рами автогрейдера сімейства ДЗк-250./ Вісник ХНАДУ. Харків, 2019. Вип. 87. С. 18–23. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.87.0.18.
7. McCracken, D. D., & Dorn, W. S. (1968). Numerical methods and FORTRAN programming : with applications in engineering and science (Second corrected printing). Wiley.
8. Forsythe, G. Elmer, Malcolm, M. A, & Moler, C. Barry. (1977). Computer 9. methods for mathematical computations. Englewood Cliffs (N.J.): Prentice-Hall.
9. Metcalf, M. (1982). FORTRAN optimization. London.
10. Сукач М.К., Горбатьок Є.В. Марченко Г.А. Синтез землерийної і дорожньої техніки: підручник. За ред. д.т.н., проф. М.К. Сукача. Київ, 2013. 376 с.
11. Хмара Л.А. Іноваційне телескопічне робоче обладнання одноківшевих екскаваторів / Л.А. Хмара, О.О. Дахно. Дніпро, 2017. 170 с.
12. Bin Zhang. Research on Trajectory Planning and Autodig of Hydraulic Excavator. URL: <https://downloads.hindawi.com/journals/mpe/2017/7139858.pdf> DOI: 10.1155/2017/7139858
13. Md Rakibul Islam. Research Progress Of Kinematic Analysis Of Hydraulic Excavator. URL: https://www.researchgate.net/profile/Md-Rakibul-Islam-7/publication/349724431_research_progress_of_kinematic_analysis_of_hydraulic_excavator/links/603e9171

a6fdcc9c780c6683/research-progress-of-kinematic-analysis-of-hydraulic-excavator.pdf.

DOI:10.13140/RG.2.2.29370.93120

14. Dongjae Lee, Inkyu Jang, Jeonghyun Byun, Hoseong Seo. Real-Time Motion Planning of a Hydraulic Excavator using Trajectory Optimization and Model Predictive Control. URL: <https://arxiv.org/pdf/2107.02366.pdf> DOI: 10.1109/iroso51168.2021.9635965

15. Sachin B. Bende, Nilesh P. Awate. Design, modeling and analysis of excavator arm. International journal of design and manufacturing technology. 2013. Volume 4, Issue 2, pp. 14-20. https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJDMT/VOLUME_4_ISSUE_2/30320130402002.pdf.

16. Високович Є.В., Коваль А. Б. Синтез параметрів базової геометрії робочого обладнання однокішшевих екскаваторів. Вісник ХНАДУ, 2022. вип. 99, с. 105-110. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.99.0.105

17. Високович Є.В., Коваль А. Б., Білякович М.О., Орел О.В. Автоматизація розрахунку робочого обладнання машин з використанням теорії графів. Вісник ХНАДУ, 2023 . вип. 101, т.1, с. 126-133. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.126.

18. Madhuki Thakur. WBA Solver. Educba Blog. <https://www.educba.com/vba-solver/>

OPTIMIZATION OF THE LIFTING MECHANISM FOR THE WORKING EQUIPMENT OF AN EARTHMOVING MACHINE

Yevhen Vysokovych, Candidate of Technical Science, National Transport University, Associate Professor, Department of the engineering of transport construction machines, y.vysokovych@ntu.edu.ua, +380677537367, <https://orcid.org/0000-0002-6522-4537>

Andrii Koval, Candidate of Technical Science, National Transport University, Associate Professor, Department of the engineering of transport construction machines, e-mail: kandr@i.ua, +380500240894, <https://orcid.org/0000-0003-1295-8200>

Yuri Pasenko, master of Science, graduate student of Department of engineering of transport construction machines, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: 280bar@gmail.com, +380675022751, <https://orcid.org/0000-0002-2986-8781>

Vitaliy Ragulin, Candidate of Technical Science, Kharkiv National Automobile and Highway University, Associate Professor Department of Construction and Road-Building Machinery, e-mail: ragulinrvn@ukr.net, +380972957392, <https://orcid.org/0000-0003-2083-4937>

Oleksandr Topol, student of Department of engineering of transport construction machines, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: topolsasha@gmail.com, +380731387873, <https://orcid.org/0009-0002-9702-430X>

Summary. This paper addresses the optimization of the structural parameters of the lifting mechanism of the frame for the working equipment in a universal rotary earthmoving trenching and excavation machine operating continuously. The goal is to reduce the efforts in its hydraulic cylinders while maintaining the prescribed kinematics of the mechanism.

Structurally, the lifting mechanisms of the working equipment are designed with the hydraulic cylinder positioned above the boom (frame), and the fluid is supplied to the rod chamber of the hydraulic cylinder for lifting.

The formulated optimization task aims to design a mechanism that could reach initial and final positions while simultaneously developing minimal peak effort on the hydraulic cylinder rod. Known as a "minimax" problem, this task seeks the minimum value among a set of maximums. Variables chosen include the linear distances from the axis of rotation to the hydraulic cylinder attachment points and the structural angle; a target function is defined. Computational dependencies for determining the design parameters and the force on the hydraulic cylinder rod are presented. Additionally, a constraint on the range of values for the structural angle parameter has been introduced.

For calculations, a spreadsheet processor MS Excel with the "Solver" add-on was used.

As a result of the optimization for the physical model of the working equipment of the universal rotary earthmoving trenching and excavation machine operating continuously, the parameters for the positioning of the hydraulic cylinder attachment points were found to reduce the load on the hydraulic cylinders by 1.39 times while maintaining the prescribed kinematics of the mechanism.

The proposed methodology can be recommended for use in calculations of other lifting mechanisms where the cylinder is positioned above the boom and the fluid is supplied to the rod chamber of the hydraulic cylinder.

Keywords: hydraulic cylinder, earthmoving machine, force, working equipment, force calculation, software, link-lever mechanism

References

1. Musiyko V.D., Koval A.B., Lazaruk Yn.V. Problems, directions, and horizons in the creation and modernization of specialized continuously operating earthmoving machines. *Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences»*. Scientific and Technical Collection. Kyiv, 2021. – Issue 48. p. 223-232. DOI: 10.33744/2308-6645-2021-1-48-223-232. [in Ukrainian].
2. Musiyko V.D., Koval A.B., Lazaruk Yu.V., Pasenko Yu.V. Increasing the efficiency and expanding the technological capabilities of the universal earth-moving machinery by improving the kinematics of the movement of their working body in the soil. *Automobile roads and road construction. Scientific and technical journal*. Kyiv, 2023. No. 114. Vol. 2. P. 230-244. DOI:10.33744/0365-8171-2023-114.2-230-244. DOI:10.33744/0365-8171-2023-114.2-230-244. [in Ukrainian].
3. Kovalevskiyi Serhii, Biliakovych Mykola Studying the strength of a small-sized loader working equipment. [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. Kharkiv, 2023. N. 101. Vol.2, P. 40–45. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.40.](#) [in Ukrainian].
4. Gurko A., Dolia Yu. Investigation of cherry-picker motion parameters with rotational joints. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering. Zaporizhzhia*, 2016. N 2. P. [121-126](#). [in Ukrainian].
5. Ragulin Vitaliy, Yaryzhko Oleksandr, Nazarko Olga. Computer modeling as a method and means of improving construction machines. *Applied geometry and engineering graphics*. No 102. Kyiv, 2022. P. 181–187. DOI: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2022.102>. [in Ukrainian].
6. Shevchenko Valery, Ragulin Vitaliy, Khodyriev Serhii Studying the load of the upgraded traction frame suspension mechanism of the DZk-250 collection of the motor grader. [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. Kharkiv, 2019. No. 87. P. 18–23. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.87.0.18.](#) [in Ukrainian].
7. McCracken, D. D., & Dorn, W. S. (1968). *Numerical methods and FORTRAN programming : with applications in engineering and science* (Second corrected printing). Wiley.
8. Forsythe, G. Elmer, Malcolm, M. A, & Moler, C. Barry. (1977). *Computer 9. methods for mathematical computations*. Englewood Cliffs (N.J.): Prentice-Hall.
9. Metcalf, M. (1982). *FORTRAN optimization*. London.
10. Sukach M.K., Horbatiuk E.V., Marchenko H.A. *Syntez zemleryinoi I dorozhnoi tekhniky: pidruchnyk*. (Synthesis of earthmoving and road engineering: textbook). Kyiv, 2013. 376 p. [in Ukrainian].
11. Khmara L.A., Dakhno O.O. *Inovatsiine teleskopichne roboche obladnannia odnokedshevykh ekskavatoriv* (Innovative telescopic working equipment of single-bucket excavator). Dnipro, 2017. 170 p.
12. Bin Zhang. *Research on Trajectory Planning and Autodig of Hydraulic Excavator*. URL: <https://downloads.hindawi.com/journals/mpe/2017/7139858.pdf> DOI: 10.1155/2017/7139858
13. Md Rakibul Islam. *Research Progress Of Kinematic Analysis Of Hydraulic Excavator*. URL: https://www.researchgate.net/profile/Md-Rakibul-Islam-7/publication/349724431_research_progress_of_kinematic_analysis_of_hydraulic_excavator/links/603e9171a6fdcc9c780c6683/research-progress-of-kinematic-analysis-of-hydraulic-excavator.pdf. DOI:10.13140/RG.2.2.29370.93120

14. Dongjae Lee, Inkyu Jang, Jeonghyun Byun, Hoseong Seo. Real-Time Motion Planning of a Hydraulic Excavator using Trajectory Optimization and Model Predictive Control. URL: <https://arxiv.org/pdf/2107.02366.pdf> DOI: 10.1109/iros51168.2021.9635965.
15. Sachin B. Bende, Nilesh P. Awate. Design, modeling and analysis of excavator arm. International journal of design and manufacturing technology. 2013. Volume 4, Issue 2, pp. 14-20. https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJDMT/VOLUME_4_ISSUE_2/30320130402002.pdf
16. Vysokovych Ye. V., Koval A.B. Synthesis of basic geometry parameters of excavator working equipment. Bulletin Of Kharkiv National Automobile And Highway University, Kharkiv, 2022, issue 99, pp. 105-110. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.99.0
17. Vysokovych Ye. V., Koval A.B., Biliakovych M.O., Orel O.B. Automation of machines working equipment calculation using graph theory. Bulletin Of Kharkiv National Automobile And Highway University, Kharkiv, 2023. issue. 101, vol.1,pp. 126-133. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.126.
18. Madhuki Thakur. WBA Solver. Educba Blog. <https://www.educba.com/vba-solver/>.

Дата надходження до редакції 12.04.2024