

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРІВ БАЗОВОЇ ГЕОМЕТРІЇ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ ОДНОКІВШЕВИХ ЕКСКАВАТОРІВ

Високович С. В., Коваль А. Б.
Національний транспортний університет

Анотація. У статті розроблено математичну модель, що описує кінематику робочого обладнання екскаватора залежно від його параметрів і заданих координат зони обслуговування. На основі алгоритмів визначення параметрів базової геометрії та автоматичної побудови контурів робочої зони розроблено програмне забезпечення, яке спрощує вибір параметрів базової геометрії

Ключові слова: екскаватор, базова геометрія, робоча зона, синтез, програмне забезпечення

Вступ

Одноківшеві екскаватори на сьогодні є однією з найбільш популярних машин, що використовуються для здійснення різноманітних процесів як у будівництві, так і для ліквідації наслідків руйнувань, під час ремонтних робіт а також демонтажу будівельних конструкцій. Основним видом робочого обладнання, яке використовується на одноківшевих екскаваторах, є зворотна лопата.

Відомо, що робоче обладнання екскаваторів є механізмом маніпуляційного типу – простий і розімкнений (крім приводу ланок) кінематичний ланцюг, який можна гнучко пристосувати для здійснення конкретного виду робіт завдяки зміні його окремих ланок та їхніх розмірів.

Робоча зона, або зона обслуговування, є однією з основних характеристик робочого обладнання маніпуляційного типу. Вона має відповідати певним вимогам: найбільша глибина копання, висота вивантаження та радіус копання на рівні стоянки. Параметри робочої зони зазвичай задаються на стадії проектування машини для різноманітних варіантів компонування робочого обладнання. Водночас варто заздалегідь розглянути якомога більше цих варіантів, щоб в подальшому спростити їхній вибір вже в процесі експлуатації, коли буде потрібно пристосувати машину під здійснення конкретного виду робіт. Одним із таких видів є екскаватори зі змінною геометрією. Частіше за все це досягається використанням телескопічних механізмів та шарнірно-зчленованої стріли, що забезпечує швидку зміну зони обслуговування машини без потреби у її переобладнанні та переміщенні.

У роботі за основу приймаються параметри робочої зони, які задаються в технічному завданні на прикладі найбільш поширеного

виду робочого обладнання – зворотної лопати.

Для забезпечення параметрів заданої робочої зони потрібно правильно підібрати базову геометрію, тобто такі параметри робочого обладнання, як довжина стріли та рукояті, радіус, що описується кромкою ківша, а також діапазон кутів між переліченими елементами робочого обладнання.

Оскільки діапазон значень кутів між ланками обмежується їхніми конструктивними особливостями, то для вибору залишаються довжини ланок.

Аналіз публікацій

Найявні методики використовують різноманітні підходи до проектування базової геометрії. Традиційно [1–4] пропонують вибрати базову геометрію, беручи до уваги аналоги, тобто параметри машин з однаковим типорозміром, з наступною перевіркою щодо забезпечення заданої робочої зони. Зазвичай така перевірка зводиться до графічних побудов вручну, що потребує багато часу.

Завдяки розвитку CAD-систем і технологій 3D-моделювання останнім часом з'явилося багато робіт [5–8], де аналізувався процес симуляції роботи екскаватора. У таких роботах розглядається перспектива створення систем автоматичного або дистанційного керування роботою екскаватора та побудови зони обслуговування. На жаль, їх використання для перевірки варіантів геометрії ускладнюється потребою мати 3D-модель екскаватора для кожного з варіантів, які перевіряються

Більш цікавим є вибір базової геометрії, що оснований на кінематичних залежностях, які дозволяють сформулювати іншу задачу – синтез базової геометрії робочої зони. На сьогодні задача синтезу базової геометрії РО екскаваторів в літературі не досліджувалась,

хоча має суттєві переваги – легкість формалізації, простота та скорочення часу пошуку рішення. Водночас варто зазначити, що в разі використання такого підходу результат розрахунків не може бути єдиним, необхідно також перевірити правильність вибору параметрів базової геометрії через побудову робочої зони, коригувати вихідні дані, тобто процес пошуку рішення має бути інтерактивним та ітераційним.

Через значну трудомісткість перелічених процедур, зокрема велику кількість варіантів, що аналізуються, процес синтезу базової геометрії та аналізу її результатів потребує автоматизації.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є автоматизація синтезу параметрів базової геометрії однокішневих гідравлічних екскаваторів з робочим обладнанням зворотною лопатою на основі заданих параметрів зони обслуговування (робочої зони) з широким спектром варіантів компоновання робочого обладнання.

Для досягнення поставленої мети потрібно розробити математичну модель кінематики робочого обладнання, розробити алгоритм та програмне забезпечення, яке забезпечить автоматизоване визначення параметрів базової геометрії та автоматичну побудову контурів робочої зони для різних варіантів компоновання робочого обладнання.

Необхідно навести результати розрахунків для спрощення їхнього аналізу та визначити інтерактивність процедури коригування вихідних даних для можливості їх оперативної зміни під час цього процесу.

Математична модель

Для однокішневого екскаватора з робочим обладнанням типу зворотна лопата параметри зони обслуговування визначають координати трьох її характерних точок: максимальної висоти вивантаження, радіуса копання на рівні стоянки та глибини копання.

Завдання синтезу передбачає визначення залежностей параметрів базової геометрії з координатами характерних точок робочої зони. Для їх отримання розглянемо схеми робочого обладнання в трьох розрахункових положеннях.

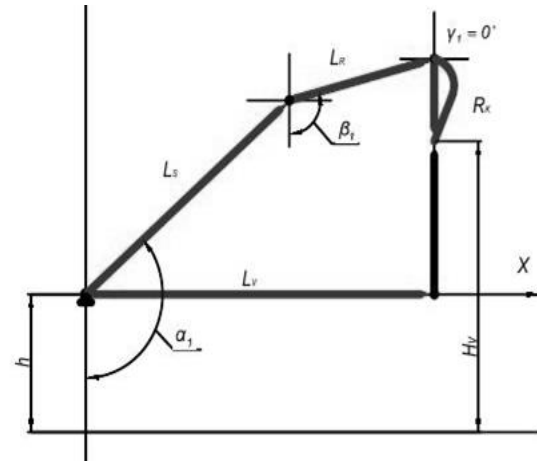


Рис. 1. Схема до визначення параметрів базової геометрії під час вивантаження

Зв'язок між геометричними параметрами робочого обладнання та координатами кромки ківша в першому розрахунковому положенні можна навести як такі залежності:

$$\begin{aligned} L_S \cdot \sin(180^\circ - \alpha_1) + L_R \cdot \sin(180^\circ - \beta_1) + \\ + R_k \cdot \sin(\gamma_1) = L_v ; \\ L_S \cdot \cos(180^\circ - \alpha_1) + L_R \cdot \cos(180^\circ - \beta_1) + \\ + R_k \cdot \cos(\gamma_1) = H_v - h, \end{aligned} \quad (1)$$

де α_1 – кут нахилу осі стріли до вертикалі в крайньому верхньому положенні;

β_1 – кут нахилу осі рукояті до вертикалі в крайньому верхньому положенні: $\beta_1 = \beta_{max} - 180^\circ + \alpha_1$;

β_{max} – кут між осями рукояті та стріли в повністю випрямленому положенні робочого обладнання;

γ_1 – кут нахилу ківша між лінією, що з'єднує його шарнір з точкою кромки ($\gamma_1 = 0$)

L_S – довжина стріли вздовж осі, тобто відстань між її опорним шарніром і шарніром кріплення рукояті;

L_R – довжина рукояті, тобто відстань між шарнірами її кріплення до стріли та шарніром ківша;

R_k – радіус копання ковшем;

L_v – відстань по горизонталі від осі опорного шарніра стріли до осі повороту ківша, коли стріла максимально піднята, а робоче обладнання повністю випрямлене;

H_v – максимальна висота розвантаження;

h – висота опорного (нижнього) шарніра стріли над рівнем стоянки.

Аналогічною є схема для другого положення, яке відповідає максимальному радіусу копання на рівні стоянки.

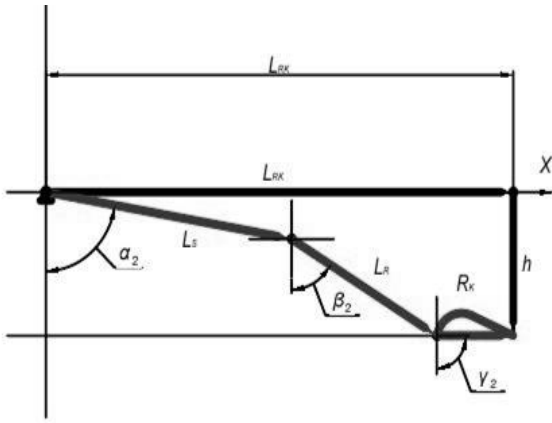


Рис. 2. Схема до визначення параметрів базової геометрії за максимального радіуса копання

Для цього положення маємо такі залежності:

$$\begin{aligned} L_S \cdot \sin(\alpha_2) + L_R \cdot \sin(\beta_2) + R_k \cdot \sin(\gamma_2) &= \\ &= L_{RK} \\ L_S \cdot \cos(\alpha_2) + L_R \cdot \cos(\beta_2) + \\ + R_k \cdot \cos(\gamma_2) &= h, \end{aligned} \quad (2)$$

де α_2 , β_2 та γ_2 – кути нахилу до вертикалі, тобто осей стріли, рукояті та ківша в положенні, коли робоче обладнання повністю випрямлене і шарнір ківша лежить на землі ($\gamma_2 = 0$);

L_{RK} – максимальний радіус копання на рівні стоянки.

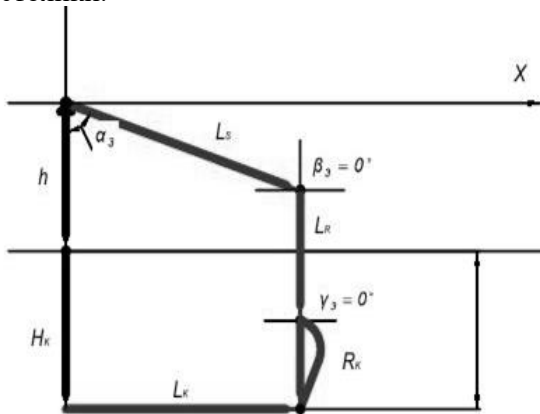


Рис. 3. Схема до визначення параметрів базової геометрії за максимальної глибини копання

Третє положення наведено такими схемою та залежностями:

$$\begin{aligned} L_S \cdot \cos(\alpha_3) + L_R \cdot \cos(\beta_3) + R_k \cdot \cos(\gamma_3) &= \\ &= h + H_K \\ L_S \cdot \sin(\alpha_3) + L_R \cdot \sin(\beta_3) + \\ + R_k \cdot \sin(\gamma_3) &= L_K, \end{aligned} \quad (3)$$

де α_3 – кут нахилу осі стріли до вертикалі в крайньому нижньому положенні;

β_3 та γ_3 – кути нахилу осі рукояті до вертикалі ($\beta_3 = 0$, $\gamma_3 = 0$);

H_K – максимальна глибина копання.

Отримані рівняння (1), (2) та (3) утворюють систему нелінійних рівнянь з невідомими L_S , L_R , R_k , L_V , L_K , α_2 . Для нас основними є перші три, тобто довжини стріли, рукояті та ківша. Саме вони визначають базову геометрію робочого обладнання. Розв'язання таких математичних задач чисельними методами розглядається в [9].

Вихідні дані для розрахування, крім координат характерних точок робочої зони, містять значення кутів між ланками обладнання. Ці кути залежать від конструктивних особливостей ланок. На початкових етапах проектування, коли конструкція ще остаточно не визначена, можна користуватись рекомендаціями [1; 2].

У процесі формалізації такої задачі враховувалось, що її розв'язок не може бути єдиним, отже, необхідні як перевірка отриманих результатів, так і коригування вихідних даних, тобто процес розв'язування має бути інтерактивним та ітераційним.

Програмна реалізація

На кафедрі інженерії машин транспортного будівництва НТУ було розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє автоматизувати деякі етапи процесу проектування робочого обладнання екскаваторів і навантажувачів [10].

Зокрема, синтез параметрів базової геометрії екскаваторів є однією із задач, які воно допоможе розв'язати. Також у програмному забезпеченні передбачено розв'язання задач з проектування екскаваторів, які в цій роботі не розглядаються: по-перше, це пошук оптимального розташування шарнірів гідроциліндрів для знайденого варіанта базової геометрії, щоб зменшити в них зусилля; по-друге, здійснення кінематичних і силових розрахунків не тільки екскаваторного, але й багатьох інших видів робочого обладнання, конструкцією якого є шарнірно-важільні механізми (екскаватори, навантажувачі, розпушувачі тощо).

Розроблена програма працює під ОС Windows і дозволяє розв'язувати всі перелічені задачі як послідовно, так і незалежно одна від одної.

Вікно вихідних даних для задачі синтезу параметрів базової геометрії наведено на рис. 4, а результати розрахунку – на рис. 5.

Програма виводить результати розрахування не тільки як числа, але й автоматично створює контури робочої зони. Візуальний контроль результатів синтезу значно спрощує

роботу без використання додаткових програм та засобів, а отже, суттєво пришвидшує вибір необхідного варіанта. Користувачу також надається можливість зберегти отримані параметри базової геометрії як окремий файл або передати їх на наступні етапи розрахунків, передбачені програмою.

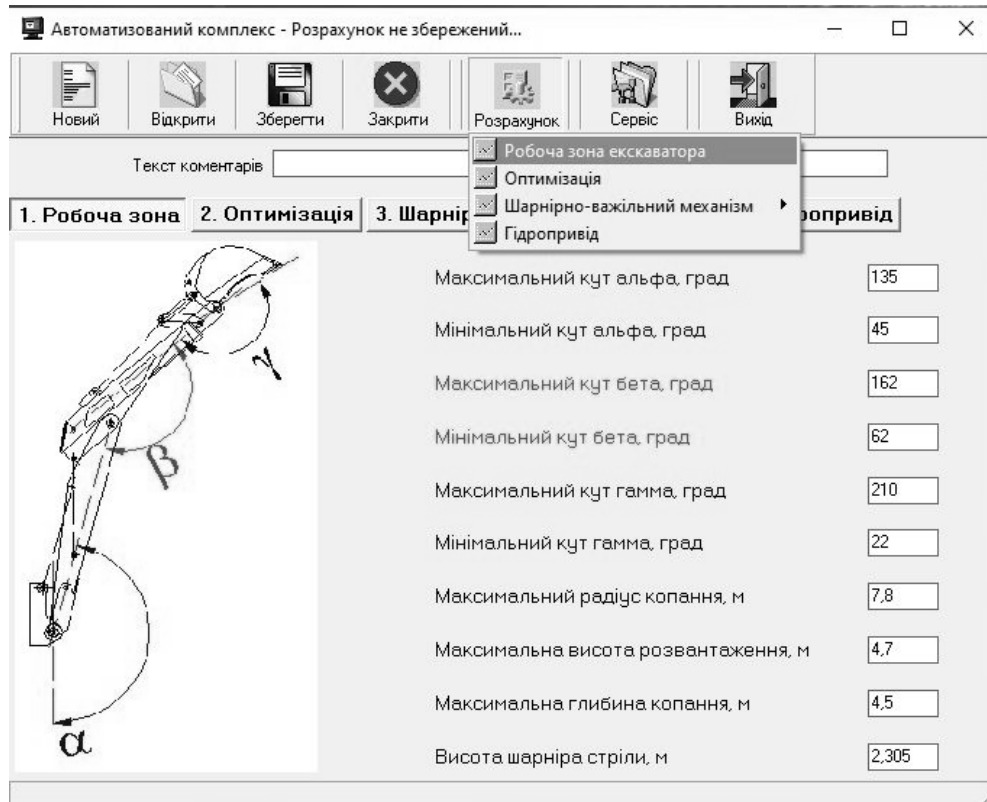


Рис. 4. Вікно введення даних для синтезу параметрів базової геометрії

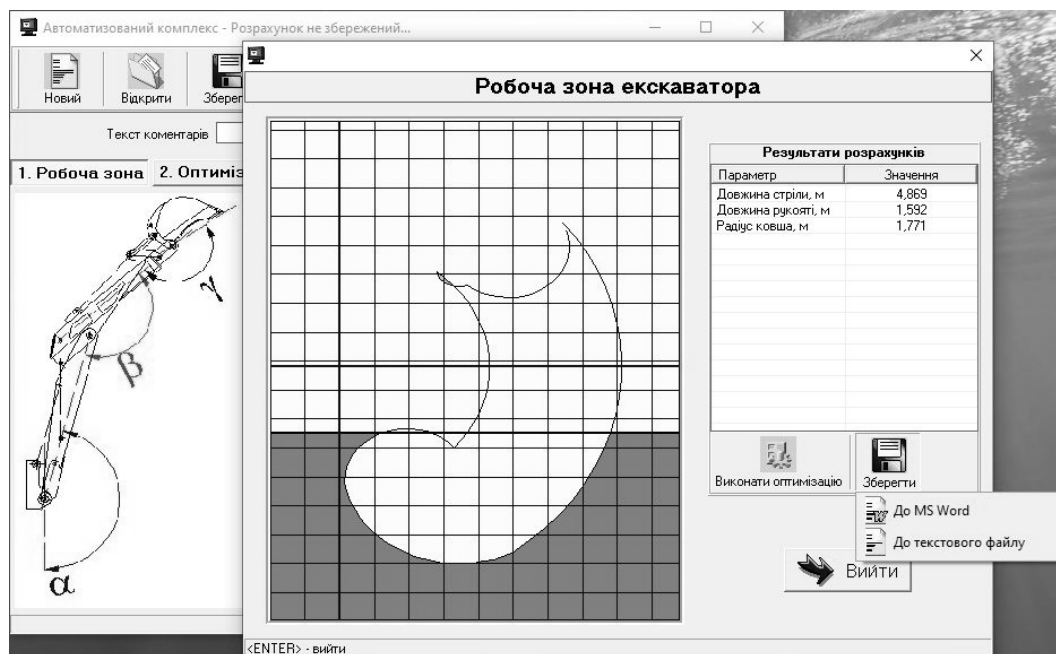


Рис. 5. Результати синтезу параметрів базової геометрії

Висновки

Створена математична модель, що описує кінематику робочого обладнання екскаватора залежно від його параметрів і заданих координат зони обслуговування, дозволяє здійснити синтез геометричних параметрів робочого обладнання.

Розроблено алгоритми автоматизованого визначення параметрів базової геометрії та автоматичної побудови контурів робочої зони.

Створено програмне забезпечення, яке, працюючи в інтерактивному режимі, значно спрощує та пришвидшує вибір параметрів базової геометрії залежно від заданих параметрів робочої зони та варіантів компоновання робочого обладнання.

Варто зазначити, що розроблене програмне забезпечення може бути застосовано не тільки на етапах проектування нових видів робочого обладнання екскаваторів, але і в процесі підготовки машини для здійснення конкретних видів робіт. Наприклад, воно дозволяє правильно підібрати розміри змінних ланок чи їхніх подовжувачів для машин з фіксованою геометрією або параметрів робочого обладнання зі змінною геометрією (довжин телескопічних ланок, кутів зламу шарнірно-зчленованої стріли тощо).

Запропонований підхід може також бути використаний для синтезу параметрів важливих механізмів інших будівельних машин, зокрема робочого обладнання навантажувачів, розпушувачів тощо.

Література

1. Аврун Г. А., Кириченко І. Г., Самородов В. Б. Гідравлічне обладнання будівельних та дорожніх машин: підручник. Харків: ХНАДУ, 2016. 438 с.
2. Сукач М. К., Горбатюк Є. В., Марченко Г. А. Синтез землерийної і дорожньої техніки: підручник. Київ: Видавництво Ліра-К, 2013. 376 с.
3. Хмара Л. А., Дахно О. О. Інноваційне телескопічне робоче обладнання однокішшевих екскаваторів. Дніпро: Літограф, 2017. 170 с.
4. Гідро- та пневмосистеми в автотракторобудуванні: навчальний посібник / Самородов В.Б. та ін. Харків: ФОП Панов А. М., 2020, 524 с.
5. 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.
6. 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.

7. 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/iro51168.2021.9635965.
8. Bongju Lee, H.Jin Kim. Trajectory generation for an automated excavator URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6987872> DOI: 10.1109/ICCAS.2014.6987872.
9. Турчак Л. И. Основы численных методов: учеб. пособие. Москва: Наука, 1987. 320 с.
10. Високович Є. В. Автоматизація підбору параметрів базової геометрії та розрахунку робочого обладнання однокішшевих екскаваторів. Застосування сучасних систем автоматизованого проектування в конструкторській та дослідницькій практиці: наукові праці Всеукраїнської науково-практичної конференції. Харків: Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т, 2019. 50 с.

References

1. Avrun G. A., Kirichenko I. G., Samorodov V. B. GIdravlichne obladnannya budivelnih ta dorozhnih mashin: pidruchnik. Harkiv: HNADU, 2016. 438 s.
2. Sukach M. K., Horbatiuk Ye. V., Marchenko H. A. Syntez zemleryinoi i dorozhnoi tekhniki: pidruchnyk. Kiev: Vydavnytstvo Lira-K, 2013. 376 s.
3. Khmara L. A., Dakhno O. O. Inovatsiine teleskopichne roboche obladnannya odnokivshevkykh ekskavatoriv. Dnipro: Litohrad, 2017. 170 s.
4. GIdro- ta pnevmosistemi v avtotraktorobuduvanni: navchalnyi posibnik / Samorodov V. B. ta in. Harkiv: FOP Panov A. M., 2020. 524 s.
5. 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.
6. 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.
7. 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/iro51168.2021.9635965.

8. Bongju Lee, H.Jin Kim. Trajectory generation for an automated excavator URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6987872> DOI: 10.1109/ICCAS.2014.6987872.
9. Turchak L. Y. Osnovy chyslennykh meto-dov: ucheb. posobyе. Moskva: Nauka, 1987. 320 s.
10. Vysokovych Ye. V. Avtomatyzatsiia pidboru parametriv bazovoi heometrii ta rozra-khunku robochoho obladnannia odnokivshe-vykh ekskavatoriv. Zastosuvannia suchasnykh system avtomatyzovanoho proektu-vannia v konstruktorskii ta doslidny-tskii praktytsi: naukovi pratsi Vseukra-yinskoї naukovo-praktychnoi konferentsii. Harkiv: Khark. nats. avtomob.-dor. un-t, 2019. 50 s.

Високович Євген Вадимович, к.т.н., доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, y.vysokovych@ntu.edu.ua, тел. +38 067-753-73-67,

Коваль Андрій Борисович, к.т.н., доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, тел. +38 050-024-08-94, a.koval@ntu.edu.ua, Національний транспортний університет, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 226, м. Київ, 01010, Україна.

Synthesis of basic geometry parameters of excavator working equipment

Abstract. Problem. Single-bucket excavators have become one of the most popular machines today, which are widely used to perform a variety of construction works. The working area or service area is one of the main characteristics of the work equipment of the manipulation type. It must meet certain requirements, which are: the largest digging depth, unloading height and digging radius at the level of the parking lot. To ensure the parameters of the given working area, it is necessary to correctly select the basic geometry of the

working equipment: the length of the boom and the handle, the turning radius of the bucket edge. **Goal.** The purpose of the work is to automate the synthesis of basic geometry parameters of the hydraulic excavators, according to the specified parameters of the service area (working area). **Methodology.** A system of non-linear equations establishing a relationship between the geometric parameters of the working equipment and the parameters of the working area was obtained. **Results.** The software for the OS Windows was developed. The program outputs not only numerical results. To visualize them, contours of the resulting working area are built. **Originality.** The relationship between the geometric parameters of the working equipment and the parameters of the working area has been established. A mathematical model and software for automating the synthesis of geometric parameters of working equipment have been developed. **Practical value.** The developed software can be applied not only at the design stages of new types of excavator working equipment, but also in the process of preparing the machine for specific types of work. The proposed approach can also be extended to the synthesis of parameters of the lever mechanisms of other construction machines, in particular, the working equipment of loaders, looseners, etc.

Key words: excavator, basic geometry, working area, synthesis, software.

Vysokovych Yevhen, Ph.D., Associate Professor, Department of engineering of transport construction machines, tel. +38 067-753-73-67, y.vysokovych@ntu.edu.ua,

Koval Andrii, Ph.D., Associate Professor, Department of engineering of transport construction machines, tel. +38 050-024-08-94, a.koval@ntu.edu.ua, National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka Str. 1, of. 226, Kyiv, 01010, Ukraine.