

УДК 621.879.31

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.126

АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ МАШИН З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

Високович Є.В.¹, Коваль А. Б.¹, Білякович М.О.¹, Орел О. В.²

¹Національний транспортний університет

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У роботі наведено приклад використання методики автоматизованого розрахунку робочого обладнання будівельних машин за допомогою шарнірно-важільних механізмів. Підхід, що застосовується в методиці, базується на теорії графів і забезпечує напівавтоматичний аналіз структури механізму та автоматичне визначення систем рівнянь його статичної рівноваги. На основі методики розроблено програмне забезпечення, яке автоматизує здійснення силового розрахунку в довільних положеннях механізму за різних схем його навантаження.

Ключові слова: шарнірно-важільний механізм, граф, силовий розрахунок, автоматизація, програмне забезпечення.

Вступ

Робоче обладнання багатьох будівельних та дорожніх машин з гідравлічним приводом (деякі крани, одноківшеві екскаватори, навантажувачі, розпушувачі тощо) є шарнірно-важільними механізмами, окремими елементами яких є гідроциліндри.

Основними завданнями розрахунку таких механізмів є визначення сил, що діють в їхніх шарнірах за різних положень робочого обладнання і за заданих зовнішніх навантажень. Отримані результати закладаються як у гідравлічний розрахунок, так і в розрахунки міцності елементів робочого обладнання.

Аналіз публікацій

Найявні методики використовують різноманітні підходи до силового розрахунку робочого обладнання у вигляді шарнірно-важільних механізмів. Традиційний [1–4] підхід до геометричного та силового розрахунків шарнірно-важільних механізмів вимагає не тільки побудову самого механізму в різних положеннях, але й планів сил у кожному з них. Визначення навантажень здійснюється графічним або графоаналітичним методами, але вони досить трудомісткі і тому не дозволяють швидко здійснити аналіз, який, крім того, може містити неточний результат.

Застосування аналітичних методів передбачає використання математичного моделювання. Як відомо, воно складається з двох фаз: формування математичної моделі та її реалізації. Використання ПК тільки на другому етапі, тобто в процесі неавтоматизованого визначення математичної моделі, через велику різноманітність структурних схем

механізмів буде малоефективним, оскільки таку математичну модель, як і її програмну реалізацію на комп'ютері, можна використати тільки для розрахунку конкретної схеми механізму.

Розвиток CAD-систем і технологій 3D-моделювання останнім часом сприяв появі багатьох робіт [5–8], де досліджується процес симуляції роботи екскаватора. Метою таких робіт є створення систем автоматичного або дистанційного керування роботою екскаватора. Використання цих розробок для геометричного та силового розрахунків є незручним, зокрема на початкових стадіях проектування машини, оскільки для цього процесу потрібна 3D-модель екскаватора.

Водночас у роботах [9–10] проаналізовано підхід, що значно спрощує весь комплекс підготовки до розрахунку та надає можливості щодо його автоматизації. Метод базується на використанні для аналізу структури механізму теорії графів і може бути застосований для великої кількості класів механізмів, зокрема не тільки шарнірно-важільних.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є розроблення методики та відповідного програмного забезпечення, що автоматизує визначення складових реакцій у шарнірах гідравлічного робочого обладнання великої кількості класів будівельних машин.

Досягнення поставленої мети вимагає максимальної формалізації процесу створення математичної моделі робочого обладнання, розроблення алгоритму та програмного забезпечення, яке автоматизує визначення та розв'язання системи рівнянь статичної рівноваги механізму. Водночас потрібно перед-

бачити як наочне наведення результатів розрахунків для спрощення їхнього аналізу, так й інтерактивність процедури коригування вихідних даних для можливості оперативної їх зміни під час розрахунків.

Математична модель

Аналіз застосування графів для визначення механізмів розглянуто в [9], тому ми не будемо детально розглядати це питання.

Варто зазначити, що граф описує взаємозв'язки між ланками механізму. Матриця інцидентів є повним аналогом графа лише матричному вигляді. Щодо цього є такі припущення: тертя в шарнірах відсутнє, ланки абсолютно жорсткі.

Саме матричний запис структури механізму не тільки є ідеальним для роботи з комп'ютером, але й додатково дозволяє автоматизувати складання системи рівнянь статичної рівноваги. Якщо обмежитись механізмами будівельних машин, зокрема плоскими, то можна автоматизувати навіть побудову графа або матриці інцидентів. З цією метою авторами розроблені певні правила нумерації ланок та шарнірів механізму, а також способи зазначення координат шарнірів і точок прикладення зовнішніх сил.

Всі наступні етапи розрахунку розглянемо на прикладі траншейної машини, наведеної на рис. 1. Робоче обладнання розміщено на базовому автомобілі КрАЗ-5233НЕ і складається зі скребкового робочого органа, металника і рами підйому. На рисунку воно подано в робочому положенні. Переведення

робочого обладнання цієї машини в положення для транспортування здійснюється гідроциліндрами. Навантаження, що виникають в них від сил ваги, будуть найбільшими саме в положенні, що наведено на схемі. Воно й буде розрахунковим.

Завданням розрахунку є визначення зусиль в усіх шарнірах механізму, зокрема в гідроциліндрах. Першим етапом підготовки даних є створення розрахункової схеми на загальному виді машини в будь-якій САД-системі.

Як зазначено на рис. 1, зверху від фронтальної проєкції машини в системі AutoCAD побудовано схематичне зображення механізму. Для цього було створено додаткові шари. Це дозволило зробити всі інші шари невидимими й отримати зображення розрахункової схеми (рис. 2), з яким працювати набагато простіше. Механізм складається з чотирьох ланок і шести шарнірів.

На наведеній схемі римськими цифрами пронумеровані ланки механізму, а арабськими – шарніри. Нумерація ланок і шарнірів розпочинається з лівого боку. Два крайні ліві шарніри 1 і 2 є базовими. Вони з'єднують механізм з рамою автомобіля.

Під час нумерації шарнірів спочатку нумерують ті, що з'єднують поточну ланку з попередньою. Ці шарніри є опорними. Водночас опорним є шарнір, який з'єднує цю ланку з тією, що має найменший номер. Зрозуміло, що у ланок I і II опорні шарніри одночасно будуть і базовими.

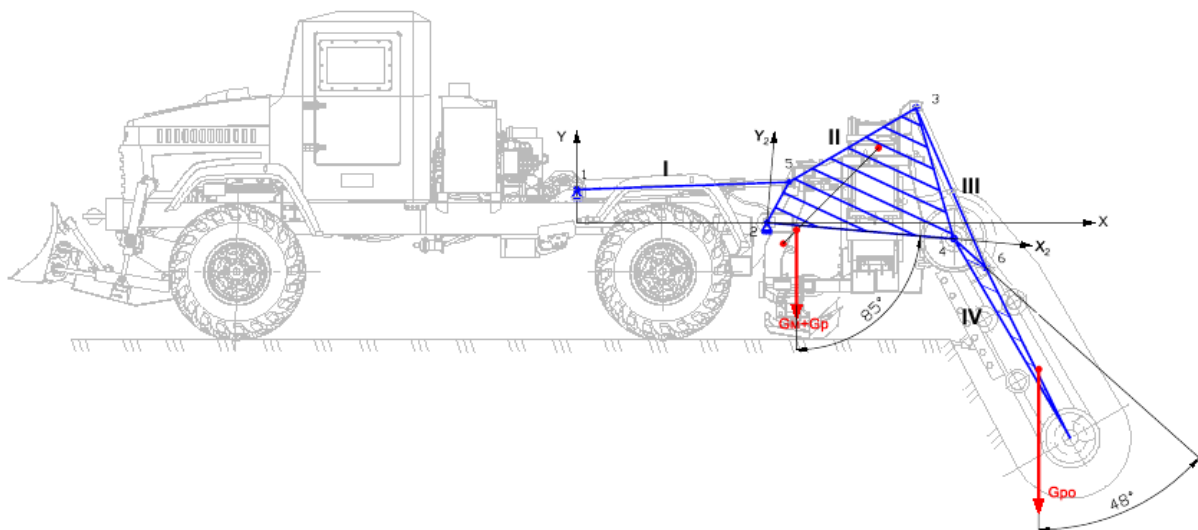


Рис. 1. Траншейна машина зі скребковим робочим органом

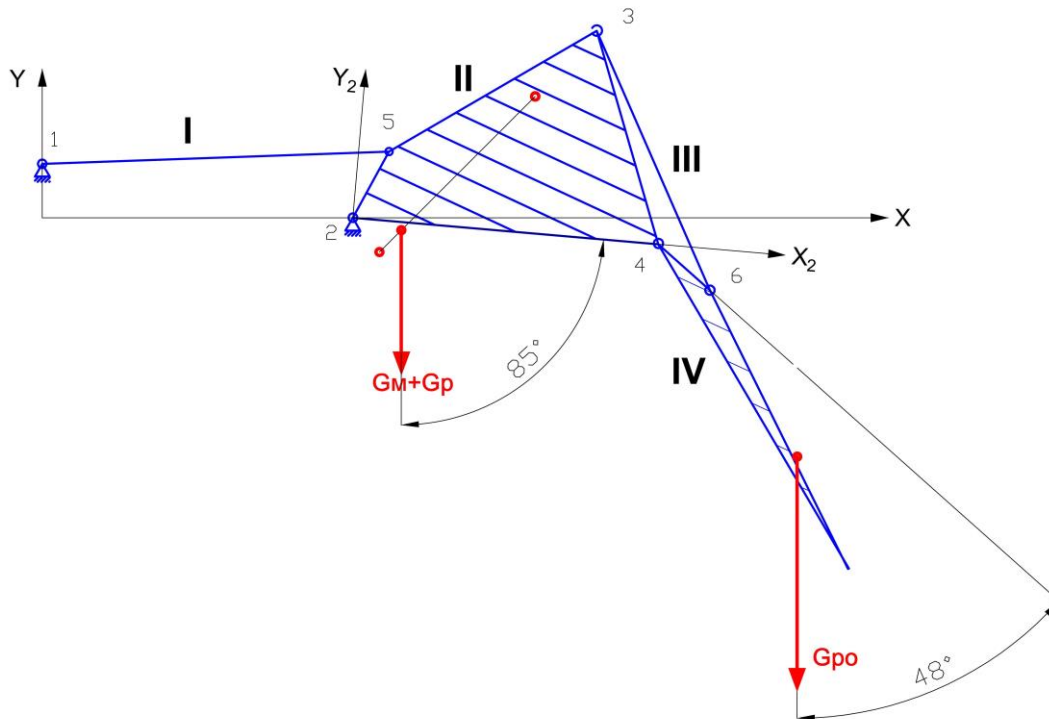


Рис. 2. Розрахункова схема робочого обладнання, побудована поверх фронтальної проєкції машини в окремих шарах

Ще одним обов'язковим правилом є те, що номер опорного шарніра має бути таким самим, як і номер ланки, якій він належить.

Коли всі опорні шарніри пронумеровані, нумеруються всі інші шарніри. На схемі зазначено, що це шарніри 5 і 6. Вони називаються «роз'ємними».

Потрібно також зазначити координати всіх шарнірів. Координати базових визначаються в глобальній системі XU , осі якої зручно провести прямо крізь ці шарніри.

Для кожної ланки визначено локальні системи координат. Це забезпечить незмінність координат шарнірів на кожній ланці незалежно від її нахилу. Початок локальних осей має знаходитись у відповідному опорному шарнірі, а напрямок може бути довільним. Водночас для спрощення введення даних необхідно провести одну з осей крізь будь-який шарнір ланки, тоді одна з його локальних координат дорівнюватиме нулю.

Зовнішні сили, які мають величину в кілоньютонах, координати точки прикладення і кут дії теж задаються в локальних координатах. У нашому прикладі зовнішніми є сили G_m+G_p і G_{po} , що діють на другу та четверту ланку.

Варто зазначити, що в нашому механізмі металник і рама підйому жорстко з'єднані між собою й утворюють єдину ланку II.

На схемі як приклад наведена лише одна локальна система координат X_2Y_2 саме цієї ланки.

Використання CAD-систем значно спрощує визначення локальних координат. Так, в AutoCAD для цього доцільно використовувати механізм систем координат користувача (ПСК) в поєднанні з командою КООРД. У цьому випадку для кожної ланки створюється своя іменована ПСК.

Програмна реалізація

На кафедрі інженерії машин транспортно-будівництва НТУ було розроблено програмне забезпечення (ПЗ), яке дозволяє автоматизувати декілька етапів процесу проєктування робочого обладнання будівельних машин. Зокрема, у [11–12] вже розглядалися такі завдання, як синтез параметрів базової геометрії екскаваторів і пошук оптимального розташування шарнірів гідроциліндрів для варіанта базової геометрії.

Водночас одним з головних завдань розробленого ПЗ є реалізація підходів та методики для здійснення силових розрахунків різноманітних видів робочого обладнання, конструкція якого є шарнірно-важільними механізмами (екскаватори, навантажувачі, розпушувачі тощо).

Розроблена програма працює під ОС Windows і дозволяє вирішувати всі перелічені за завдання як послідовно, так і незалежно одна від одної після вибору відповідної вкладки в основному вікні.

Вихідні дані для силового розрахунку подано у вікні, наведеному на рис. 3. Після заповнення всіх полів програма може зберегти дані в окремий файл, що спрощує процес повторних розрахунків механізму за інших значень вихідних даних (інші положення механізму або значення зовнішніх сил) або під час пошуку помилок.

Результати розрахунку наведено у двох вікнах. Перше (рис. 4) містить схематичне зображення механізму, яке генерується про-

грамою за заданими даними та дозволяє, поперше, переконатись в тому, що структура механізму задана правильно а по-друге, перевірити, чи правильно розташовані ланки механізму.

У другому вікні (рис. 5) безпосередньо наведено числові значення результатів розрахунку. Для кожної ланки наведено кут її нахилу до горизонту, координати шарнірів у локальних неповернутих осях, значення складових реакцій у кожному з шарнірів. У крайньому правому стовпчику для зручності наведено результати цих реакцій. Так, у нашому прикладі зусилля, що діють в циліндрах I і III, становлять 103,617 кН і 62,296 кН.

Текст коментарів

1. Робоча зона 2. Оптимізація 3. Шарнірно-важільний механізм 4. Гідропривід

Геометричні параметри

Кількість ланок Кількість шарнірів Кількість базових шарнірів

Базові шарніри			Інші шарніри			
Шарнір №	Координата X, м	Координата Y, м	Ланка №	Шарнір №	Координат...	Координат...
1	0	0,31	2	3	1,299	1,188
2	1,78	0	2	4	1,758	0

Ланки										
Ланка №	Початкове наближення КУТА, град	Кількість шарнірів	№ роз'ємного шарніра	Координата X, м	Координата Y, м	Вага, кН	Зовнішнє навантаження, кН	Координата X, м	Координата Y, м	Кут дії зовн. нав. град
1	0	2	5	1,989	0	0	0	0	0	0
2	0	4	5	0,174	0,396	0	24,47	0,282	-0,048	-85
3	0	2	6	1,625	0	0	0	0	0	0
4	0	2	6	0,396	0	0	12,85	1,405	-0,3803	-48

Рис. 3. Вікно введення даних для силового розрахунку. Необхідна кількість рядків в областях «Базові шарніри», «Інші шарніри» та «Ланки» з'являється автоматично після заповнення полів «Кількість...»

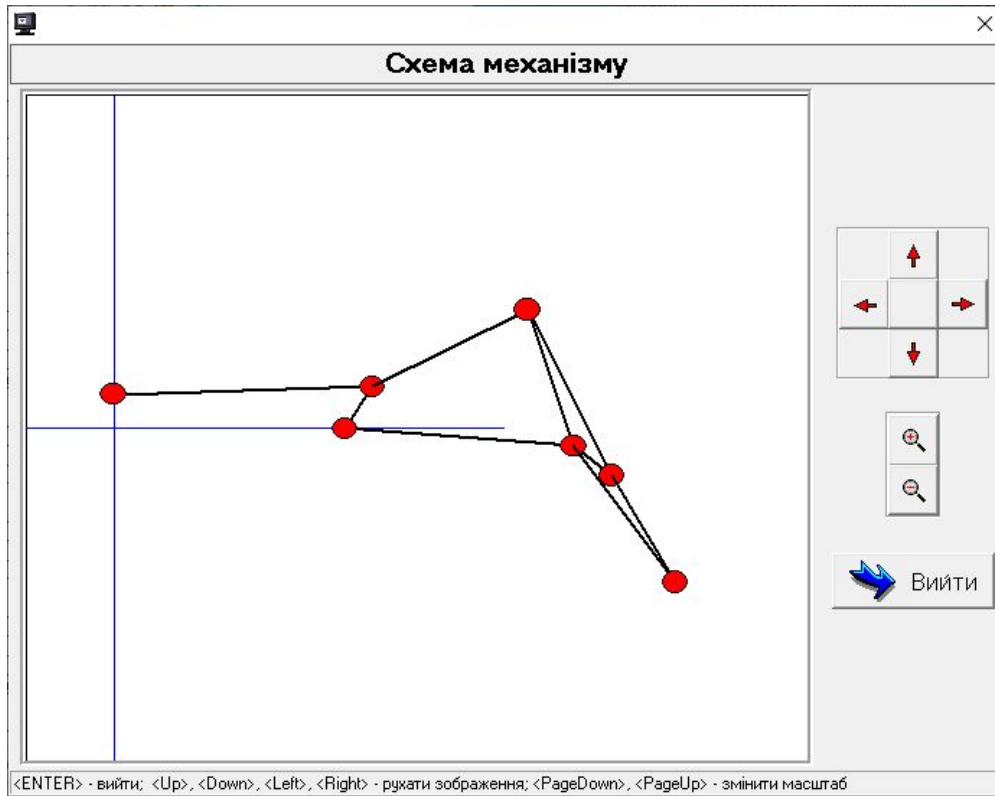


Рис. 4. Вікно перевірки структури механізму та його поточного положення

Ланка	Нахил, град	Номер шарніра	Координата X, м	Координата Y, м	Складова реакцій X, кН	Складова реакцій Y, кН	Результуюча реакцій
1	2,00	1	0,000	0,000	103,554	3,613	103,617
		5	1,988	0,069	-103,554	-3,613	-103,617
2	-4,99	2	0,000	0,000	-103,674	-40,933	111,462
		5	0,208	0,379	103,554	3,613	103,617
		3	1,397	1,070	-25,001	57,747	-103,617
3	-66,59	4	1,751	-0,153	25,125	-44,897	-103,617
		3	0,000	0,000	25,001	-57,747	62,926
4	-42,55	6	0,646	-1,491	-25,001	57,747	-62,926
		4	0,000	0,000	-25,125	44,897	51,449
		6	0,292	-0,268	25,001	-57,747	62,926



 < Записати дані до файлу MS Excel
  Вийти

Рис. 5. Результати розрахунку

Висновки

На основі теорії графів розроблено універсальний підхід, який формалізує, суттєво спрощує й автоматизує створення математичних моделей шарнірно-важільних механізмів робочого обладнання будівельних машин. Так само отримані таким способом моделі дозволяють автоматизувати процес силового розрахунку за різних положень механізму.

Розроблене програмне забезпечення та запропонований авторами порядок презентації даних автоматизує переважну більшість етапів силового розрахунку шарнірно-важільних механізмів, воно може бути застосоване не тільки на стадіях проектування машин, але й для встановлення нових видів змінного обладнання на машини.

У програмі передбачено експорт результатів до окремого файлу, який може викорис-

товуватись іншим ПЗ для вибору гідроциліндрів, насосів, розрахування гідравлічних систем та для аналізу міцності елементів робочого обладнання.

Література

1. Машины для земляных работ: навчальний посібник / Хмара Л. А. та ін.. Рівне – Дніпропетровськ – Харків, 2010. 557 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. Сиротинський О. А. Основи автоматизації проектування машин: навчальний посібник. Рівне: УДУВГП, 2003. 252 с.
5. Zhang B. 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. Real-Time Motion Planning of a Hydraulic Excavator using Trajectory Optimization and Model Predictive Control / Dongjae Lee, Inkyu Jang, Jeonghyun Byun, Hoseong Seo. 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. Ванін В. В., Перевертун Т. О., Надкрянна Т. О. Комп'ютерна інженерна графіка в середовищі AutoCAD. Київ: Каравела, 2005. 336 с.
10. Грабченко А. І., Доброскок В. Л. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей / А. І. Грабченко, В. Л. Доброскок. Харків: НТУ «ХПІ», 2009. 86 с.
11. 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, 30 квіт. 2019 р. Харків: нац. автомоб.-дор. ун-т, 2019. 50 с.
12. 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.

References

1. Mashyny dlia zemlianykh robot / Khmara L. A. ta in. Rivne – Dnipropetrovsk – Kharkiv, 2010. 557 s.
2. Sukach M. K., Horbatiuk Ye. V. Marchenko H. A. Syntez zemleryinoi i dorozhnoi tekhniki: pidruchnyk. Kyiv: Vydavnytstvo Lira-K, 2013. 376 s.
3. Khmara L. A., Dakhno O. O. Inovatsiine teleskopichne roboche obladnannia odnokivshevyykh ekskavatoriv. Dnipro: Litohrad, 2017. 170 s.
4. Syrotynskiy O. A. Osnovy avtomatyziatsii proektuvannia mashyn: navchalnyi posibnyk. Rivne, 2003. 252 s.
5. Zhang B. 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. Real-Time Motion Planning of a Hydraulic Excavator using Trajectory Optimization and Model Predictive Control / Dongjae Lee, Inkyu Jang, Jeonghyun Byun, Hoseong Seo. 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. Vanin V. V., Perevertun V. V., Nadkrynynchna T. O. Kompiuterna inzhenerna hrafika v seredovyshchi AutoCAD. Kyiv: Karavela, 2005. 336 s.
10. Hrabchenko A. I., Dobroskok V. L. Suchasni tekhnolohii materializatsii kompiuternykh modelei. Kharkiv: NTU «KhPI», 2009. 86 s.
11. Vysokovych Ye. V. Avtomatyziatsiia pidboru parametriv bazovoi heometrii ta rozrakhunku robochoho obladnannia odnokivshe-vyykh ekskavatoriv. Zastosuvannia suchasnykh system avtomatyzo-vanoho proektu-vannia v konstruktorskii ta doslidny-tskii praktytsi: naukovi pratsi Vseukra-yinskoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 30 kvit. 2019 r. Kharkiv: Khark. nats. avtomob.-dor. un-t, 2019. 50 s.
12. Vysokovych Ye. V., Koval A. B. Synthesis of basic geometry parameters of excavator working equipment. Bulletin Of Kharkiv National

Automobile And Highway University. 2022.
Issue 99. Pp. 105–110. DOI:
10.30977/BUL.2219-5548.2022.99.0

Високович Євген Вадимович¹, к.т.н., доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, y.vysokovych@ntu.edu.ua, тел. +38 067-753-73-67,

Коваль Андрій Борисович¹, к.т.н., доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, тел. +38 050-024-08-94, a.koval@ntu.edu.ua,

Білякович Микола Олексійович¹, к.т.н., професор кафедри інженерії машин транспортного будівництва, biliakovych.m@gmail.com, тел.: +380505027522.

Орел Олександр Володимирович, к.т.н., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна, oav1980@gmail.com, тел. +38 067-701-98-64.

Automation of machines working equipment calculation using graph theory

Abstract. Problem. The paper presents an example of using a methodology for automated calculation of working equipment for construction machines, which are represented by hinge-lever mechanisms. The approach employed in the methodology is based on graph theory and provides semi-automatic generation of the mechanism's structure description and automatic formation of systems of equations for its static calculation. Based on the methodology, software has been developed that automates the performance of force calculations in arbitrary positions of the mechanism for different loading schemes.

Methodology. To automate the force calculation, an incidence matrix describing the structure of the mechanism is formed and used. **Results.** The developed software not only provides results in numerical form but also generates images of the mechanism's diagram. Additionally, the software includes exporting capabilities for results to a separate file that can

be further used for selecting hydraulic cylinders and pumps, calculating hydraulic systems, and assessing the strength of working equipment components. **Originality.** Certain rules for numbering mechanism links and joints, as well as methods for indicating the coordinates of the joints and points of application of external forces, have been developed. These rules and methods not only ensure the automatic formation and solution of systems of equations for the mechanism's static equilibrium but also automate the construction of the incidence matrix. **Practical value.** The developed software and the data representation method proposed by the authors automate the majority of stages in the force calculation of hinge-lever mechanisms for construction machinery. It can be applied not only in the design stage but also before the use of new types of variable working equipment. **Key words:** hinge-lever mechanism, graph, force calculation, automation, software.

Vysokovych Yevhen¹, Ph.D., Associate Professor, Department of the engineering of transport construction machines, tel. +38 067-753-73-67, y.vysokovych@ntu.edu.ua,

Koval Andrii¹, Ph.D., Associate Professor, Department of the engineering of transport construction machines, tel. +38 050-024-08-94, a.koval@ntu.edu.ua,

Biliakovych Mykola¹, Ph.D., Professor, Department of the engineering of transport construction machines, biliakovych.m@gmail.com, tel. +380505027522.

¹National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka Str. 1, of. 226, Kyiv, 01010, Ukraine.

Orel Oleksandr, Cand. of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Construction And Road Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry Str., Kharkiv, 61002, Ukraine oav1980@gmail.com, tel. +38 067-701-98-64.