

УДК 621.09.04

Аналіз особливостей взаємодії типових рушіїв наземних роботизованих комплексів із ґрунтом та вибір оптимальних рішень

Костюченко І.В., Струтинський С.В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

У роботі розглядаються особливості взаємодії типових рушіїв наземних роботизованих комплексів із ґрунтом. Розглянуто залежності, що характеризують процес взаємодії та обмежуючі фактори, що визначають найбільш оптимальне рішення рушія. Основну увагу приділено аналізу прохідності різних типів рушіїв, включаючи колісні та гусеничні, з метою визначення їх ефективності у подоланні різноманітних типів перешкод, зокрема виступів і сходинок. У роботі проаналізовано переваги та недоліки наявних конструктивних рішень та окреслено шляхи для їх подальшої оптимізації.

Ключові слова: робот; робототехніка; наземний роботизований комплекс; гібридний; рушії; колесо; гусениці; гусеничний привід.

Вступ. Наземні роботизовані комплекси (НРК) відіграють важливу роль у виконанні складних завдань у небезпечних для людини умовах. Вони використовуються в різних сферах, зокрема для розмінування місцевості, при проведенні рятувальних операцій, для дослідження територій, що зазнали впливу стихійних лих або антропогенних факторів. Одним із ключових викликів для НРК є забезпечення високої прохідності та здатності долати різноманітні перешкоди, які можуть виникати на шляху.

Постановка проблеми. Розробка наземних роботизованих комплексів, здатних ефективно переміщуватися у складних дорожніх умовах за наявності перешкод, вимагає ретельного аналізу засобів підвищення прохідності на етапі проектування з метою вибору найбільш оптимального рішення. Однією із ключових задач є вибір схемного рішення рушіїв та конструкції шасі, що безпосередньо впливають на прохідність та маневреність роботизованого комплексу. Традиційні підходи до проектування, що полягають у виборі типового схемного рішення шасі з подальшим його вдосконаленням потребують експериментальних досліджень тестових зразків НРК у польових умовах. Потреба у використанні натурних зразків вимагає значних затрат ресурсів і часу, що робить процес розробки більш дорогим і тривалим.

У зв'язку з цим виникає потреба у математичному моделюванні робочих процесів, які дозволяють симулювати рух шасі та приводів, що входять до його складу у польових умовах. Деталізовані математичні моделі дозволяють враховувати різноманітні параметри, включаючи тип поверхні, кут її нахилу, наявність перешкод та інші фактори, що впливають на прохідність роботизованого комплексу. Використання комп'ютерних симуляцій дає можливість оптимізувати схемне та конструктивне рішення шасі, адаптувати рушії для вирішення конкретних задач та налаштувати їх параметри на початковому етапі проектування, що забезпечує створення адаптивних НРК, що мають вищий рівень прохідності та здатні виконувати поставлені завдання на різноманітній місцевості.

Механізм взаємодії рушія та ґрунту. Однією із базових задач, що має бути вирішена на початковому етапі проектування є дослідження взаємодії рушія із поверхнею по якій переміщується НРК. Найбільш розповсюдженні рішення передбачають використання коліс для руху по місцевості.

Для розроблення комплексної математичної моделі, що описує взаємодію колеса з ґрунтом необхідно математично описати механічні властивості ґрунту, що визначають

параметри взаємодії ґрунту із колесом у процесі протидії руху транспортного засобу. Математична модель ґрунту включає в себе залежності, що визначають напруження і деформації, які виникають під час контакту привода з ґрунтом та є критичними для оцінки стійкості та ефективності руху робота.

Коли поверхня привода контактує з ґрунтом, на нього діють два основні види напружень:

- нормальне напруження:

$$\sigma = \frac{W}{A}; \quad (1)$$

- дотичне напруження:

$$\tau = \frac{T}{A}. \quad (2)$$

де T — це сила зсуву, створена обертанням привода, W — вага транспортного засобу на цьому колесі, A — контактна поверхня між колесом і ґрунтом.

Максимальне дотичне напруження τ лінійно пропорційне до нормального напруження σ , що діє на ґрунт:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi). \quad (3)$$

Кут внутрішнього тертя ϕ і когезія c — це властивості ґрунту, які визначають його опір проти дотичного напруження.

Сила реакції ґрунту моделюється у загальному випадку як нелінійна пружина [3]:

$$P = \frac{W}{A} = k \cdot z^n \quad (4)$$

де P - прикладений тиск, z - глибина стиснення ґрунту, k_c - модуль когезії, k_ϕ - модуль тертя, а n - показник просідання для ґрунту.

Під час руху на привід транспортного засобу діє загальна сила опору, яка є сумою кількох сил, що виникають у процесі взаємодії колеса з ґрунтом та навколишнім середовищем. До основних видів сил, що впливають на рух, належать:

1. Сила опору підйому (гравітації) R_g : Сила, що діє на транспортний засіб під час руху вгору або вниз по схилу.
2. Сила опору коченню R_r , що виникає через деформацію колеса та поверхні при катанні колеса.
3. Сила опору стиснення поверхні R_c , яка протидіє руху через стиснення ґрунту під колесом.
4. Сила опору бульдозування R_b , що виникає при переміщенні ґрунту перед колесом під час руху.
5. Сила опору повітря X_o : Аеродинамічний опір, що виникає при русі транспортного засобу.

Загальна сила опору R векторно визначається як:

$$R = R_g + R_r + R_c + R_b + X_o. \quad (5)$$

Ці силові фактори є важливими для точного моделювання взаємодії колеса і ґрунту. Для забезпечення руху транспортного засобу вперед, привід повинен створити достатню тягову силу, яка перевищує загальну силу опору.

Вибір оптимальних технічних рішень рушіїв. Вибір принципу пересування є важливим етапом що визначає конструктивне рішення та впливає на розрахунок НРК. Для ефективного подолання будь-яких перешкод привід роботизованого комплексу має забезпечити якомога більшу площу контакту з поверхнею. При подоланні перешкоди у вигляді сходинки її геометрія створює зону в якій буде найменша площа контакту. Типове жорстке колесо може ефективно долати такі східчасті перешкоди при умові що їх висота не перевищує 25% від

діаметру колеса [2]. Це накладає конструктивні обмеження на дизайн НРК з традиційними гладкими колесами. За результатами проведеного аналізу пропонується використовувати схемні рішення рушіїв які мають покращенні характеристики прохідності.

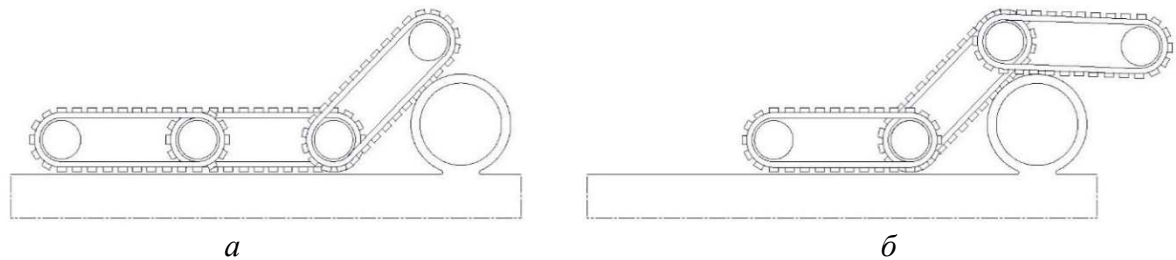


Рис. 1. Трьохсегментний роботизований гусеничний привод

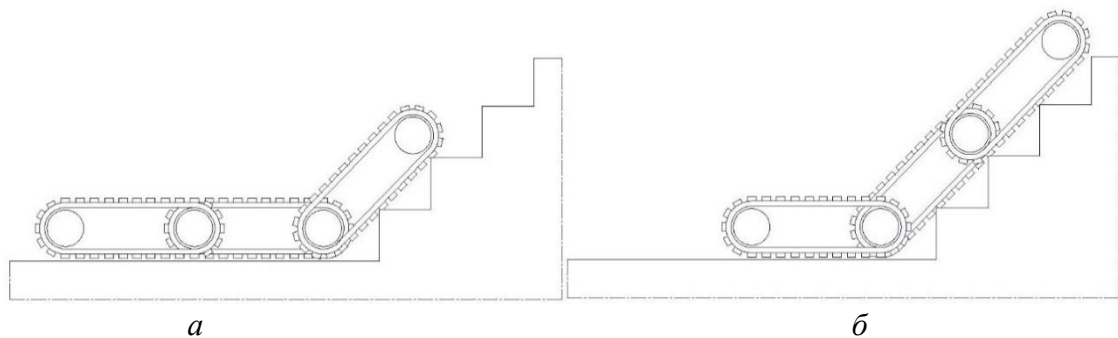


Рис. 2. Трьохсегментний роботизований гусеничний привод

Трьохсегментний роботизований гусеничний привід [1] (рис.1 а, б; рис.2 а, б) забезпечує високу гнучкість завдяки можливості кожного сегмента змінювати кут нахилу відносно інших сегментів. Це дозволяє роботизованому комплексу адаптувати свою форму до складних перешкод, таких як циліндричні об'єкти (наприклад, труби чи стовбури дерев), збільшуючи площу зчеплення з поверхнею, як показано на рис.1а, 1б. Крім того, цей привід ефективно долає вертикальні перешкоди, зокрема сходи (рис.2а, 2б), де кожен сегмент гусениці може підлаштуватися під різні висоти та кути нахилу. Це забезпечує стабільність і ефективність у складних умовах пересіченої місцевості.

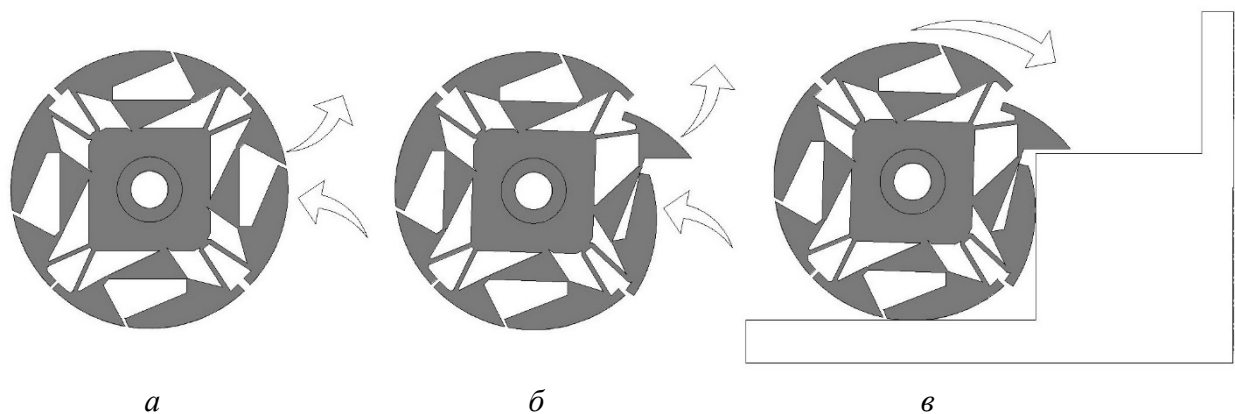


Рис. 3. Колесо PaTS

Колесо PaTS (Passively-Transformable Single-Part Wheel) [2] (рис.3а, 3б, 3в) має значні переваги завдяки здатності пасивно трансформуватися при контакті з перешкодами. Вбудований важільний механізм дозволяє колесу автоматично змінювати форму під час наїзду на перешкоди, як показано на рис.3а, 3б. Це забезпечує колесу додаткове зчеплення, яке

допомагає долати виступи та сходинки з висотою до 70% від діаметра колеса (рис.3в). В той час, як звичайні колеса здатні долати перешкоди висотою до третини свого діаметра, PaTS значно перевершує їх у цьому аспекті. Однак, єдиним недоліком цього рішення є чутливість до кутів нахилу поверхні перешкод, що може негативно вплинути на трансформацію колеса і знизити ефективність зачеплення.

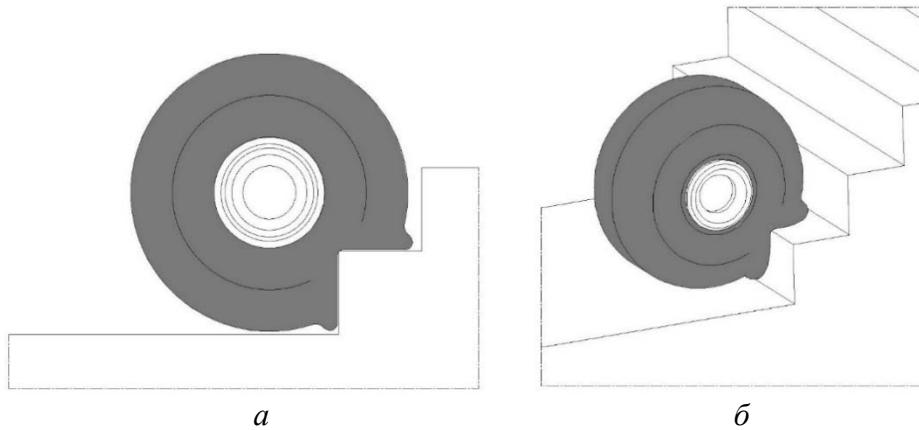


Рис. 3. Пневматичне колесо

Пневматичне колесо (рис.3а, 3б) є типовою конструкцією, що забезпечує високу прохідність завдяки своїй здатності змінювати форму при низькому тиску в шині. Пружна пневматична шина, яка має високий рівень деформації, забезпечує велику площу контакту з поверхнею, що дозволяє колесу ефективно долати сходинки та виступи [4]. Це колесо особливо ефективно при взаємодії з ребром сходинки, де інші приводи можуть мати проблеми з проковзуванням через недостатню площу контакту. Висока деформація пневматичної шини дозволяє колесу краще адаптуватися до нерівностей поверхні, забезпечуючи стабільний рух навіть у складних умовах.

Висновки. Підвищення прохідності є одним з найважливіших напрямків досліджень при проектуванні нових конструкцій НРК. Вирішення даної задачі потребує інноваційних підходів з метою синтезу нових, більш ефективних систем, що дозволять переміщуватися на складній місцевості. Поточні результати дозволять у подальшому детально дослідити роботу прогресивних технічних рішень рушіїв та сформулювати напрямки їх модернізації для адаптації під певні параметри місцевості, по якій переміщується НРК.

Список використаних джерел

1. Pan, H.; Chen, X.; Ren, J.; Chen, B.; Huang, K.; Zhang, H.; Lu, H. "Deep Reinforcement Learning for Flipper Control of Tracked Robots in Urban Rescuing Environments." *Remote Sens.* 2023, 15, 4616. <https://doi.org/10.3390/rs15184616>
2. T. Godden, B. W. Mulvey, E. Redgrave and T. Nanayakkara, "PaTS-Wheel: A Passively-Transformable Single-Part Wheel for Mobile Robot Navigation on Unstructured Terrain" in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9, no. 6, pp. 5512-5519, June 2024, <https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3389828>
3. Akin, L.D., "ENAE 788X Planetary Surface Robotics: Terramechanics part 1," 2020, <https://spacecraft.ssl.umd.edu/academics/788XF20/788XF20L06.terramechanics1x.pdf>
4. J. Y. Wong, *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering: Terrain Behaviour, Off-Road Vehicle Performance and Design*, 3rd ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2010, pp. 384-407.

Analysis of the characteristics of the interaction of typical ground-based robotic systems with the soil and the selection of optimal solutions

Kostiuchenko Ivan, Strutinskiy Serhiy

The paper examines the features of the interaction of typical ground-based robotic systems with the soil. Considered dependencies characterizing the interaction process and limiting factors determining the most optimal propulsion system. The main attention is paid to the analysis of the passability of various types of propulsion systems, including wheeled and tracked ones, in order to determine their effectiveness in overcoming various types of obstacles, in particular ledges and steps. The paper analyzes the advantages and disadvantages of existing constructive solutions and outlines the ways for their further optimization.

Keywords: robot; robotics; unmanned ground vehicle; hybrid; propulsion system; wheel; track.