

УДК 629.35:62-50:004.94

д-р філософії Романенко М. М. ORCID: 0000-0002-0646-2797 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

д-р філософії Погребняк С. В. ORCID: 0000-0002-7902-9847 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

## МОДЕЛЬ ПІДВІСКИ РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ

Тенденції еволюції технологій в сфері роботизованих систем та штучного інтелекту окреслили перспективи та напрямки багатьох аспектів глобального розвитку людства в осяжному майбутньому. Не виключенням стало застосування роботизованих комплексів і у військовій справі. Реалії російсько-української війни показали широкий спектр можливостей застосування роботизованих комплексів. У відповідь на значну перевагу сил російської окупаційної армії в особовому складі, артилерійських системах, бронетехніці та авіації сили оборони України ефективно застосовують роботизовані комплекси різних форм, моделей та специфікацій.

Одним із варіантів застосування роботизованих комплексів, які останнім часом все активніше використовуються на фронті, є наземні роботизовані комплекси в якості багатофункціональних (бойових) платформ на колісній або гусеничній базі. Такі платформи здатні виконувати різноманітні завдання та задачі.

Виходячи з такого широкого спектру завдань які здатні виконувати наземні роботизовані комплекси, можна стверджувати, що в осяжному майбутньому вони зможуть значною мірою замінити людину на полі бою, що дасть змогу зберегти життя та здоров'я військовослужбовця. Проте ефективність їх використання залежить від ряду факторів: зв'язок і навігація, прохідність транспортної платформи, характеристики бойового (спеціалізованого) модуля. Проблематиці, вдосконаленню, оптимізації та моделюванню функціонування саме підвіски транспортної бази і присвячена ця стаття.

Розглянуті варіанти різноманітних діянь на транспортну базу. Визначені основні характеристики, що впливають на підресорну частину транспортної бази. Проведено моделювання зовнішнього впливу профілю дорожнього полотна на підресорну частину транспортної бази. Отримані числові показники збурних діянь та відклик основних елементів підвіски транспортної бази. Запропоновано способи використання результатів роботи в якості керуючого впливу системи автоматичної стабілізації для покращення керованості та прохідності НРК.

**Ключові слова:** транспортна база, платформа, роботизований комплекс, підвіска, профіль поверхні, демпфер, система стабілізації, математична модель.

### **M. Romanenko, S. Pohrebniak. Suspension model of the robotic complex**

Trends in the evolution of technologies in the field of robotic systems and artificial intelligence have outlined the prospects and directions of many aspects of the global development of humanity in the foreseeable future. The use of robotic complexes in military affairs was no exception. The realities of the Russian-Ukrainian war showed a wide range of possibilities for the use of robotic complexes. In response to the significant superiority of the Russian occupation army in personnel, artillery systems, armored vehicles and aviation, the Ukrainian defense forces effectively use robotic complexes of various forms, models and specifications.

One of the options for using robotic complexes, which have recently been increasingly used on the front, is ground robotic complexes as multifunctional (combat) platforms on a wheeled or tracked base. Such platforms are capable of performing a variety of tasks and missions.

Based on such a wide range of tasks that ground robotic complexes are capable of performing, it can be argued that in the foreseeable future they will be able to largely replace humans on the battlefield, which will allow preserving the life and health of a serviceman. However, the effectiveness of their use depends on a number of factors: communication and navigation, the cross-country ability of the transport platform, the characteristics of the combat (specialized) module. This article is devoted to the problems, improvement, optimization and modeling of the functioning of the suspension of the transport base.

Variants of bison actions on the transport base are considered. The main characteristics that affect the under-spring part of the transport base are determined. The modeling of the external influence of the roadbed profile on the under-spring part of the transport base is carried out. Numerical indicators of turbulent actions and the response of the main elements of the transport base suspension are obtained. Methods of using the results of the work as a control effect of the automatic stabilization system to improve the controllability and patency of the NRC are proposed.

**Keywords:** transport base, platform, robotic complex, suspension, surface profile, damper, stabilization system, mathematical model.

### **Постановка завдання у загальному вигляді**

Наземні роботизовані комплекси (НРК) являють собою рухому платформу на колісному або гусеничному шасі. До складу такої системи входять: пристрій відеоспостереження, блок

керування та система зв'язку і навігації. Залежно від завдань, що вирішуються, на платформу може бути встановлено додаткове обладнання:

- роботизований маніпулятор (для мінування/розмінування);
- модуль для транспортування (для завдань логістики);
- ноші або захищений короб (для транспортування поранених);
- системи та пристрої спостереження (для завдань розвідки);
- вогневі засоби ураження (для виконання завдань ураження противника).

В будь-якому випадку, основою для РНК є уніфікована транспортна платформа.

Враховуючи стрімкий розвиток роботизованих технологій та мультизадачність РНК, постає питання вибору транспортної бази, яка б задовольняла визначеним задачам.

#### **Аналіз останніх публікацій**

З метою порівняння тактико-технічних характеристик здійснено аналіз публікацій останніх років, що стосуються існуючих роботизованих наземних комплексів. Він не дає однозначної відповіді на питання яка транспортна база є кращою чи оптимальнішою [1–3].

Технологічно розвинені країни такі як США, Великобританія, Франція, Ізраїль, Китай, Японія та ряд інших займаються розробкою випробуваннями та практичним застосуванням роботів на державному рівні [4]. Здійснюються дослідження в напрямку покращення прохідності та керованості НРК. Це реалізується двома головними способами: покращенням існуючих платформ та розробкою нових (інколи нетипових або інноваційних) транспортних платформ.

Оцінка ефективності застосування різних типів транспортної бази дуже різниться. Залежно від висунутих вимог та практичних рішень, кожен вид має ряд своїх переваг та недоліків [5].

Вивчені літературні джерела [6–8] приводять приклади конструктивних рішень побудови транспортної бази наземних роботизованих комплексів. До прикладу, представлені різновиди схем підресорних частин та електродвигунів. Розглянуті переваги використання голчатих підшипників, практичні варіанти використання амортизаторів, торсіонів та поперечних важелів. Запропоновані оригінальні конструктивні рішення з'єднань електроприводів, редукторів та шарнірів. В багатьох випадках пропонується застосування, планетарних, хвильових та циклоїдальних редукторів та високооборотних малогабаритних сервоприводів. Наведені схемотехнічні рішення не відрізняються від традиційних деталей автомобілів та іншої техніки. Разом з тим присутні інноваційні рішення щодо використання оригінальних запчастин та нетипового використання відомих технологічних рішень, застосування наноматеріалів та новітніх сполук металів чи полімерів в якості основ для виробництва. Зазвичай такі дані (інноваційні рішення чи матеріали виготовлення конструкцій) є частковими та потребують додаткового вивчення.

В роботах [9; 10] наведено класифікацію та узагальнені вимоги до РНК, проведена коротка оцінка ефективності застосування наземних роботизованих комплексів вітчизняного виробництва у збройних конфліктах, їхньої ролі на полі бою та проаналізовано розвиток наземних роботизованих комплексів.

Аналіз основних характеристик, відомих НРК, різних класів виявив недоліки конструкцій та невідповідність цих характеристик вимогам, що висуваються до них у сучасних умовах. Це підтверджує актуальність досліджень щодо моделювань впливу навколишніх умов на шасі наземних роботизованих комплексів, раціонального вибору типу транспортної платформи та розробки перспективних зразків наземних роботизованих комплексів.

**Мета статті** полягає в розробці математичної моделі взаємодії підвіски транспортної бази та зовнішнього чинника – профілю поверхні дорожнього полотна. Отримана модель надасть змогу розраховувати чисельні значення впливу та оцінити ефективність підвіски транспортної бази РНК.

**Виклад основного матеріалу.** Оцінка функціональної ефективності типів транспортної бази ґрунтується на порівнянні переваг та недоліків двох найрозповсюдженіших типів: колісного та гусеничного шасі.

Перевагами гусеничного виду є вища прохідність (в порівнянні з колісним шасі) та можливість встановлення диференціальних механізмів синхронної зміни величини кліренсу і геометрії гусеничних обводів, що включає в себе, як правило, два бортових синхронізатора, які встановлені вздовж бортів корпусу гусеничного шасі всередині гусеничних обводів.

Недоліком є низька надійність та складність обслуговування.

Перевагами колісної платформи є більша надійність (в порівнянні з гусеничним шасі) та висока ремонтопридатність. Недолік недостатня прохідність.

Однак обидва типи підвіски зазнають впливу при русі по поверхнях різного виду. Характерними умовами є різноманітні типи доріг, пересічена місцевість, пересування у приміщеннях та подолання перешкод. Значна відмінність поверхонь по яких відбувається пересування ускладнює дослідження їх впливу на транспорту базу. Таким чином актуальним є застосування методів математичного моделювання для дослідження впливу дорожніх умов на характеристики транспортної платформи.

З метою розрахунку впливу різних умов на ефективність НРК використовують експериментальні та розрахункові методи [11]. Найбільш ефективним та раціональним методом дослідження впливу таких умов на особливості функціонування наземних роботизованих комплексів є математичне моделювання. Воно дозволяє проводити розрахунки з урахуванням жорстких умов навколишнього середовища, дорожніх умов та факторів зовнішнього впливу на підвіску таких як вплив вогневого засобу встановленого на РНК. Здатність наземних роботизованих комплексів рухатись різними типами поверхні характеризується їх прохідністю [12].

Основні параметри профільної прохідності визначаються з компоувальної схеми транспортної платформи та безпосередніми вимірюваннями наступних характеристик:

- дорожній просвіт (кліренс) –  $(h)$ ;
- передній та задній звиси –  $(l_1, l_2)$ ;
- кути переднього та заднього звисів –  $(\gamma_1, \gamma_2)$ ;
- повздовжній та поперечний радіуси прохідності –  $(R_1, R_2)$ ;
- найбільший кут підйому –  $(\alpha)$ .

Отже врахування саме цих характеристик необхідне для розрахунку та моделювання впливу на підвіску транспортної бази. Також конструктивні особливості будови транспортної бази визначають характеристики контакту опорних частин шасі з нерівностями дороги, а отже і теоретичну модель впливу дорожнього полотна на транспортний засіб. На рисунку 1 представлена узагальнена класифікація нерівностей поверхні за основними характеристиками.

За характером нерівностей поверхні умовно розподіляються на дві групи: квазістаціонарні умови, за своїм характером наближені до прямолінійного профілю з незначними плавними в часі змінами висоти профілю поверхні; умови пересічної місцевості із стрімко змінними ступінчастими або різко нахиленими змінами параметрів (пересування НРК через завали, воронки, окопи чи траншеї, апарелі та ескарпи, виступи та круті схили таке інше). Пересування такими дорожніми умовами обумовлюється особливістю: наявністю періодичного або постійного контакту ходової частини транспортної бази із поверхнею дорожнього полотна.

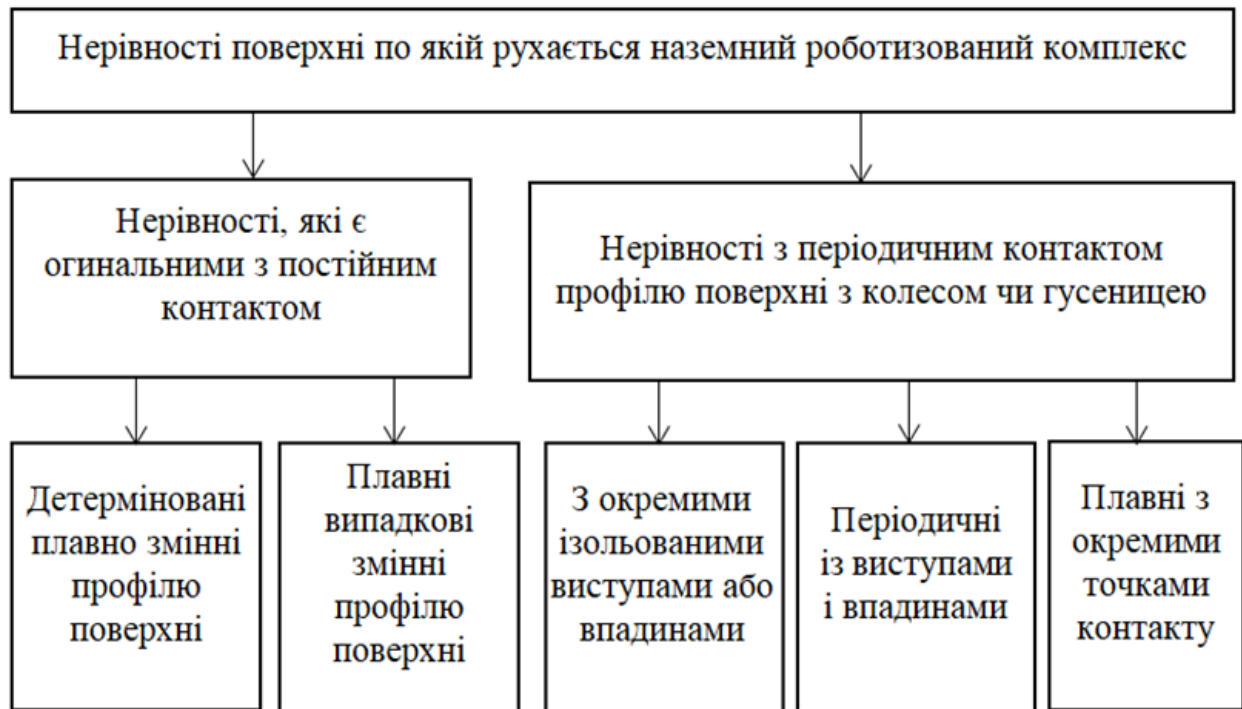


Рис. 1. Класифікація характеристики профілю поверхні за фактом наявності неперервного чи точкового контакту з колесом чи гусеницею

Точковий контакт відображає відгук взаємодії полотна поверхні по якій рухається НРК та квазіциліндричній поверхні колеса, або гусениці. Функція зміни профілю дороги від часу  $Z_{(x)}(t)$  за довжиною ординати, має характерний опис зміни місця перебування квазіциліндричної поверхні підресорної частини транспортної бази у вертикальній площині та її значення екстремумам відповідає кліренсу  $h$ . Тоді  $h=h(Z)$ . Ця залежність незначно змінюється за рахунок пружної деформації квазіциліндричної поверхні та торсіонно-амортизаційного вузла транспортної бази у відповідності до опорної реакції  $b_k$ . Враховуючи вищевикладене, доходимо висновку, що профіль полотна дороги однозначно і всебічно відображає характер взаємодії транспортної бази і місцевості, якою він пересувається.

Більшість існуючих та перспективних НРК відносяться до середнього класу. Вони мають незначні масогабаритні розміри (по відношенню до можливих перешкод). Такі НРК, як правило, використовуються на відкритій місцевості, що зменшує ймовірність наявності різких ступінчатих перешкод які б мали співвідношення висоти “сходинок” до кліренсу 1:1.

На рисунку 2 зображено розрахунок плавних змінних в часі (по осі ординат) профілів поверхні з квазіперіодичним точковим контактом, відносно шасі, вбачається основним напрямком для розрахунку математичної моделі.

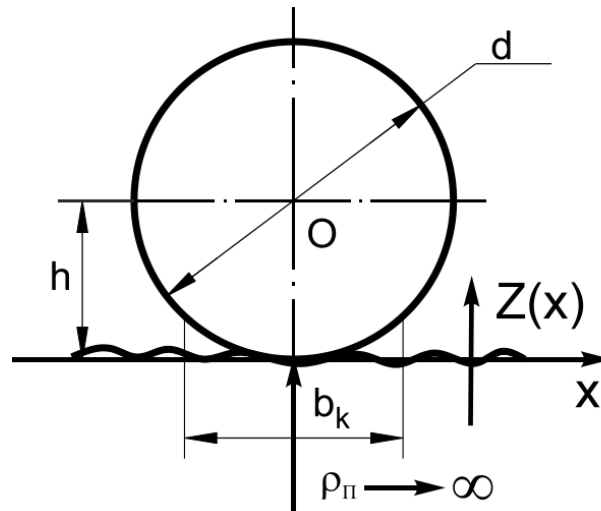


Рис. 2. Схема відгуку положення колеса залежно від характеру контакту з дорожнім покриттям

Плавні зміни профілю окремої колії можуть бути описані як у вигляді детермінованих функцій, так і у формі випадкових процесів. Тому при моделюванні впливу дорожніх умов першої групи використовуються як детерміновані, так і стохастичні моделі профілю колії. У разі детермінованого підходу геометрія колії подається у вигляді часткового ряду Фур'є [13]:

$$Z(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_0 x) + b_k \sin(k\omega_0 x),$$

де  $Z$  – наявна висота поверхні дороги в зазначеній точці з координатою  $x$ ;

$a_0, a_k, b_k$  – коефіцієнти ряду Фур'є;

$\omega_0$  – параметр, періоду зміни висоти полотна поверхні.

Коефіцієнти, які визначають співвідношення із профілем дороги  $Z(x)$ :

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T z(\tau) \cos(k\omega_0 \tau) d\tau, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T z(\tau) \sin(k\omega_0 \tau) d\tau.$$

Математичний опис профілю поверхні по якій відбувається рух здійснено полігармонічною функцією:

$$z(x) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \sin(k\omega_0 x + \psi_{0k}), \quad (1)$$

де  $A_k$  – амплітуда складових гармонік профіля поверхні;

$\psi_{0k}$  – початкова фаза складових гармонік профіля поверхні.

Визначення цих коефіцієнтів здійснюється через коефіцієнти ряду Фур'є [13]:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \psi_{0k} = \arctg \frac{b_k}{a_k}.$$

Застосування математичної залежності (1) дозволяє представити форму профілю поверхні у вигляді певного набору періодичних функцій. Одночасно з цим дає можливість

врахувати параметри, які визначають її основні характеристики (особливості) та описати параметри схожих поверхонь для побудови моделі відклику підресорної частини транспортних засобів, що будуть рухатись по ній.

Однак, при використанні рядів Фур'є для розрахунку детермінованих профілів поверхні, можуть траплятися випадки розрахунку нескінченних рядів (викликано некоректною постановкою задачі). Для вирішення таких задач за розрахунком детермінованих та (або) квазіперіодичних профілів поверхні пропонується введення коректуючого форм-фактора.

Слід також зауважити, що при фронтальному контакті колеса транспортної бази НРК з перешкодою, яка перевищує радіус колеса, виникає збурне діяння на всю підресорну частину. Величина миттєвого значення цього збурного діяння залежатиме від швидкості руху та вектора:

$$Z(x) = h[1(x) - z(x - x_1)], \quad (2)$$

де  $h$  – висота перешкоди;

$x_1$  – протяжність (довжина) перешкоди.

Таким чином, вирішення поставленого в роботі завдання зводиться до комплексного врахування множин варіантів збурних діянь (1) та (2) на підвіску НРК.

Для розрахунку опорного зміщення профілю дороги застосуємо вираз [14]:

$$y_r(t) = A * \sin(2\pi\lambda vt + \varphi) * \exp(-\alpha r \lambda), \quad (3)$$

де  $A$  – амплітуда коливань;

$v$  – швидкість;

$t$  – час;

$r$  – відстань;

$\alpha$  – коефіцієнт загасання.

Синусоїдальна функція представляє собою збурне діяння, від профілю дороги, а експоненціальна складова додає згасання або затухання під час пересування вздовж нього.

Для опису системи на яку впливають сили інерції  $m \cdot \ddot{y}(t)$ , сили демпфування  $(\dot{y}(t) - \dot{y} \cdot r(t))$  та сили пружності  $k \cdot (y(t) - y \cdot r(t))$  застосуємо вираз (4).

Сили демпфування та пружини діють так, щоб привести переміщення системи  $y(t)$  до еталонного переміщення  $\dot{y} \cdot r(t)$ :

$$m \cdot y''(t) + c \cdot (y'(t) - y' \cdot r(t)) + k \cdot (y(t) - y \cdot r(t)) = 0, \quad (4)$$

де  $m$  – маса;

$y''(t)$  – друга похідна  $y(t)$  відносно часу (прискорення);

$c$  – коефіцієнт демпфування;

$y'(t)$  – перша похідна  $y(t)$  відносно часу (швидкості);

$y \cdot r'(t)$  – перша похідна  $y \cdot r(t)$  відносно часу (швидкості опорного переміщення);

$k$  – коефіцієнт жорсткості;

$y(t)$  – переміщення системи.

З метою вирішення цих завдань запропоновано використання програмного забезпечення “Mathematica”. Перевірку та підтвердження адекватності отриманих результатів здійснено засобами вебплатформи “Github”.

Фрагмент програмного коду математичного моделювання наведено нижче:

```
\begin{cases}
y_r(t) = A \cdot \sin(2\pi \lambda v t + \phi) \cdot \exp(-\alpha r \lambda) \\
m \cdot \ddot{y}(t) + c \cdot \left( \dot{y}(t) - \dot{y}_r(t) \right) + k \cdot \left( y(t) - y_r(t) \right) = 0
\end{cases}
```

Графічне відображення перекосу транспортної бази НРК, під час руху по двох коліях з різним профілем на та результуючими силами, що діють на НРК зображено на рисунку 3.

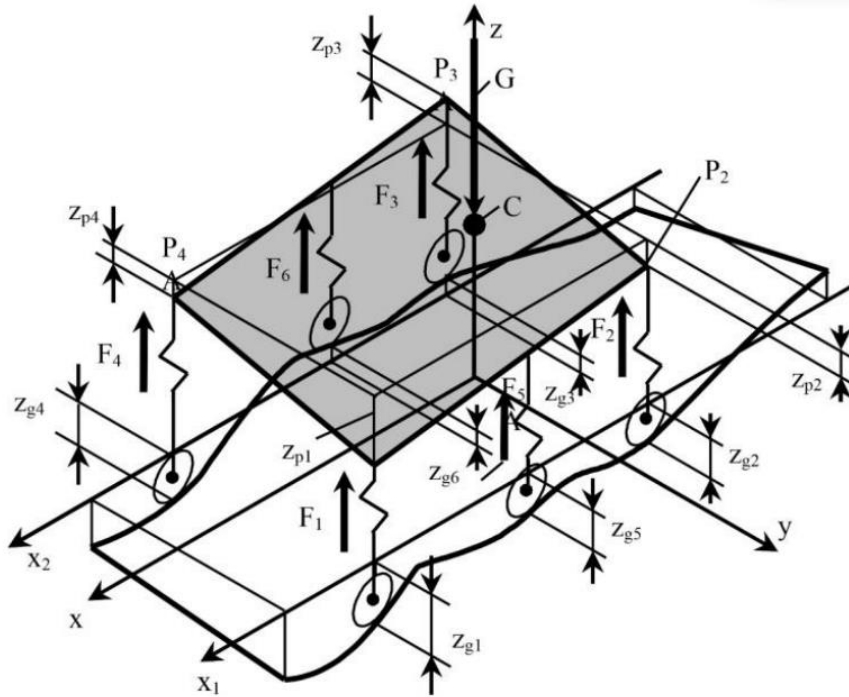


Рис. 3 Перекіс транспортної бази НРК при русі по пересічній місцевості

На рисунку 3 позначено:

$Z_{g1} \dots Z_{g6}$  – результуючі сили які впливають на підресорну частину платформи НРК;

$Z_{p1} \dots Z_{p6}$  – результуючі відхилення (крен, тангаж) платформи;

$X_1, X_2$ , – прямолінійний напрям руху платформи;

$C$  – результуюча сила демпфірування;

$F_1 \dots F_6$  – результуючі сили, які діють безпосередньо на платформу НРК.

### Висновки і перспективи подальших досліджень

В роботі наведено математична модель розрахунку впливу профілю поверхні дорожнього покриття на підресорну частину НРК. Розрахунок дає можливість не лише оцінити (визначити чисельні значення) зовнішнього впливу, але й використовувати ці результати як керуючий вплив системи автоматичної стабілізації.

Подальшим розвитком роботи можливо вважати покращення керованості та прохідності НРК. Все це дає змогу підвищити бойову ефективність НРК. Водночас, наведені результати можуть братись до уваги при проектуванні, розробці та виготовленні нових роботизованих платформ, або нетипових транспортних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Anis Koubaa. Robot Opereting System. Berlin: Springer, 2019. P. 16.
2. Коваль В., Семененко О., Баранов С., Островський С., Акініна Т., Сеченев О. Роль і місце роботизованих систем у сучасних війнах і збройних конфліктах: теоретичний аспект // Journal of Scientific Papers «Social Development and Security». 2023. Vol. 13. № 5.
3. Кириченко І. В. Наземні роботизовані комплекси: основи та майбутнє // Молодий вчений. 2021. № 12 (100).
4. Ісакова Т. О. Проблеми формування стратегічних пріоритетів державної політики щодо розвитку робототехніки: перспективи для України / Т. О. Ісакова // Офіційний сайт Нац. Ін-ту стратегічних досліджень від 13.09.2019. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/informaciynistrategii/problemi-formuvannya-strategichnikh-prioritetiv-derzhavnoi>.
5. Кучеров Д. П. Перспективи розвитку роботизованих систем військового призначення / Д. П. Кучеров, З. М. Копилова, Ю. В. М'якухін // Системи озброєння і військова техніка. 2007. Вип. 1 (9). С. 44–46.
6. Чепков І. Б., Григор'єв О. П., Беліков В. Т., Ковалішин С. С. Класифікація бойових наземних робототехнічних комплексів – дієвий шлях до з'ясування цієї категорії озброєння // Наука і оборона. 2017. № 3/4.
7. Сердюк О. Залізні воїни майбутнього. Тренди ринку бойових роботів / Олексій Сердюк // URL: [https://zbroya.info/uk/blog/11902\\_zalizni-voyini-maibutnogo-trendirinku-boiovikh-robotiv/](https://zbroya.info/uk/blog/11902_zalizni-voyini-maibutnogo-trendirinku-boiovikh-robotiv/).
8. Семененко О., Баранов С., Акініна Т., Добровольський Ю., Ярмольчик М., Мусієнко В. Концептуальні погляди щодо розвитку та застосування роботизованих систем в ЗС України (концепція, завдання, класифікація, система управління, виклики щодо застосування, перспективи) // Journal of Scientific Papers «Social Development and Security». 2023. Vol. 13. № 3.
9. Прохорський С. І., Андрущенко В. М., Бондаренко О. Є., Сергієнко А. В., Бригадир С. П., Гетьман А. В. Вплив наземних роботизованих комплексів вітчизняного виробництва на перебіг подій у збройних конфліктах та їх розвиток // Вісник Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут. Комунікаційні та інформаційні системи. Випуск 1 (5). Київ: ВІТІ, 2024. 104 с.
10. Слюсар В. І. Мінімальні вимоги до спроможностей як складова концепції розвитку наземних роботизованих комплексів / В. І. Слюсар // Науково-практична конференція «Актуальні проблеми застосування Збройних Сил України, управління ними, їх оперативного та матеріально технічного забезпечення». 17–18 вересня 2019 р. ЦНДІ ЗСУ. URL: [https://slyusar.kiev.ua/CNDI\\_2019\\_1.pdf](https://slyusar.kiev.ua/CNDI_2019_1.pdf).
11. Strutinsky V. B. Determination of development grounds and characteristics of mobile multi-coordinate robotic machines for materials machining in field conditions / V. B. Strutinsky, A. A. Hurzhii, O. V. Kolot, V. E. Polunichev // Науковий вісник Національного гірничого університету. Науково-технічний журнал. 2016. № 5 (155). С.43–51.
12. Аржаєв Г. О. Визначення складової сили тяги рушія, що обумовлена зовнішнім тертям виступів рисунка протектора пневматичної шини / Г. О. Аржаєв, Л. Є. Пелевін, М. М. Балака // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. 2008. Вип. 5 (52). Ч. 2. С. 75–79.
13. Мэнли Р. Анализ и обработка записей колебаний / Р. Мэнли. М.: Машиностроение, 1972. 368 с.
14. Чихладзе Е. Д. Динамічні розрахунки конструкцій: підручник / Е. Д. Чихладзе, С. Ю. Берестянська, І. М. Лисяков. Харків: УкрДУЗТ, 2015. 161 с.