

ТКАЧУК АНДРІЙ

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-2466-6299>e-mail: [aikt\\_tag@ztu.edu.ua](mailto:aikt_tag@ztu.edu.ua)

ГРОМОВИЙ ОЛЕКСІЙ

Державний університет «Житомирська політехніка»

e-mail: [agromovoy@ukr.net](mailto:agromovoy@ukr.net)

БЕЗВЕСІЛЬНА ОЛЕНА

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-6951-1242>e-mail: [o.bezvesilna@gmail.com](mailto:o.bezvesilna@gmail.com)

БОНДАРЧУК ВАСИЛЬ

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-2793-8720>e-mail: [kvm\\_bvm@ztu.edu.ua](mailto:kvm_bvm@ztu.edu.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ НА УДАРНІ НАВАНТАЖЕННЯ МОБІЛЬНОЇ ГУСЕНИЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ІЗ АВТОНОМНОЮ СИСТЕМОЮ СТАБІЛІЗАЦІЇ

У роботі наведено розроблену 3D модель мобільної роботизованої платформи з автономною системою стабілізації для проведення розвідувальних операцій. Проведено дослідження на ударні навантаження мобільної гусеничної платформи із автономною системою стабілізації та описано отримані результати.

Ключові слова: робототехніка, мобільна платформа, стабілізація, ударні навантаження, 3D модель, розвідка, моделювання.

TKACHUK ANDRII, GROMOVYI OLEKSIY

State University «Zhytomyr Polytechnic»

BEZVESILNA OLENA

NTUU «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky»

BONDARCHUK VASIL

State University «Zhytomyr Polytechnic»

## RESEARCH ON IMPACT LOADING OF A MOBILE TRACKED PLATFORM WITH AN AUTONOMOUS STABILIZATION SYSTEM

The work presents a developed 3D model of a mobile robotic platform with an autonomous stabilization system for reconnaissance operations. Mobile robotic platforms have been found to be widely used in intelligence because they can help gather information from dangerous and hard-to-reach places and reduce the risk to the lives of intelligence personnel. Unmanned aerial vehicles and mobile robotic platforms with tracks are mainly used in reconnaissance. An important distinguishing quality of tracked mobile robots is their maneuverability. Having an independent drive for each of the tracks separately, the mobile robot can easily change the direction of its own movement. A study on shock loads (external influences on the system that can cause deformation, damage or destruction) of a mobile tracked platform with an autonomous stabilization system was conducted and the obtained results were described. The SOLIDWORKS software environment was used to model the design of the mobile platform. For numerical studies on impact loads, it is advisable to use linear elastic isotropic materials and bilinear Mises plastic materials. The results of the simulation of the movement of the mobile platform of the developed structure and the stresses in the collision with different speeds of 1, 5, 10, 25 m/s and the platform material carbon steel and rubber are presented. It was established that when a mobile platform collides with speeds of up to 25 m/s, the maximum stresses do not exceed 1.85 MPa, which gives a sufficient margin of strength in the event of impact loads for the selected material of the mobile platform. The use of steel inserts allows you to reduce the value of the maximum contact stresses under impact load, but increases the cost of the mobile platform, increases the total weight and, accordingly, reduces the operating time from the installed power batteries.

Keywords robotics, mobile platform, stabilization, shock loads, 3D model, reconnaissance, modeling.

### Постановка проблеми

Мобільні роботизовані платформи – це автономні пристрої, що складаються з механічних, електричних та електронних компонентів, що дозволяють їм переміщуватись по землі, поверхні води або в повітрі. Ці платформи можуть бути використані в різноманітних галузях, включаючи промисловість, медицину, дослідження та розвідку, а також військові застосування. Наприклад, мобільні роботизовані платформи можуть використовуватись у виробничому середовищі для автоматизації процесів та зниження витрат на працю. У медицині вони можуть бути використані для транспортування медичних інструментів та обладнання або для надання допомоги хворим. У дослідницькій сфері вони можуть використовуватись для дослідження складних середовищ, наприклад, для дослідження морського дна чи космосу.

Оскільки мобільні роботизовані платформи можуть працювати автономно, вони забезпечують високу ефективність та точність роботи, а також знижують ризик людських помилок та нещасних випадків на робочому місці. Вони також можуть бути дистанційно керовані, що дозволяє їх використовувати в умовах, коли пряма людська присутність небезпечна або неможлива.

Мобільні роботизовані платформи широко використовуються в розвідці, оскільки вони можуть допомогти збирати інформацію з небезпечних та важкодоступних місць, а також зменшити ризик для життя людей, що займаються розвідкою. В основному в розвідці використовуються БПЛА та мобільні

роботизовані платформи з колесами або гусеницями. Ці платформи зазвичай складаються з базової платформи з колесами або гусеницями, на якій розміщені різні сенсори, виконавчі механізми та системи керування. Вони можуть бути обладнані камерами, лазерними сканерами, радарями, мікрофонами та іншими сенсорами, що дозволяють їм збирати інформацію про оточуюче середовище.

Важлива відмінна якість гусеничних мобільних роботів полягає в їх маневреності. Володіючи незалежним приводом для кожної з гусениць окремо, мобільний робот може легко змінювати напрямок власного руху. Завдяки тому, що швидкість кожної з гусениць регулюється окремо, досить легко управляти рухом мобільного робота. Для завдання будь-якого напрямку руху необхідно змінити відносну швидкість приводів. Гусеничні роботи є найбільш ефективними внаслідок більш високих можливостей в плані подолання перешкод.

#### Аналіз останніх джерел

Сьогодні існує багато досліджень спрямованих на розробку систем спостереження на базі мобільних платформ (літальних, плаваючих, колісних тощо).

У роботах [1, 2] описано стан і перспективи розвитку самохідних дистанційно-керованих розвідувальних машини для потреб Збройних Сил України, вказано їх недоліки.

У статтях [3, 4] описано стан і перспективи розвитку роботизованих дистанційно-керованих мобільних платформ, які можуть використовуватись як у військових, так і цивільних цілях.

У публікації [5] описано метод визначення кутової швидкості за допомогою MEMS-гіроскопа, принцип роботи якого подібний до «ефекту Sagnac». Запропоновано методи підвищення точності даного чутливого елемента.

У роботах [6–8] описано новий чутливий елемент системи стабілізації озброєння легкої броньованої техніки, який може використовуватись і для системи стабілізації оптичних пристроїв для розвідувальних операцій.

**Метою роботи** є проведення дослідження на ударні навантаження мобільної гусеничної платформи із автономною системою стабілізації.

**Виклад основного матеріалу.** Науковцями Державного університету «Житомирська політехніка» розроблено мобільну роботизовану платформу для проведення розвідувальних операцій (рис. 1) [9]. Мобільна роботизована платформа побудована на базі малощумного гусеничного шасі. Гусениці платформи зроблені з інженерного пластика, який забезпечує відмінну еластичність, чудовий демпфуючий ефект і високе зчеплення шасі з дорогою. На шасі розміщені аналогова камера нічного бачення та тепловізор. Обидва оптичні сенсори закріплені на спеціалізованій рухомій башті з власною системою стабілізації. Для моделювання конструкції мобільної платформи було використано програмне середовище SOLIDWORKS.



Рис. 1. 3-D модель мобільної гусеничної платформи зі встановленою системою спостереження та автономною стабілізацією

Для спрощення процесу конструювання та виготовлення прототипу було вирішено використовувати технологію 3D друку. Такий метод проектування потребує значно менших затрат часу та коштів в порівнянні з іншими методами. Найбільш зручним матеріалом для 3D друку є PLA пластик, він виділяється міцністю, порівняно низькою температурою плавлення і малою токсичністю.

Даний робот не призначений безпосередньо для виконання польових військових задач. Дана модель спроектована для відпрацювання алгоритмів та тестування програмного забезпечення мобільного робота.

Спроектоване шасі роботизованої гусеничної платформи (рис. 2) обрано також із аналізу існуючих варіантів гусеничних платформ. Дана конструкція має найбільшу маневреність та прохідність.

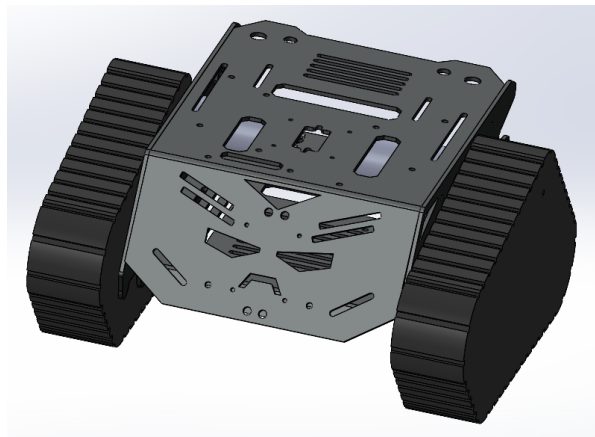


Рис. 2. 3-D модель шасі мобільної гусеничної платформи

Проведемо дослідження на ударні навантаження для мобільної платформи в програмному середовищі Solidworks Simulation. Ударні навантаження – це зовнішні впливи на систему, що можуть викликати деформацію, пошкодження або руйнування. Удари можуть бути викликані взаємодією з іншими об'єктами, наприклад, коли мобільна гусенична платформа зіткнеться з перешкодою на своєму шляху. Дослідження ударних навантажень на мобільних гусеничних платформах можуть бути корисними для покращення дизайну та створення більш стійких та безпечних систем. Вивчення впливу різних факторів, таких як швидкість руху, маса платформи та характер перешкоди, можуть допомогти визначити оптимальні параметри для роботи мобільної гусеничної платформи в умовах з великим ризиком ударних навантажень.

Для чисельних досліджень на ударні навантаження доцільно використовувати лінійні пружні ізотропні матеріали та білінійні пластичні по Мізесу.

На відміну від матеріалів з лінійною пружністю, пластичні по Мізесу матеріали можуть зазнавати залишкової деформації внаслідок удару.

У властивостях дослідження зазвичай використовують постановку задач для малого чи великого переміщення. Однак, за замовчуванням використовується постановка задачі для великого переміщення (нелінійне рішення) для всіх досліджень. Якщо всі матеріали є лінійно-пружними є можливість задавати малі переміщення. Якщо в моделі є пластичні по Мізесу матеріали, завжди використовується задачі для великих переміщень. Рішення з великим переміщенням дозволяє отримати більш точні результати.

Матеріалами корпусних деталей досліджуваної мобільної платформи є вуглецева сталь та гума (лінійні пружні ізотропні матеріали). Їх фізико-механічні властивості представлені на рис. 3 та рис. 4.

Material properties  
Materials in the default library can not be edited. You must create a custom library to edit it.

Model Type: Linear Elastic Isotropic  
Units: SI - N/m<sup>2</sup> (Pa)  
Category: Steel  
Name: Plain Carbon Steel  
Default failure criterion: Max von Mises Stress  
Sustainability: Defined

| Property                      | Value     | Units             |
|-------------------------------|-----------|-------------------|
| Elastic Modulus               | 2.1e+11   | N/m <sup>2</sup>  |
| Poisson's Ratio               | 0.28      | N/A               |
| Shear Modulus                 | 7.9e+10   | N/m <sup>2</sup>  |
| Mass Density                  | 7800      | kg/m <sup>3</sup> |
| Tensile Strength              | 399826000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Compressive Strength          |           | N/m <sup>2</sup>  |
| Yield Strength                | 220594000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Thermal Expansion Coefficient | 1.3e-05   | /K                |

Рис. 3. Фізико-механічні властивості вуглецевої сталі

Material properties  
Materials in the default library can not be edited. You must create a custom library to edit it.

Model Type: Linear Elastic Isotropic  
Units: SI - N/m<sup>2</sup> (Pa)  
Category: Other Non-metals  
Name: Rubber  
Default failure criterion: Unknown  
Sustainability: Defined

| Property                      | Value    | Units             |
|-------------------------------|----------|-------------------|
| Elastic Modulus               | 6100000  | N/m <sup>2</sup>  |
| Poisson's Ratio               | 0.49     | N/A               |
| Shear Modulus                 | 2900000  | N/m <sup>2</sup>  |
| Mass Density                  | 1000     | kg/m <sup>3</sup> |
| Tensile Strength              | 13787100 | N/m <sup>2</sup>  |
| Compressive Strength          |          | N/m <sup>2</sup>  |
| Yield Strength                | 9237370  | N/m <sup>2</sup>  |
| Thermal Expansion Coefficient | 0.00067  | /K                |

Рис. 4. Фізико-механічні властивості гумових траків платформи

Дослідження на ударне навантаження в SolidWorks Simulation (рис. 5) призначені для визначення впливу удару деталі або зборки об жорстку або гнучку плоску поверхню.

Задамо для мобільної платформи напрямок руху, швидкість та орієнтацію площини зіткнення. Параметри моделювання представлені на рис. 6.

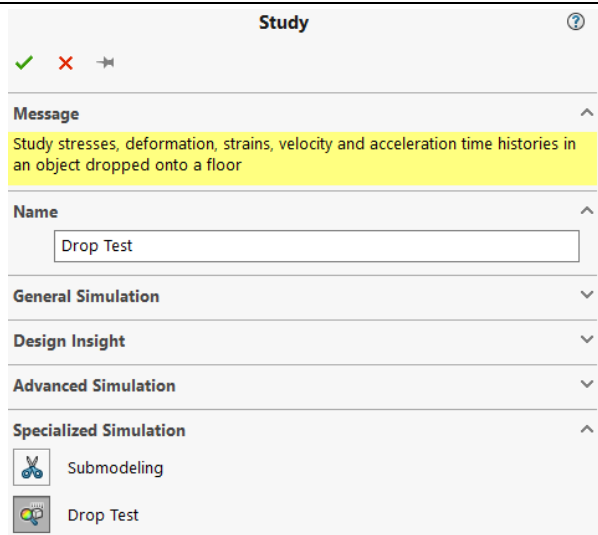


Рис. 5. Визначення параметрів моделювання

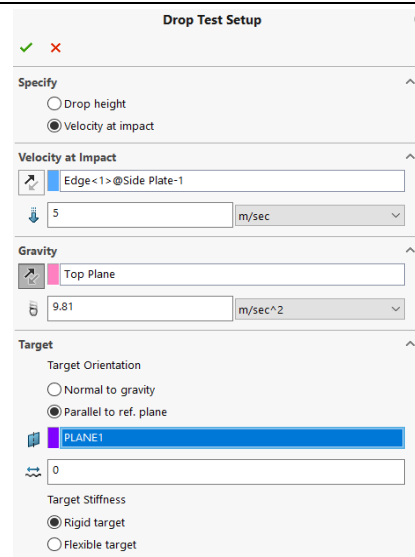


Рис. 6. Параметри моделювання ударного зіткнення мобільної платформи

Загальний вигляд налаштувань напрямку руху збірки, площі дії сил тяжіння та площини удару при зіткненні показані на рис. 7.

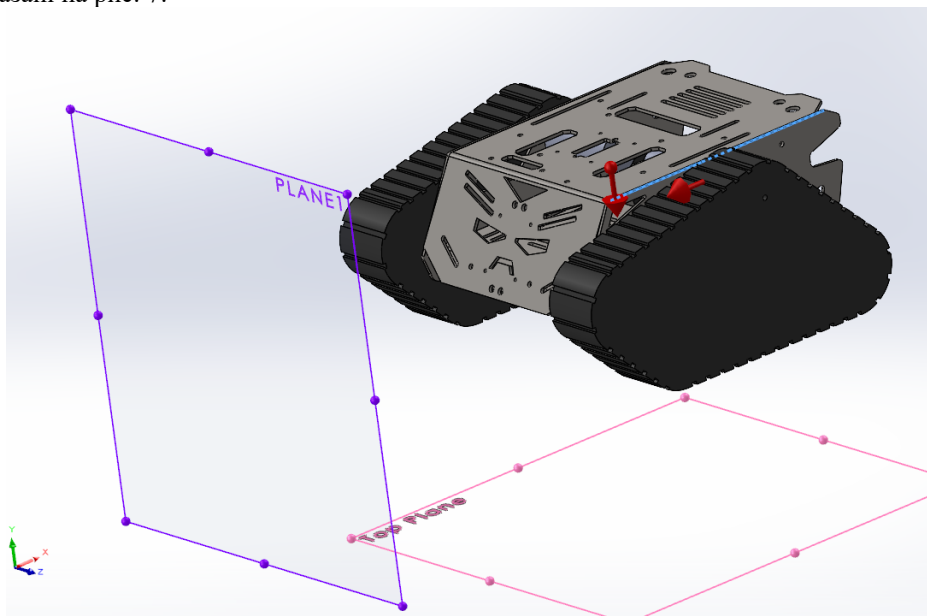


Рис. 7. Напрямок руху збірки напрямку сили тяжіння, площі дії сил тяжіння та площини удару

Визначимо напруження, деформації та контактні сили. Вирішимо динамічну задачу у вигляді залежності всіх сил від часу.

Основне рівняння руху:

$$F_I(t) + F_D(t) + F_E(t) = R(t),$$

де  $F_I(t)$  – сила інерції;  $F_D(t)$  – сили демпфування;  $F_E(t)$  – сили пружності;  $R(t)$  – зовнішні сили, які включають гравітаційні сили та сили ударного навантаження.

Програма Solidworks Simulation автоматично визначає умови контакту між тілом та площину удару. Умови контакту компонентів збірки визначаються спряженнями, які були реалізовані під час проектування – співпадіння поверхонь, співвісність, дотичність та інші. Допустимими для моделювання є умови відсутності зазорів або проникнення поверхонь.

На рис. 8, а, б, в, г представлені результати моделювання руху мобільної платформи розробленої конструкції з вище визначеними фізико-механічними характеристиками матеріалів компонентів збірки та відповідною швидкістю руху.

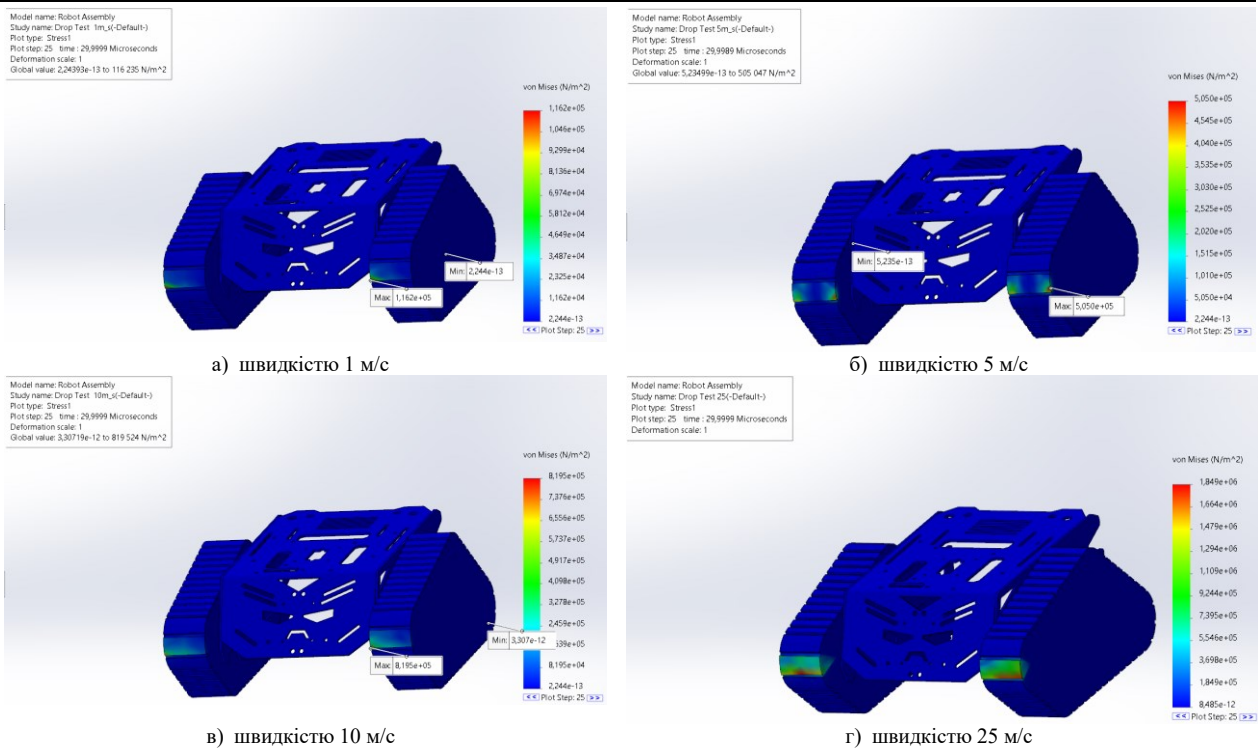


Рис. 8. Моделювання руху мобільної платформи та напружень при зіткненні з різними швидкостями

Результати моделювання (табл. 1, рис. 9) показують наступне. Значення межі пружності для матеріалу трака платформи 6,1 МПа.

Таблиця 1

Значення максимальних контактних напружень при ударі мобільної платформи в залежності від швидкості руху

| № | Швидкість руху платформи, $v$ , м/с | Максимальні контактні напруження, $\sigma$ , МПа |
|---|-------------------------------------|--|
| 1 | 1                                   | 0,1162   |
| 2 | 5                                   | 0,505  |
| 3 | 10                                  | 0,8195   |
| 4 | 15                                  | 0,9466   |
| 5 | 20                                  | 1,381  |
| 6 | 25                                  | 1,849  |
| 7 | 30                                  | 2,352  |

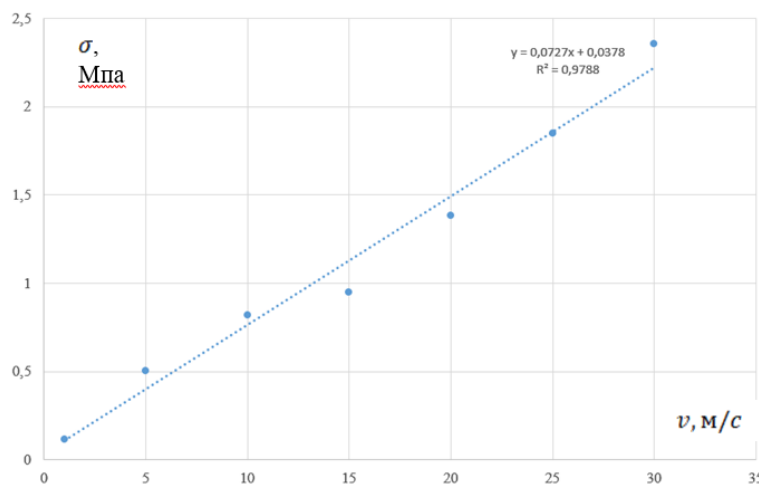


Рис. 9. Значення максимальних контактних напружень  $\sigma$ , МПа при ударі мобільної платформи в залежності від швидкості руху  $v$ , м/с

Це дозволяє з імовірністю 0,98 встановити, що при зіткненні мобільної платформи зі швидкостями до 25 м/с максимальні напруження не перевищують 1,85 МПа, що дає достатній запас міцності при виникненні ударних навантажень для даного матеріалу траку мобільної платформи. Використання сталевих вставок дозволяє зменшити значення максимальних контактних напружень при ударному навантаженні,

однак збільшує вартість мобільної платформи, збільшує загальну вагу та, відповідно, знижує час роботи від встановлених батарей живлення.

### Висновки

Наведено розроблену 3D модель мобільної роботизованої платформи з автономною системою стабілізації для проведення розвідувальних операцій. Встановлено, що мобільні роботизовані платформи широко використовуються в розвідці, оскільки вони можуть допомогти збирати інформацію з небезпечних та важкодоступних місць, а також зменшити ризик для життя людей, що займаються розвідкою. Проведено дослідження на ударні навантаження (зовнішні впливи на систему, що можуть викликати деформацію, пошкодження або руйнування) мобільної гусеничної платформи із автономною системою стабілізації та описано отримані результати. Для моделювання конструкції мобільної платформи було використано програмне середовище SOLIDWORKS. Представлені результати моделювання руху мобільної платформи розробленої конструкції та напружень при зіткненні з різними швидкостями 1, 5, 10, 25 м/с та матеріалом платформи із вуглецевої сталі та гуми. Встановлено, що при зіткненні мобільної платформи зі швидкостями до 25 м/с максимальні напруження не перевищують 1,85 МПа, що дає достатній запас міцності при виникненні ударних навантажень для обраного матеріалу мобільної платформи.

### Література

1. Калінін О.М. Стан і перспективи розвитку самохідних дистанційно-керованих машини для потреб Збройних Сил України / О.М. Калінін, В.В. Костюк, П.О. Русіло, Ю.В. Варванець // Вісник НТУ «ХП». – 2016. – № 39.
2. Yu T.C., Lin C.C., Chen C.C., et al. Wireless sensor networks for indoor air quality monitoring. *Medical engineering & physics*. 2013. № 35(2). P. 231-235.
3. Son Kuswadi, Mohamad Nasyir Tamara, Dwi Nugroho H.W. Development of Gun Turret Drive Stabilization System with a Microcontroller and Implementation on a Model Tank. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2014. Vol. 555. pp. 217-221.
4. Nasyir Moh T., Nurhadi H., Pramujati B., Pitowarno E. Control Simulation of An Automatic Turret Gun Based on Force Control Method. *Proceeding of INAGENTSYS*, August 19-21, 2014, Bandung, Indonesia.
5. Chikovani V.V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator / V.V. Chikovani // *Електроніка та системи управління*. – 2012. – № 4(34). – С. 56-63.
6. Ткачук А.Г. Новий прецизійний чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації озброєння : монографія з грифом Державного університету «Житомирська політехніка» / Ткачук А.Г., Безвесільна О.М. – 2022. – 272 с.
7. Ткачук А.Г. Дослідження основних напрямків розвитку сучасних системи стабілізації озброєння / А.Г. Ткачук, О.М. Безвесільна, А.А. Гуменюк, В.М. Янчук, І.В. Крижанівська // *Технічна інженерія*. – 2020. – Вип. 2(86). – С. 73-80.
8. Ткачук А.Г. Проектування стабілізованої платформи інформаційно-вимірювальної системи для проведення розвідувальних операцій / А.Г. Ткачук, О.М. Безвесільна, В.М. Бондарчук, І.В. Крижанівська // *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: «Технічні науки». – 2022. – № 2. – С. 141-145.
9. Ткачук А.Г. Проектування інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи / А.Г. Ткачук, О.О. Добржанський, М.В. Богдановський, А.Р. Кравчук // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: *Технічні науки*. – 2022. – Том 33 (72). № 2. – С. 108-113.

### References

1. Kalinin O.M. Stan i perspektivy rozvytku samokhidnykh dystantsiino-kerovanykh mashyny dlia potreb Zbroinykh Syl Ukrainy / O.M. Kalinin, V.V. Kostyuk, P.O. Rusilo, Yu.V. Varvanets // *Visnyk NTU «KhPl»*. – 2016. – № 39.
2. Yu T.C., Lin C.C., Chen C.C., et al. Wireless sensor networks for indoor air quality monitoring. *Medical engineering & physics*. 2013. № 35(2). P. 231-235.
3. Son Kuswadi, Mohamad Nasyir Tamara, Dwi Nugroho H.W. Development of Gun Turret Drive Stabilization System with a Microcontroller and Implementation on a Model Tank. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2014. Vol. 555. pp. 217-221.
4. Nasyir Moh T., Nurhadi H., Pramujati B., Pitowarno E. Control Simulation of An Automatic Turret Gun Based on Force Control Method. *Proceeding of INAGENTSYS*, August 19-21, 2014, Bandung, Indonesia.
5. Chikovani V.V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator / V.V. Chikovani // *Elektronika ta systemy upravlinnia*. – 2012. – № 4(34). – S. 56-63.
6. Tkachuk A.H. Novyi pretsyziyniy chutlyvyi element avtomatyzovanoi systemy stabilizatsii ozbroiennia : monohrafiia z hryfom Derzhavnoho universytetu «Zhytomyrska politekhnik» / Tkachuk A.H., Bezvesilna O.M. – 2022. – 272 s.
7. Tkachuk A.H. Doslidzhennia osnovnykh napriamkiv rozvytku suchasnykh systemy stabilizatsii ozbroiennia / A.H. Tkachuk, O.M. Bezvesilna, A.A. Humeniuk, V.M. Yanchuk, I.V. Kryzhanivska // *Tekhnichna inzheneriia*. – 2020. – Vyp. 2(86). – S. 73-80.
8. Tkachuk A.H. Proektuvannia stabilizovanoi platformy informatsiino-vymiriuvalnoi systemy dlia provedennia rozviduvalnykh operatsii / A.H. Tkachuk, O.M. Bezvesilna, V.M. Bondarchuk, I.V. Kryzhanivska // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. Serii: «Tekhnichni nauky». – 2022. – № 2. – S. 141-145.
9. Tkachuk A.H. Proektuvannia informatsiino-vymiriuvalnoi systemy dlia monitorynhu naiavnosti shkidlyvykh ta vybukhonebezpechnykh haziv na bazi robotyzovanoi husenychnoi platformy / A.H. Tkachuk, O.O. Dobrzhanskyi, M.V. Bohdanovskiy, A.R. Kravchuk // *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho*. Serii: *Tekhnichni nauky*. – 2022. – Tom 33 (72). № 2. – S. 108-113.