

УДК 007.52

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317860>А. С. Довгополий<sup>1</sup>, д.т.н., професор, А. В. Загірський<sup>2</sup>, магістр

## КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ТА МЕТОД СТВОРЕННЯ ВИСОКОПРОХІДНОГО АВТОНОМНОГО НАЗЕМНОГО РОБОТИЗОВНОГО КОМПЛЕКСУ

**Ua**

Розроблені концептуальні засади та метод створення високопрохідного автономного наземного роботизовного комплексу та метод його побудови для роботи в умовах складної місцевості та при дії засобів радіоелектронної боротьби. На основі світового досвіду створення високоточних автономних роботизованих комплексів із застосування інерціальних систем навігації запропоновано та досліджено комплексування в навігаційній системі магніто-інерціальних методів, систем технічного зору з розпізнаванням образів та прив'язкою до місцевості і штучного інтелекту. Розроблена модель похибок навігаційної системи. Приводяться розрахунки точності складових елементів навігаційної системи та точність визначення параметрів руху роботизованого комплексу.

**En**

Conceptual principles and a method of creating a high-passage autonomous ground robotic complex and a method of its construction for operation in difficult terrain and under the influence of radio-electronic warfare tools have been developed. Based on the global experience of creating high-precision autonomous robotic complexes using inertial navigation systems, the integration of magneto-inertial methods, technical vision systems with pattern recognition and binding to the terrain and artificial intelligence in the navigation system is proposed and investigated. A model of navigation system errors has been developed. Calculations of the accuracy of the components of the navigation system and the accuracy of determining the movement parameters of the robotic complex are given.

### Вступ

Наземні роботизовані комплекси (НРК) набувають стрімкого розвитку та широкого застосування в різних галузях, включаючи військову. Необхідність зменшення втрат на полі бою зумовила зростання числа НРК здебільшого із дистанційним керуванням на типових колісних та гусеничних шасі [1] ... [3], які можуть рухатись по поверхнях із хорошим покриттям та нескладними перешкодами і кривизною. У [4] показані фактори, які впливають на ефективність НРК: тип приводу, акустична, термічна та візуальна непомітність, наявність вбудованої системи автономного руху. У [5] досліджені переваги можливих кінематичних схем шасі. Досвід ведення

<sup>1</sup> ЦНДІОВТ<sup>2</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

бойових дій показує широке застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) проти безпілотних апаратів, як авіаційних, так і НРК. Тому у світі зростає тенденція підвищення автономності роботизованих комплексів, в тому числі за рахунок використання автономної навігації, систем технічного зору (СТЗ) та штучного інтелекту (ШІ) [6], [7]. Застосування НРК у режимі автоматичного керування потребує, крім навігаційної, також інформації про оточуючий літальний апарат простір. Застосування одного із найпростіших методів розпізнавання образів – розпізнавання за кольором – може використовуватись у разі побудови системи керування [8]. Проте він має обмеження, зумовлене можливою присутністю у полі зору камери декількох одноколірних зображень. Необхідний для дистанційного керування неперервний радіозв'язок під час дії радіоелектронних завад може бути відсутнім. Точне визначення просторового положення та координат місцезнаходження зумовлює використання габаритних та дорогих інерціальних систем [9]. Проблема автономного визначення просторового положення НРК у цих умовах стає актуальною. Використання систем машинного зору у задачах орієнтації та керування отримало значне поширення [8], [10], [11] зумовлене прогресом апаратних та програмних засобів і методів штучного інтелекту. СТЗ активно використовують для виявлення та уникнення перешкод, картографування та моніторингу [12], [13]. Для забезпечення автономного руху НРК та захисту від впливу радіоелектронних перешкод можливо використання системи визначення орієнтації НРК на основі сенсорів магнітного поля Землі та датчиків горизонту на МЕМС-технологіях, системи керування рухом по пересіченій місцевості на основі технічного зору та штучного інтелекту. Система технічного зору зі штучним інтелектом може забезпечити корекцію кінцевого положення комплексу по відомих орієнтирах [10]. Можуть бути вибрані оптимальні алгоритми для застосувань, де потрібна висока швидкість і достатня точність розпізнавання об'єктів у режимі реального часу, систем із обмеженими обчислювальними ресурсами [11]. Незважаючи на широкий спектр застосування та значний прогрес у використанні СТЗ, залишаються проблеми, які недостатньо досліджені, або нерозв'язані. Так, погодні умови можуть значно впливати на здатність системи розпізнавати об'єкти та уникати перешкод. Для обробки зображень і відео у реальному часі потрібні значні обчислювальні ресурси, що створює труднощі для компактних і легких НРК [12]. Комплексування даних із різних джерел, таких як *GPS* та інерціальні датчики, для покращення САК залишається складною технічною задачею, яка не вирішується в умовах РЕБ.

Високоорганізовані робототехнічні мобільні комплекси потребують балансу між протирічливими характеристиками: високою точністю системи навігації з одного боку, і масогабаритними параметрами, вартістю та завадостійкістю з іншого. Це зумовлює необхідність вирішення оптимізаційних задач комплексування методів побудови таких комплексів та окре-

мих наземних робототехнічних апаратів, систем їх орієнтації, навігації та керування, пошуку нової ідеології та методів їх побудови для роботи одного робота, чи їх роботи у складі рою.

### Постановка задачі

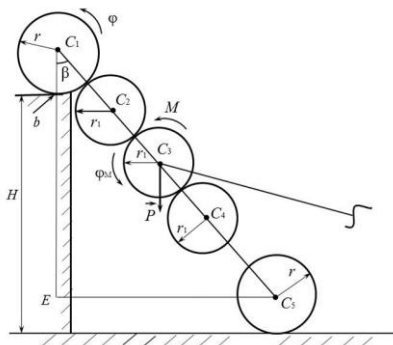
Метою статті є розробка концептуальних засад створення автономного наземного роботизованого комплексу для роботи в умовах складної місцевості та дії засобі радіоелектронної боротьби і методу його побудови.

### Основний зміст

Побудова такого наземного роботизованого апарату (НРА) включає вирішення принципів питань, які об'єднуються спільною конструкцією. Розглянемо принципів питання, що складають зміст методу побудови НРА.

*Високопрохідність* повинна забезпечити рух у заданому напрямку по місцевості, яка має рови, ями, пагорби із подоланням перешкод: сторонні предмети, повалені дерева, чагарники, завали, сходи. У колісних шасі оптимально кінематичною схемою по прохідності та малогабаритності є двопроренева траверса із обертанням [5] (рис. 1). Таке шасі може рухатись по схилах із великим кутом нахилу до горизонту, долати перешкоди висотою, яка значно перевищує діаметр колеса, рухатись по східцях.

*Автономність* передбачає отримання даних про орієнтацію у просторі, положення на траєкторії руху, параметри оточуючого середовища (перешкоди, стан та ін.) бортовими засобами інформації без використання зовнішніх джерел: сигналів *GPS*, команд оператора. Такі властивості наземному комплексу може надати використання інерціальних навігаційних систем. Відомі прецизійні такі системи, похибка яких не перевищує декілька кілометрів за 1 годину рух [9]. Вартість їх може сягати декілька десятків тисяч доларів США, а маса більше 10 кг. Тому їх застосування охоплює малосерійну техніку та техніку багаторазового застосування.



**a)**



**б)**

Рис. 1. Шасі із двопрореневою траверсою з обертанням: кінематична схема (a), експериментальний зразок (б)

У малогабаритних апаратах, в основному БПЛА, використовуються польотні контролери на МЕМС-сенсорах, але вони вирішують лише задачу стабілізації апарата у просторі. Кращі із недорогих малогабаритних БНС забезпечують точність до 300 м на інтервалі руху до 5 хв [14]. У [10] запропоновано створення автономної системи керування рухом НРК на основі магнітометрів і датчиків горизонту, використовуючи спільну обробку сигналів методом триад. Його практичне застосування показує [15] хороші результати визначення орієнтації об'єкту керування: точність курсовизначення становить 1 – 1,5 град. Проте потребує досліджень його використання в умовах вібраційних та ударних збурень і прискореного руху, а також впливу аномалій магнітного поля Землі, зумовлених природними та штучними факторами. Відомі польотні контролери [16] використовують для навігації супутникові сигнали *GPS*, що дає похибку навігації до 5 м. Та супутникова *GPS*, як і інші (ГЛОНАСС, ГАЛІЛЕО) є чутливими до радіоелектронних збурень і не можуть застосовуватись під час дії засобів РЕБ. Альтернативними навігаційними датчиками є одометри та камери СТЗ. Цифрові одометри мають точність 0,1 % пройденого шляху [17]. Але в умовах складної поверхні руху та наявності проковзування коліс ця похибка може зростати до 3-5 %. Оптична камера СТЗ може дати інформацію про переміщення НРК [10].

На рис. 2 показана камера 1, встановлені на шасі під певним кутом до горизонту (площини руху). Її поле зору охоплює ділянку шляху довжиною АВ. Зафіксуємо довільну фігуру 2 на полотні дороги, що у даний момент відображається на середній лінії  $C'C'$  камери, та відслідкуємо її переміщення у положення А виходу із поля зору камери. На матриці камери зображення фігури переміститься в положення  $A'A'$ . Тоді довжина  $A'C'$  матриці камери (у пікселях) буде відповідати пройденому шасі відрізьку шляху  $AC = S$  (у метрах), а довжина  $l_i$  переміщення зображення на камері відповідає пройденому шасі шляху  $S_i$  [10]

$$S_i = K_c l_i, \quad (1)$$

де  $K_c = S / l_o = AC / (A'C')$  – калібровочний коефіцієнт камери, залежний від кута  $\alpha$  нахилу камери до площини поверхні шляху.

Похибка  $\Delta S_i$  вимірювання шляху на кожному  $i$ -му кроці АС (рис. 2) буде визначатись розмитістю  $\Delta$  лінії контуру зображення на камері,

$$\Delta S_i = 2K_c \Delta .$$

Тоді відносна похибка цього способу вимірювання буде

$$\delta S = \frac{\Delta S_i}{S_i} 100\% = \frac{\Delta S_i}{AC} 100\% .$$

Похибка вимірювання пройденого шляху  $S$  буде

$$\Delta S = S \cdot \delta S. \quad (2)$$

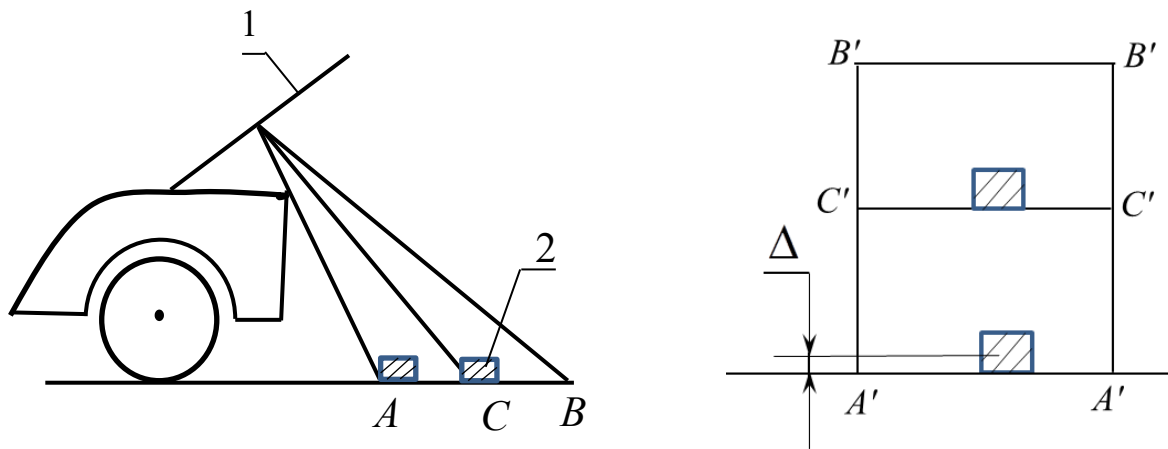


Рис. 2. Оптична камера одометра СТЗ

Площина руху може бути нахилоною до площини горизонту під кутом  $\vartheta$ , який визначить система орієнтації НРК. Тоді довжина пройденого шляху у площині горизонту (навігаційна координата) визначиться як

$$S_{i\xi\eta} = S_i \cos \vartheta. \quad (3)$$

Знаючи поточний курс руху та пройдений шлях, система керування визначає географічне положення НРК та його положення відносно заданої точки кінцевого положення. Похибка досягнення кінцевого положення буде визначатись похибкою (2) обчислення пройденого шляху на траєкторії та курсовим відхиленням  $\Delta S_K$  від траєкторії заданого курсу руху (похибкою визначення кута курсу  $\Delta K$ )

$$\Delta S_K = S \cdot \operatorname{tg} \Delta K. \quad (4)$$

Похибки вимірювання шляху (2) та відхилення від траєкторії (3) є напівосями еліпсоїда похибок досягнення НРК заданого кінцевого положення.

Для підвищення точності досягнення НРК кінцевого положення можна використати СТЗ та розташований в кінцевій точці руху НРК відомий орієнтир. Нехай у системі координат  $XOY$  камери СТЗ, початок якої співпадає із центром  $O$  матриці камери (рис. 3), розпізнаний орієнтир  $M(y_m, z_m)$ . Нехай оптична вісь камери співпадає з продольною віссю НРК, а камера встановлена в поперечній площині НРК. За наявності кутів крену  $\vartheta$  та тангажу  $\varphi$  НРК проекція  $Y_m$  орієнтира у горизонтальній площині визначиться через її проекцію  $y_m$  у системі координат камери як [10]

$$Y_m = y_m \cdot \cos(Y_m, y_m) = y_m \cdot \cos \vartheta \quad (5)$$

Перетворюючи зміщення координати  $Y_m$  зображення орієнтира у значення кута між оптичною віссю камери (поздовжньою віссю НРК) та напрямом на орієнтир (точку кінцевого положення НРК) [10], отримаємо значення курсу подальшого руху НРК

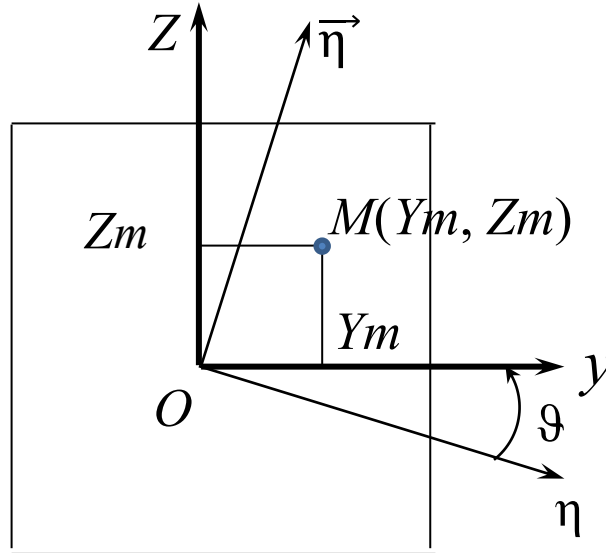


Рис. 3. Визначення зміщення зображення

$$K = K_{\psi} Y_m, \quad (6)$$

де  $K_{\psi}$  – калібровочний коефіцієнт камери. У разі керування НРА у точку кінцевого положення (наведення) може здійснюватись без використання дійсного значення курсу (6). Достатньо використати пропорційну йому величину  $Y_m$ . Максимальна точність наведення буде дорівнювати декільком величинам роздільної здатності  $\delta A$  камери, що обумовлене точністю (у пікселях) визначення центра площі зображення орієнтира у камері СТЗ.

Використання СТЗ для розпізнавання орієнтиру потребує вибору методів та програмного забезпечення, яке б відповідало вимогам швидкодії, об'єму пам'яті контролера, допустимих габаритів [11], а також оптичної камери. Параметри останньої визначають розміри орієнтира та відстань, на якій можливе його розпізнавання. Позначимо через  $a$  розмір зображення в камері у пікселях, який достатній для розпізнавання,  $A$  – дійсний розмір предмета в метрах. Тоді необхідна роздільна здатність камери СТЗ

$$\delta A = \frac{A}{a} \text{ [м/піксель]} \quad (7)$$

визначить ширину огляду місцевості камерою

$$H = H' \delta A, \quad (8)$$

де  $H'$  – ширина камери СТЗ у пікселях. Для кута  $\alpha$  огляду камери знайдемо відстань  $L$  від камери до орієнтира

$$L = H \cdot (2 \cdot \operatorname{tg} \alpha)^{-1}. \quad (9)$$

Вибір методу розпізнавання образу за кольором дозволяє суттєво спростити вимоги до програмного забезпечення та розміру зображення предмету в камері [8], [11].

Значення похибок системи навігації (2), (4) та параметрів камери системи технічного зору (7), (8) дають можливість визначити вимоги до цих систем.

*Завадостійкість.* Сьогодні показує широке застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), як проти безпілотних літальних апаратів, так і НРК. Тому у світі зростає тенденція підвищення завадостійкості роботизованих комплексів, у тому числі за рахунок використання автономної навігації, систем технічного зору та штучного інтелекту. Актуальною є задача створення НРК для роботи в умовах РЕБ. Як показано вище, для забезпечення автономного руху НРК та для захисту НРК від впливу радіоелектронних перешкод можливе використання системи визначення орієнтації НРК на основі сенсорів магнітного поля Землі та датчиків горизонту на МЕМС-технологіях, керування рухом по пересіченій місцевості на основі СТЗ.

*Точність.* Задача точності навігаційної системи транспортного засобу незмінно зв'язана із обмеженнями її масогабаритних характеристик та вартості. Для деяких об'єктів ці обмеження є визначальними. Тому питання точності та габаритів і вартості складають критерії оптимізації при виборі засобів та підсистем навігаційної системи. Як правило, дистанції застосування таких НРК близькі до 1 км, але рельєф місцевості може мати похилі траєкторії та суттєві перешкоди руху, що створює додаткові негативні впливи на роботу системи.

Всі зазначені характеристики – висока прохідність, автономність, точність та завадостійкість повинні аналізуватись спільно із врахуванням вартості та габаритів.

### Приклад розрахунку параметрів системи орієнтації НРА

Використаємо навігаційну систему з елементами, характеристики яких наведені у табл. 1.

**Таблиця 1.**

Характеристики елементів навігаційної системи

№	Елемент навігаційної системи	Точність
1	Магнітометр	1...2 град
2	Система інерціальної орієнтації	1 град
3	Одометр цифровий	3...5%
4	Система технічного зору	
4.1	Камера M526 5G, $H' \times L'$	1080x2400 піксель

№	Елемент навігаційної системи	Точність
4.2	Визначення лінії контуру, $\Delta$	6...8 піксель
4.3	Межа розпізнавання зображення, $a$ ( $2\% H'$ )	20 піксель
4.4	Кут огляду, $\alpha$	45 град
4.5	Одометр СТЗ	2...3 %

За даними табл. 1 та формулами (2), (4) обчислимо похибки вимірювання параметрів руху на довжині пройденого шляху, рівній 1 км (табл. 2).

Таблиця 2.

Точність вимірювання параметрів руху НРА на дистанції 1 км

№	Параметр руху	Точність вимірювання
1	Пройдений шлях	$\Delta S$ , 20...30 м
2	Відхилення від траєкторії	$\Delta S_K$ , 17...34 м

Використовуючи дані табл. 1, табл. 2 та формул (7)...(9), визначимо необхідні параметри СТЗ для забезпечення руху НРА на орієнтир використанням СТЗ після проходження шляху довжиною 1 км із похибками, наведеними у табл. 2. Значення цих параметрів наведені у табл. 3.

Таблиця 3.

Параметри СТЗ для руху на орієнтир розміром  $A = 0,5$  м

№	Параметр СТЗ	Значення параметра
1	Роздільна здатність камери, $\delta A$	0,025 м/піксель
2	Ширина огляду камерою, $H$	27 м
3	Дальність розпізнавання, $L$	32,9 м

Наведені у табл. 1, табл. 2, табл. 3 технічні параметри системи орієнтації і навігації та результати оцінки точності комплексованої магніто – інерціальної системи та СТЗ показують можливість реалізації такої автономної системи, яка забезпечить високу точність виходу кожного НРА у складі НРК у задане кінцеве положення.

## Висновки

Узагальнені дослідження високопрохідності та автономності наземного роботизованого комплексу з врахуванням світового досвіду створення автономних спеціалізованих роботизованих комплексів із інерціальними системами навігації на сучасних сенсорах. На основі проведеного аналізу похибок та методів забезпечення необхідної точності навігації запропонований метод комплексування засобів інерціальної навігації, розпізнавання образів з прив'язкою до місцевості, системи технічного зору та шту-



чного інтелекту, який підтвердив можливість побудови автономної системи навігації високої точності. Показана можливість вибору технічних засобів для забезпечення заданих параметрів руху наземного роботизованого комплексу з врахуванням обмежень щодо його масогабаритних параметрів та показників собівартості.

### Список використаної літератури

1. ТОП-5 наземних роботизованих колісних систем України. <https://www.armyfm.com.ua/tehnika-vijni-top-5-nazemnih-robotizovanih-kolisnih-sistem-ukraini/>.
2. *Залипка В. Д.* Особливості створення та застосування наземних роботизованих комплексів у провідних країнах світу та Україні// Науковий вісник НЛТУ України.- 2022. – Т. 32- № 4. – С. 60–65.
3. *Струтинський В. Б., Гуржій А. М.* Наземні роботизовані комплекси. Електронний ресурс. – Житомир : ПП «Рута», 2023. – 497 с.
4. *Кириченко І.* Наземні роботизовані комплекси: основи та майбутнє// Молодий вчений. Військові науки. – № 12 (100) (2021). <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2021-12-100-4>.
5. *Довгополий А. С., Загірський А. В.* Механіка та керуваність безпілотних наземних роботизованих комплексів в умовах складного рельєфу//Механіка гіроскопічних систем. – № 46. – 2023. – С. 5-21. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771462023302678>.
6. *Michele Mancini, Gabriele Costante, Paolo Valigi, Thomas A. Ciarfuglia.* Fast Robust Monocular Depth Estimation for Obstacle Detection with Fully Convolutional Networks// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS – 2016.
7. *Шаре Пол.* Невидима армія. Автономна зброя та майбутнє війни//К.-Форс Україна. – 2023. – 448 с.
8. *Котвицький Р. С., Сарибога Г. В., Збруцький О. В.* Автоматичне керування оптичною віссю камери на основі системи технічного зору з використанням методу ідентифікації об'єктів за кольором// Інформаційні системи, механіка, керування. – Вип.13. – 2015. – с. 114-118. Режим доступу [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ismk\\_2015\\_13\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ismk_2015_13_14).
9. *Пешехонов В. Г.* Перспективи гіроскопії //Збірник праць. – ВСПУ-2019. – С. 36 – 38. DOI: 10.25728/vspru.2019.0036.
10. *Довгополий А. С., Загірський А. В., Збруцький О. В.* Створення автономної системи керування рухом наземного роботизованого комплексу на

- малих дистанціях// Механіка гіроскопічних систем. – № 47. – 2024. – С. 5-23. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771472024307756>.
11. Збруцький О. В., Яременко Т. В., Краснопольський А. О. Оцінка ефективності методів розпізнавання образів та сегментації зображень для систем технічного зору малих безпілотних апаратів// Механіка гіроскопічних систем. – № 47. – 2024. – С. 63-82. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771472024307705>.
  12. Zhefan Xu, Yumeng Xiu, Xiaoyang Zhan, Baihan Chen, Kenji Shimada. Vision-aided UAV navigation and dynamic obstacle avoidance using gradient-based B-spline trajectory optimization// [Online]. 15. 09. 2022. Available: <https://arxiv.org/abs/2209.07003> 7 p.
  13. Yulin Wang, Yizeng Han, Chaofei Wang, Shiji Song, Qi Tian, Gao Huang. Computation-efficient Deep Learning for Computer Vision: A Survey// [Online]. 27. 08. 2023.
  14. Нестеренко О. І. Особливості похибок мікромеханічної інерціальної навігаційної системи у автономному режимі роботи// XXIII Міжнародна конференція «Приладобудування». – К.: НТУУ «КПІ», 2024. – с. 28-31.
  15. Zbrutsky O. System definition of micro - nano satellite orientation/ O. Zbrutsky, V. Meleshko, A. Ganja, S. Tarnavsky, O. Bondarenko, S. Ponomarenko, K. Saurova// Mechanics of gyroscopic systems. – № 43. – 2022. – p. 46-60.
  16. Польотний контролер HEX Cube Orange+ Pixhawk 2.1 IMU V8 плата ADS-B (HX4-06222)// Джерело [https://rc-hobby.com.ua/polotni-kontroleri/hx4-06222/?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQiAire5BhCNARIsAM53K1jOrgdFLaVCh9zEIqGcRoCu2DNmgt0emI3tn6HovCMx31m3OJY6n7QaAkbjEALw\\_wcB#specifications](https://rc-hobby.com.ua/polotni-kontroleri/hx4-06222/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAire5BhCNARIsAM53K1jOrgdFLaVCh9zEIqGcRoCu2DNmgt0emI3tn6HovCMx31m3OJY6n7QaAkbjEALw_wcB#specifications).
  17. Спідометр універсальний/ <https://prikupi.com.ua/ua/p1638453883-tsifrovij-spidometr-odometr.html>.