

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-13>

УДК 621.317

БУРАУ Надія
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
email: nburau@ukr.net
ОСОВЦЕВ Андрій
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
email: andrew_oso@ukr.net

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТУ КЛАСУ «МІНІ»

Статтю присвячено розробці системи стабілізації обладнання, яке встановлюється на колісному мобільному роботі класу «міні», а саме обґрунтуванню вибору функціональних елементів системи. Для ефективного використання різноманітного обладнання (цифрових камер, антен, радарів, різноманітних приладів) при русі мобільного робота по місцевості зі складним профілем поверхні важливо забезпечити стабілізацію обладнання в площині горизонту.

В роботі проведено аналіз сучасної елементної бази, яку можна використати для розробки системи стабілізації відповідно вимог, які висуваються до характеристик точності та швидкодії функціональних елементів, та з урахуванням обмежень за масо-габаритними характеристиками. У якості чутливого елемента системи стабілізації обґрунтовано використання курсовертикалі AHRS (Attitude and heading reference system), побудованої на основі технологій мікроелектромеханічних систем. За результатами порівняльного аналізу характеристик таких курсовертикалей різних виробників обґрунтовано вибір курсовертикалі з найбільш прийнятними масо-габаритними характеристиками та точністю визначення кутів відхилення платформи від площини горизонту. Проведено порівняльний аналіз та обґрунтовано вибір виконавчого двигуна серед безколекторних електродвигунів постійного струму, невеликих за габаритами та вагою, які забезпечують момент, достатній для вирішення завдання стабілізації платформи вагою 4-5 кг. Розглянуто існуючі архітектури мікроконтролерів та обґрунтовано вибір основного мікроконтролера, на якому буде реалізовано перетворення, алгоритми керування, адаптивні цифрові регулятори системи стабілізації обладнання.

Характеристики обраних функціональних елементів системи стабілізації будуть використані в розроблених моделях системи при проведенні комп'ютерного моделювання та дослідженні якості процесу стабілізації в складних умовах руху мобільного робота. На основі обраних функціональних елементів буде створено та випробувано фізичну модель системи стабілізації для встановлення на мобільний робот класу «міні».

Ключові слова: мобільні роботи, система стабілізації, чутливий елемент, курсовертикаль, електродвигун, мікроконтролер.

BOURAOU Nadiya, OSOVTSEV Andrii
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE ELEMENT BASE OF THE STABILIZATION SYSTEM OF THE MOBILE ROBOT EQUIPMENT OF THE "MINI" CLASS

The article is devoted to the development of the equipment stabilization system, which is installed on wheeled mobile robot of the "mini" class, namely, to the justification of the choice of functional elements of the system. For the effective use of various equipment (digital cameras, antennas, radars, various devices) when moving a mobile robot over terrain with a complex surface profile, it is important to ensure stabilization of the equipment in the horizon plane.

The paper analyzes the modern elemental base that can be used to develop a stabilization system in accordance with the requirements for the accuracy and speed characteristics of functional elements, and taking into account the limitations of mass and dimensional characteristics. As a sensitive element of the stabilization system, the use of an Attitude and heading reference system (AHRS), built on the basis of technologies of microelectromechanical systems, is substantiated. According to the results of a comparative analysis of the characteristics of such AHRS of different manufacturers, the choice of AHRS with the most acceptable mass and dimensional characteristics and the accuracy of determining the angles of deviation of the platform from the horizon plane is substantiated. A comparative analysis was carried out and the choice of an executive motor was justified among brushless direct current electric motors, small in size and weight, which provide a moment sufficient to solve the task of stabilizing a platform weighing 4-5 kg. The existing architectures of microcontrollers are considered and the choice of the main microcontroller on which the conversion, control algorithms, adaptive digital regulators of the equipment stabilization system will be implemented is justified.

The characteristics of the selected functional elements of the stabilization system will be used in the developed models of the system when conducting computer simulations and researching the quality of the stabilization process in complex conditions of mobile robot movement. Based on the selected functional elements, a physical model of the stabilization system will be created and tested for installation on a "mini" class mobile robot.

Key words: mobile robots, stabilization system, sensitive element, attitude and heading reference system, electric motor, microcontroller.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Робототехніка на сьогоднішній день є одним з найбільш досліджуваних напрямків автоматизації, в якому поєднуються сучасні досягнення мехатроніки, мікропроцесорної техніки, інформаційних технологій

та штучного інтелекту. В останнє десятиріччя значного розвитку та практичного застосування як в промисловому виробництві, так і в багатьох непромислових сферах (обслуговування, транспортування, медичні послуги, спостереження, патрулювання, розваги, тощо) набули мобільні роботи (МР), які на основі отриманих даних про робоче середовище та внутрішні характеристики МР здійснюють автономне пересування в різних фізичних середовищах. В детальному огляді МР [1] наведено їх класифікацію (за призначенням, середовищем експлуатації, типом руху та основними характеристиками), а також концепцію побудови різних класів МР, узагальнену інформацію про системи руху, системи сприйняття (сенсори), системи керування та навігації.

Як показано в [1,2] до найбільш розповсюджених наземних МР відносяться колісні, на основі яких створюються інтелектуальні автономні транспортні засоби. Серед переваг порівняно з іншими типами відзначаються простіше та дешевше проектування, менш складне керування колесами, менше зношування поверхні руху, простота балансування, широкий діапазон швидкостей, маневреність на рівній непересіченій місцевості. Але для таких об'єктів існують певні проблеми у подоланні перешкод під час руху по місцевості зі складним профілем [3,4], причому складні умови та профіль місцевості особливо впливають на ефективність експлуатації мобільних міні-роботів, розміри яких за трьома вимірами не перевищують 0,5м. На таких МР багатопільового призначення у якості обладнання можуть встановлюватись цифрові камери, радары, антени, лазерні далекоміри, оптико-електронні модулі різного призначення вагою не більше 4-5 кг. Для ефективного використання такого обладнання в зазначених вище умовах руху МР необхідно забезпечити стабілізацію обладнання з такою точністю, щоб значення кута відхилення від площини горизонту не перевищувало 0,35град (0,02 градуса) [3,4].

Процес розробки системи стабілізації обладнання, встановленого на наземному МР, який рухається по місцевості зі складним профілем поверхні, складається з таких основних етапів, як: розробка та аналіз математичної моделі збуреного руху МР; розробка та дослідження моделі системи стабілізації; забезпечення необхідних показників якості процесу стабілізації шляхом синтезу регуляторів, оптимізації чи синтезу робастної системи [5-7]. Разом з тим, важливим етапом розробки є вибір функціональних елементів системи стабілізації, уточнення їх моделей та вибір їх параметрів. Цей етап залежить як від класу МР, його функціонального призначення та вимог до системи стабілізації обладнання, так і від зазначених вище етапів моделювання та аналізу.

Узагальнену функціональну схему системи стабілізації (рис. 1) можна розглядати як платформу з установленим обладнанням та сукупністю функціональних елементів для отримання інформації про відхилення платформи від заданого положення, наприклад, від площини горизонту (чутливі елементи), для перетворення/підсилення/корекції та формування керуючого впливу на виконавчі елементи (мікроконтролер), для утримання платформи з обладнанням в заданому положенні (виконавчі елементи).

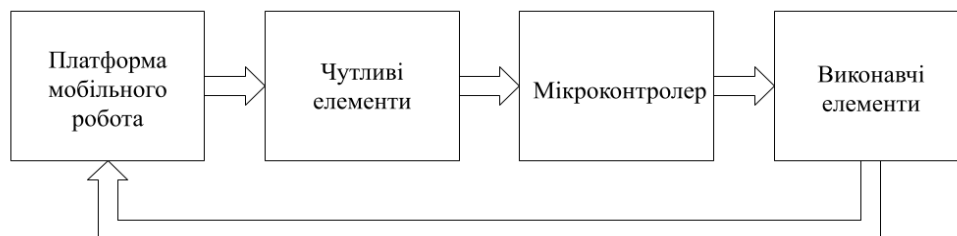


Рис. 1. Узагальнена функціональна схема системи стабілізації обладнання мобільного робота

Всі функціональні елементи системи впливатимуть на показники якості стабілізації в умовах складного руху, МР, тому до них висуваються вимоги як за масо-габаритними характеристиками, так і за показниками точності, швидкодії, надійності. Виконання таких вимог можна забезпечити методами структурної та параметричної оптимізації, як це показано в статті [8], де досліджується процес вимірювання кутової швидкості та прискорення платформи системи стабілізації, а також розроблено алгоритм стабілізації та корегування положення обладнання при досить великій швидкості руху об'єкта. А в роботі [9] запропоновано вдосконалити процедуру синтезу цифрових регуляторів для керування електроприводами, що допоможе вирішити проблему зі швидкою зміною орієнтації сенсора спрямованої дії та підвищити точність стабілізації.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є огляд та обґрунтування вибору елементної бази для побудови адаптивної системи стабілізації обладнання, встановленого на МР класу «міні».

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для системи стабілізації обладнання, яке може бути встановлено на мобільних міні-роботах, вибір функціональних елементів значною мірою ґрунтується на їх масо-габаритних характеристиках, виходячи з обмежених розмірів МР та ваги встановленого на платформі обладнання. В таких умовах доцільним буде вибір чутливих елементів, побудованих на технологіях мікроелектромеханічних систем (МЕМС), сучасних мікроконтролерів для реалізації алгоритмів керування, електродвигунів з контролерами, тощо [10,11].

Обґрунтування вибору чутливих елементів

Для системи стабілізації обладнання індикаторного типу важливим є вибір чутливих елементів, який може надавати інформацію про відхилення платформи від площини горизонту. Сучасний розвиток МЕМС технологій та алгоритмів обробки даних і корекції дає можливість за показниками точності використовувати їх для вирішення завдань орієнтації, навігації, стабілізації. Одним з можливих рішень є використання курсовертикалі AHRS (Attitude and heading reference system), до складу якої входять акселерометри, магнетометри та датчики кутової швидкості, що забезпечує видачу інформації про три кути відхилення об'єкта (курс, тангаж та крен) від його початкового положення. Для застосування у системах стабілізації обладнання, встановленого на колісному МР, використовуються два кути – кут тангажу та кут крену, тому при виборі таких систем важливо забезпечити показники точності визначення зазначених кутів. Приклад використання AHRS наведено у роботі [12]. Перевагою таких сучасних систем є зручність інтеграції, за допомогою інтерфейсів їх достатньо просто приєднати до мікроконтролерів і отримати цифрові дані. Важливими є також вага приладу та напруга живлення. Вага чутливих елементів, як і інших функціональних елементів, впливає безпосередньо на збільшення/зменшення корисного навантаження, яке може нести мобільний робот. Напруга живлення впливає на легкість інтегрування, тому що за звичай в таких системах використовується акумуляторне живлення, і напруга живлення в системі може становити 12В, 24В або 48В.

Для аналізу порівнюємо системи AHRS, які виробляють відомі світові компанії, наприклад, такі як Inertial Labs, Advanced Navigation, VectorNav, MicroStrain. Не будемо звертати увагу на цінову політику компаній, так як всі ціни надаються по запиті, виходячи від обсягу та призначення. Крім того, не розглядаються варіанти AHRS, побудовані на волоконно-оптичних гіроскопах через значну різницю в ціні, яка в декілька разів вища за аналогічні чутливі елементи, виконані на технологіях МЕМС.

Першою розглянемо продукцію фірми Inertial Labs (США), яка пропонує декілька різних моделей курсовертикалі, які потенційно можуть бути використані: AHRS-B; AHRS-P; AHRS-II-B; miniAHRS. Зовнішній вигляд цих моделей наведено на рис. 2.

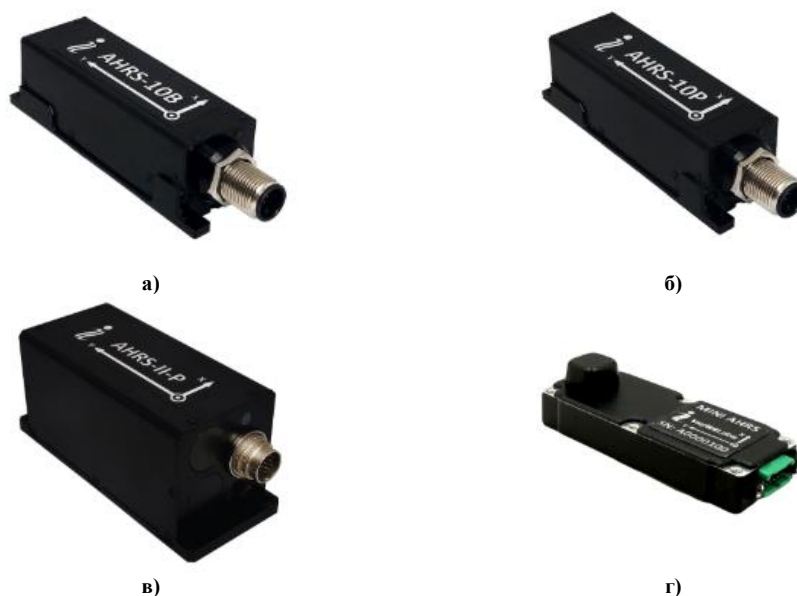


Рис. 2. Зовнішній вигляд основних моделей AHRS фірми Inertial Labs:
а) AHRS-10B, б) AHRS-10P, в) AHRS-II-B, г) miniAHRS

В табл. 1 наведено основні характеристики обраних для аналізу AHRS, отримані на основі офіційної документації компанії [13-15]. За показники точності доцільно обрати курсовертикалі AHRS-10P та AHRS-II-B, які мають однакові похибки визначенні кутів, але з урахуванням масо-габаритних характеристик було обрано AHRS-10P.

Таблиця 1

Основні характеристики моделей AHRS фірми Inertial Labs

Характеристика	AHRS-10B	AHRS-10P	AHRS-II-B	miniAHRS
Похибка визначення кутів тангажу та крену у статичному/динамічному режимах, градус	0,05/0,08	0,03/0,05	0,03/0,05	0,05/0,08
Вага, грам	77	84	280	20
Габаритні розміри, мм	90 × 27 × 26	90 × 27 × 26	120 × 50 × 53	53 × 19 × 13
Напруга живлення, В	5-15	9-28	9-36	5-15

Серед пропозицій виробника Advanced Navigation (Австралія) представлена лише одна модель Certus Mini A, зовнішній вигляд якої наведено на рис. 3.



Рис. 3. Зовнішній вигляд AHRS Certus Mini A фірми Advanced Navigation

В офіційній документації компанії [16] зазначено, що похибка визначення кутів тангажу та крену не перевищує $0,1^\circ$, діапазон напруги живлення від 5В до 36В, вага не перевищує 38 г, габаритні розміри 30мм х 41мм х 24 мм. Як видно, заявлене значення похибки визначення кутів не є прийнятними для побудови системи стабілізації обладнання.

Виробник VectorNav (США) пропонує дві моделі AHRS (VN-100 та VN-110), зовнішній вигляд яких наведено на рис. 4.



Рис. 4. Зовнішній вигляд моделей AHRS фірми VectorNAV: а) VN-100, б) VN-110

Основні характеристики моделей AHRS фірми VectorNAV наведено у табл. 2 на основі офіційної документації [17,18].

Таблиця 2

Основні характеристики AHRS фірми VectorNAV

Параметр	VN-100	VN-110
Похибка визначення кутів тангажу та крену, градус	0,5	0,05
Вага, грам	15	12
Габаритні розміри, мм	36 x 33 x 9	31 x 31 x 12
Напруга живлення, В	4.5-5.5	12-34

Як видно, не зважаючи на дуже сприятливі масо-габаритні характеристики, за показниками точності модель VN-100 не відповідає вимогам, більш прийнятним варіантом може бути використання моделі VN-110 для системи стабілізації обладнання мобільного робота класу «міні».

З представлених моделей виробника MicroStrain (США) для аналізу було обрано виробу, які відносяться до класу тактичної та промислової високої продуктивності (Tactical та Industrial High Performance): 3DM-GV7-AHRS та 3DM-GX5-AHRS (рис. 5).



а) б)
 Рис. 5. Зовнішній вигляд моделей AHRS фірми MicroStrain: а) 3DM-GV7-AHRS; б) 3DM-GX5-AHRS

Технічні характеристики моделей AHRS фірми MicroStrain відповідно до технічної документації [19,20] наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Основні характеристики моделей AHRS фірми MicroStrain

Параметр	3DM-GV7-AHRS	3DM-GX5-AHRS
Похибка визначення кутів тангажу та крену, градус	0,25 у статичному режимі / 0,5 у динамічному режимі	0,8
Вага, грам	17,7	16,5
Габаритні розміри, мм	36,2 x 36,6 x 10,2	36 x 36,6 x 11,1
Напруга живлення, В	4,6-36	4-36

Як видно, курсовертикалі даного виробника не підходять для використання в системах стабілізації обладнання за заявленим значенням похибки за кутами тангажу та крену.

Після проведеного аналізу чотирьох світових виробників курсовертикалі AHRS можна зробити висновок, що в якості чутливих елементів для розробленої системи стабілізації обладнання МР за показниками точності доцільно обрати AHRS-10P (Inertial Labs) та VN-110-110 (VectorNAV). Система AHRS-10P має кращі показники по точності у статиці, а система VN-110 має кращі масо-габаритні характеристики, але в загальному випадку обидві курсовертикалі мають прийнятні розміри та вагу (до 100 г), тому для побудови системи стабілізації обладнання МР класу «міні» обираємо курсовертикаль AHRS-10P фірми Inertial Labs (США).

Обґрунтування вибору виконавчого двигуна

Наступним важливим питанням для розробки системи стабілізації обладнання МР є вибір виконавчого двигуна, щоб забезпечити стабілізацію платформи з навантаженням, вага якої досягає 4-5кг. Основними критеріями вибору двигуна є безпосередньо його вага, параметри живлення, момент на обертовому валу, а також швидкодія при відпрацюванні збурення.

На сьогоднішній день широкого використання в малогабаритному електротранспорті, безпілотних літальних та наземних апаратах набувають безщіткові або безколекторні електродвигуни постійного струму – BLDC (brushless direct current) [21]. Інтенсивне впровадження BLDC двигунів пов'язано зі стрімким розвитком автомобільної індустрії, а саме з переходом її на електродвигуни замість двигунів внутрішнього згорання. Серед переваг такого типу двигунів можна виділити такі [21]:

- вища ефективність завдяки електронній системі комутації (зменшення тертя внаслідок відсутності щіток обумовлює менші втрати енергії та виділення тепла);
- підвищена надійність внаслідок зменшення механічного зношування, а також зменшення електричного шуму;
- мала вага та компактні розміри;
- плавність роботи і точне керування;
- можливість реалізації ефективного відмовостійкого керування;
- низький рівень акустичного шуму та можливість зменшення вібрації, як наслідок, зменшення додаткових збурень.

Так як система стабілізації обладнання МР розробляється як двовісна (у площині горизонту), то для такої системи потрібно мати два двигуна, кожен відповідає за свою вісь стабілізації. Проведемо аналіз існуючих пропозицій безколекторні електродвигуни постійного струму на ринку.

Двигун фірми iPower Motor (Китай), зовнішній вигляд моделі GM110-8 Gimbal Motor w/ Encoder наведено на рис. 6.



Рис. 6. Зовнішній вигляд двигуна GM110-8 фірми iPower Motor

Технічні характеристики двигуна GM110-8, наведені на офіційному сайті компанії [22], є прийнятними для розробки системи стабілізації:

- вага – 610 г;
- напруга живлення – 20В;
- момент на валу – 0,78-1,18 Нм;
- висота двигуна – 33,9мм, діаметр - 110мм.

Аналіз характеристик двигуна показав, що такий двигун може стабілізувати платформу вагою до 8-12кг, в той час, як два двигуна будуть важити 1,2 кг, таким чином, і за масо-габаритними характеристиками двигун GM110-8 відповідає вимогам.

Наступними було розглянуто двигуни Robot Dynamics R-series (R60, R80, R100) виробника Cubemars (Китай). Зовнішній вигляд двигунів наведено на рис. 7, а характеристики - у табл. 4 [23].



Рис. 7. Зовнішній вигляд двигунів Robot Dynamics R-series фірми Cubemars

Таблиця 4

Основні характеристики двигунів Cubemars Robot Dynamics R-series

Параметр	R60	R80	R100
Вага, грам	248	354	731
Габаритні розміри, мм	Діаметр 69 Висота 26	Діаметр 87 Висота 27,5	Діаметр 106,8 Висота 40,5
Момент, Нм	0,75	1,3	3,7
Напруга живлення, В	48	48	48

Проведений аналіз показав, що для системи стабілізації цілком прийнятним буде двигун моделі R60, який дозволяє стабілізувати платформу максимальною вагою до 8кг, більш старші моделі вже є більш потужними. Габаритні розміри такого двигуна є меншими ніж двигуна GM110-8 фірми iPower Motor, загальна вага двох двигунів для системи стабілізації буде складати 0,5кг.

На рис. 8 наведено зовнішній вигляд двигуна FCP-060 Series компанії Lin Engineering (США).



Рис. 8. Зовнішній вигляд двигуна FCP-060 Series компанії Lin Engineering

На офіційному сайті виробника наведено такі технічні характеристики двигуна FCP-060 Series [24]:

- вага – 403 г;
- напруга живлення – 48В;
- момент на валу – 0,6Нм;
- висота двигуна – 25мм, діаметр 60мм.

Такий двигун може стабілізувати платформу вагою до 6кг, але при використанні двох двигунів загальна їх вага буде складати 0,8кг, що більше, ніж у 1,5 раз перевищує вагу двох двигунів R60 фірми Cubemars.

Останнім було розглянуто двигун X4-3 виробника Myactuator (Китай) (рис. 9).



Рис. 9. Зовнішній вигляд двигуна X4-3 фірми Myactuator

Виробник двигуна X4-3 заявляє такі технічні характеристики [25]:

- вага – 300 г;
- напруга живлення – 24В;
- момент на валу – 1,5Нм;
- висота двигуна – 44мм, діаметр 54мм.

Сумарна вага двох двигунів буде складати 0,6 кг і при цьому може стабілізувати платформу вагою від 10-15кг.

Порівняльний аналіз характеристик розглянутих двигунів показав, що всі двигуни задовольняють вимогам до моменту на валу та напруги живлення, а також мають наближені масо-габаритні характеристики. Для подальшого використання було обрано двигун R60 фірми Cubemars, як найбільш компактний за розмірами та вагою, та забезпечить стабілізацію платформи з навантаженням до 8кг. Крім того, до двигуна R60 є розроблені драйвери керування, тому його буде легко інтегрувати в систему.

У наведених в [23] характеристиках обраного двигуна розраховано сталі часу (електромеханічна $\tau_M = 0,89$ мс та електромагнітна $\tau_{em} = 0,78$ мс) та коефіцієнт підсилення ($k_{дв} = 20 \frac{\text{рад}}{\text{В}\cdot\text{с}}$), ці параметри будуть використані в подальших дослідженнях при моделюванні системи стабілізації.

Обґрунтування вибору мікроконтролера

Основним обчислювальним ядром системи стабілізації буде мікроконтролер, на якому можна реалізувати не лише прості перетворення, а й складні алгоритми керування, адаптивні цифрові регулятори, тощо. За архітектурою мікроконтролери можна поділити на такі чотири популярні групи:

- FPGA (Field-Programmable Gate Array, програмована користувачем вентильна матриця, один з різновидів програмованих логічних інтегральних схем) - дозволяють створювати власну логіку та власні логічні схеми, підходять для паралельної обробки даних, високошвидкісних обчислень, зазвичай використовуються на великих виробництвах для автоматизації процесів, або побудови внутрішніх мереж, в телекомунікаційних системах, при розробці прототипів.
- PIC (Peripheral Interface Controller, контролер периферійного інтерфейсу) – родина мікроконтролерів компанії Microchip Technology (США), які підтримують багато периферійних пристроїв (АЦП, ЦАП, таймери, інтерфейси зв'язку); є недорогими і знайшли своє застосування в автомобільній автоматизації, автоматизації процесів керування, у вбудованих системах керування, тощо.
- AVR – мікроконтролери, розроблені компанією Atmel (США), прості в програмуванні (самим відомим є Arduino), мають багато бібліотек, де вже описана робота з популярною периферією, використовуються у вбудованих системах, наприклад, в робототехніці.
- ARM – найбільш популярний клас мікроконтролерів для використання у вбудованих системах, поєднують високі обчислювальні можливості, низьке енергоспоживання і підтримку різноманітних периферійних пристроїв, серед усіх мікроконтролерів потребують найбільших знань від розробника у сфері програмування. Популярними є мікроконтролери STM від фірми STMicroelectronics (Швейцарія), побудовані на 32-розрядних ядрах ARM, вони застосовуються в машинобудуванні, у вбудованих системах, промисловій автоматизації, робототехніці. Вигляд мікроконтролера STM32 F103 фірми STMicroelectronics наведено на рис. 10 [26].

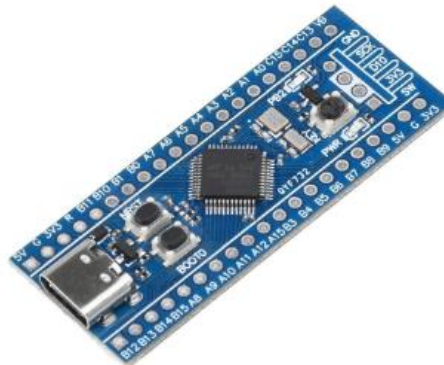


Рис. 10. Вигляд мікроконтролера STM32 F103

Для системи стабілізації обладнання МР, яка розробляється, обрано мікроконтролер STM32 F103RG, який включає 32-розрядне ядро RISC ARM® Cortex®-M3, що працює на частоті 72 МГц, високошвидкісну вбудовану пам'ять, великий вибір розширених входів/виходів і периферійних пристроїв (АЦП, таймери, стандартні та вдосконалені комунікаційні інтерфейси) [26]. Це один з найбільш популярних мікроконтролерів, які використовуються в робототехніці та при розробці вбудованих систем.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Запропоновано та обґрунтовано вибір функціональних елементів системи стабілізації обладнання (цифрових камер, радарів, антен, лазерних далекомірів, оптико-електронних систем різного призначення), встановленого на колісному МР класу «міні». Виходячи з обмежених розмірів МР та ваги встановленого на платформі обладнання, одним з важливих критеріїв вибору є мінімальні масо-габаритні характеристики елементів системи стабілізації за умови забезпечення показників точності та швидкодії, а також простоти їх інтегрування в реальній автоматичній системі стабілізації.

Як чутливий елемент системи стабілізації запропоновано і обґрунтовано використання курсовертикалі AHRS, яка побудована на технології MEMS, має прийнятні масо-габаритні характеристики і забезпечує високу точність визначення кутів відхилення платформи від площини горизонту (кутів тангажу та крену). На основі проведеного аналізу характеристик курсовертикалей різних виробників для подальшого використання обрано AHRS-10P компанії Inertial Labs (США).

Для вибору виконавчого двигуна проаналізовано характеристики безколекторних електродвигунів постійного струму класу BLDC, невеликих за габаритами та вагою, які забезпечують момент, достатній для вирішення завдання стабілізації платформи вагою 4-5 кг. Для подальшого використання обрано двигун R60

фірми Cubemars (Китай), як найбільш компактний за розмірами та вагою, з розробленими драйверами керування та можливістю стабілізації платформи з навантаженням до 8кг.

У якості обчислювального та керуючого модуля системи було обрано мікроконтролер STM32F103RG, побудований на ARM архітектурі, та який на сьогодні є найпопулярнішим вибором для вбудованих систем автоматизації та робототехніки.

Характеристики обраних функціональних елементів системи стабілізації будуть використані в розроблених моделях системи при проведенні комп'ютерного моделювання та дослідженні якості процесу стабілізації в складних умовах руху МР. На основі обраних функціональних елементів буде створено та випробувано фізичну модель системи стабілізації для встановлення на мобільний робот класу «міні».

Література

1. Rubio F., Valero F., Liopis-Albert C. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019. No. 2. P. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>
2. Осовцев А.В. Класифікація багатоцільових мобільних роботів. XVI Всеукраїнська наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»: збірн. праць, Київ, 2023. С. 29-32.
3. Бурау Н.І., Осовцев А.В. Аналіз ефективності системи стабілізації обладнання мобільного міні-робота на місцевості зі складним профілем. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023, Т. 34(73), №5, С. 99-107. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/17>
4. Бурау Н.І., Осовцев А.В. Моделювання системи стабілізації обладнання мобільного робота в умовах руху по місцевості з нахилом та нерівностями. *Електронне моделювання*. 2024, №3(46), С. 114-125. <https://doi.org/10.15407/emodel.46.03.114>
5. Александров Є.Є., Ванін В.А., Александрова Т.Є., Ванін Б.В. Параметричний синтез стабілізатора рухомого об'єкту. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2021, № 1-2 (2), С. 10-19. <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2021.02.02>
6. Сущенко О.А. Параметричний синтез системи стабілізації та визначення курсу. *Сучасні технології розвитку комп'ютеризованих систем керування рухом: збірн. тез доп. наук.-техн. конф.*, Київ, НАУ, 2022, С. 39-41.
7. Тунік А. А., Сущенко О. А., Азарсков В. М. Про стабілізацію інформаційно-вимірювальної системи у подвійному кардановому підвісі на борту літального апарату. *Прикладна механіка*. 2022. Т. 58, № 2. С. 103-116. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001344142>
8. Tsiruk V. Development of method of increasing accuracy of measuring angular velocity and acceleration of gyrostabilized platform. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. Vol.4, No. (42), P.11–16. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.140519>
9. Лисенко О.І., Фуртат С.О., Фуртат О.В. Методика синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації стеження за об'єктами сенсорів спрямованої дії мобільних роботів. XVIII Міжн. наук.-техн. конф. «Перспективи телекомунікацій»: збірн. матер. конф., Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024, С.209-211.
10. Balestrieri E., Daponte P., De Vito L., Lamonaca F. Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview. *Sensors*. 2021, Vol. 21, Iss. 4, 1518, DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041518>.
11. Kaustubh S. Pawar, Manoj P. Bauskar A Review Paper on Recent Developments in MEMS Sensors and its Applications in Automobiles. *International Journal of Scientific Development and Research*, 2021, Vol.6, Iss.5, P.58-61. <https://www.ijedr.org/papers/IJSDR2105010.pdf>
12. Бурау Н. І., Вознюк А.І., Цисарж В.В. Система стабілізації та наведення для наземних рухомих об'єктів на базі AHRS. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2016, №29, С. 155-161.
13. Inertial Labs AHRS-10-B-P Datasheet. Режим доступу: https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2024/09/AHRS-10B-10P-Datasheet_rev5.5_Sept_2024.pdf
14. Inertial Labs AHRS-II Datasheet. Режим доступу: https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2024/09/AHRS-10B-10P-Datasheet_rev5.5_Sept_2024.pdf
15. Inertial Labs MiniAHRS Datasheet. Режим доступу: https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2024/09/AHRS-10B-10P-Datasheet_rev5.5_Sept_2024.pdf
16. Advanced Navigation Certus-Mini-A Datasheet. Режим доступу: <https://www.advancednavigation.com/downloads/latest/certus-mini-a/Certus-Mini-A-Datasheet-v1.0.pdf>
17. VectorNAV VN-100 Datasheet. Режим доступу: https://www.vectornav.com/docs/default-source/product-brief/vn-100-product-brief.pdf?sfvrsn=a2a5ae5f_2
18. VectorNAV VN-110 Datasheet. Режим доступу: https://www.vectornav.com/docs/default-source/product-brief/vn-110-product-brief.pdf?sfvrsn=b7077cbf_2

19. MicroStrain 3DM-GV7-AHRS Datasheet. Режим доступу: https://microstrain.com/sites/default/files/3DM%20GV7%20Data%20Sheet_0.pdf
20. MicroStrain 3DM-GX5-AHRS Datasheet. Режим доступу: <https://microstrain.com/sites/default/files/GX5%20AHRS.pdf>
21. M. Deepak, C. Bharatiraja, Lucian Mihet-Popa. A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, P.54833-54869. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9774372>
22. GM110-8 Gimbal Motor w/ Encoder. Режим доступу: <https://shop.iflight.com/ipower-motor-gm110-8-gimbal-motor-with-as5048a-encoder-pro242?srsId=AfmBOor8g99AFixycV-lxOLwABrgrixWZ5BHc7cdRv8q6ogdfGNZvkEt>
23. CubeMars Robot Dynamics R-Series. Режим доступу: <https://www.mybotshop.de/CubeMars-Robot-Dynamics-R-Series>
24. FCP-060 Series. Режим доступу: <https://www.linengineering.com/products/brushless-motors/frameless-bldc-motors/fcp-060-series>
25. Myactuator X4-3. Режим доступу: <https://www.myactuator.com/downloads-x-series>
26. STM32 F103RG. Режим доступу: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103rg.pdf>

References

1. Rubio F., Valero F., Liopis-Albert C. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019. No.2. P. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>
2. Osovtsev A.V. Classification of multipurpose mobile robots. XVI Vseukrainska nauk.-pract. conf. studentiv, aspirantiv ta molodyh vchenyh "Pogliad u maibutnie pryladobuduvannia": zbirn prac, Kyiv, 2023, P.29-32.
3. Bouraou N.I., Osovtsev A.V. Analysis of the efficiency of the equipment stabilization of a mobile mini-robot on ground with a complex profile. *Scientific notes of V.I. Vernadskyi TNU. Series: Technical sciences* 2023, Vol. 34 (73), No.5, P. 99-107. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/17>
4. Bouraou N.I., Osovtsev A.V. Modeling of the stabilization system of mobile robot equipment in the conditions of movement on terrain with slopes and unevenness. *Electronic Modeling*. 2024, No.3(46), C. 114-125. <https://doi.org/10.15407/emodel.46.03.114>
5. Aleksandrov Y., Vanin V., Aleksandrova T., Vanin B. Parametric synthesis of a moving object stabilizer. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technologies*. 2021, No. 1-2 (2), P. 10-19. <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2021.02.02>
6. Sushchenko O.A. Parametric synthesis of the system of stabilization and course determination. *Suchasni technologii rozvytku komputeryzovanyh system keruvannia ruhom: zbirn. tez dop. nauk.-tehn. conf.*, Kyiv, NAU, 2022, P. 39-41.
7. Tunik A.A., Sushchenko O.A., Azarskov V.M. On Stabilization of the Information-measuring System in the Biaxial Gimbal on Board the Aircraft. *International Applied Mechanics*. 2022, Vol. 58, No. 2, P.103-116. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001344142>
8. Tsiruk V. Development of method of increasing accuracy of measuring angular velocity and acceleration of gyrostabilized platform. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. Vol.4, No. (42), P.11-16. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.140519>
9. Lysenko O.I., Furtat S.O., Furtat O.V. The method of synthesis of digital regulators of precision electric drives for the system of orientation and stabilization of tracking objects of sensors of directional action of mobile robots. *XVIII Mizshn. nauk.-tehn. conf. "Perspektyvy telekomunikacij": zbirn. mater. conf.*, Kyiv, 2024, P. 209-211.
10. Balestrieri E., Daponte P., De Vito L., Lamonaca F. Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview. *Sensors*. 2021, Vol. 21, Iss. 4, 1518, DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041518>.
11. Kaustubh S. Pawar, Manoj P. Bauskar A Review Paper on Recent Developments in MEMS Sensors and its Applications in Automobiles. *International Journal of Scientific Development and Research*, 2021, Vol.6, Iss.5, P.58-61. <https://www.ijdsr.org/papers/IJSDR2105010.pdf>
12. Bouraou N.I., Vozniuk A. V., Tsisarzh V.V. Stabilization and pointing system for land moving objects based on AHRS. *Tehnika v silskogospodarskomu vyrobnytstvi, galuzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*. 2016, No. 29, P. 155-161.
13. Inertial Labs AHRS-10-B-P Datasheet. Available: https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2024/09/AHRS-10B-10P-Datasheet_rev5.5_Sept_2024.pdf
14. Inertial Labs AHRS-II Datasheet. Available: https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2024/09/AHRS-10B-10P-Datasheet_rev5.5_Sept_2024.pdf
15. Inertial Labs MiniAHRS Datasheet. Available: https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2024/09/AHRS-10B-10P-Datasheet_rev5.5_Sept_2024.pdf
16. Advanced Navigation Certus-Mini-A Datasheet. Available: <https://www.advancednavigation.com/downloads/latest/certus-mini-a/Certus-Mini-A-Datasheet-v1.0.pdf>
17. VectorNAV VN-100 Datasheet. Available: https://www.vectornav.com/docs/default-source/product-brief/vn-100-product-brief.pdf?sfvrsn=a2a5ae5f_2
18. VectorNAV VN-110 Datasheet. Available: https://www.vectornav.com/docs/default-source/product-brief/vn-110-product-brief.pdf?sfvrsn=b7077cbf_2
19. MicroStrain 3DM-GV7-AHRS Datasheet. Available: https://microstrain.com/sites/default/files/3DM%20GV7%20Data%20Sheet_0.pdf
20. MicroStrain 3DM-GX5-AHRS Datasheet. Available: <https://microstrain.com/sites/default/files/GX5%20AHRS.pdf>
21. M. Deepak, C. Bharatiraja, Lucian Mihet-Popa. A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, P.54833-54869. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9774372>
22. GM110-8 Gimbal Motor w/ Encoder. Режим доступу: <https://shop.iflight.com/ipower-motor-gm110-8-gimbal-motor-with-as5048a-encoder-pro242?srsId=AfmBOor8g99AFixycV-lxOLwABrgrixWZ5BHc7cdRv8q6ogdfGNZvkEt>
23. CubeMars Robot Dynamics R-Series. Available: <https://www.mybotshop.de/CubeMars-Robot-Dynamics-R-Series>
24. FCP-060 Series. Available: <https://www.linengineering.com/products/brushless-motors/frameless-bldc-motors/fcp-060-series>
25. Myactuator X4-3. Available: <https://www.myactuator.com/downloads-x-series>
26. STM32 F103RG. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103rg.pdf>