

УДК 62-566/822

**НАПРЯМИ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕГРОВАНІХ ІНЕРЦІЙНИХ МОДУЛІВ ДЛЯ
КЕРУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИМ ПРИВОДОМ ВІДВАЛА АВТОГРЕЙДЕРА**

Канд. техн. наук А. О. Бабенко, асп. Н. В. Кузьмяк

**DIRECTIONS OF APPLICATION OF INTEGRATED INERTIA MODULES FOR
CONTROLLING THE HYDRAULIC DRIVE OF THE MOTOR GRADER BUCKET**

PhD (Tech.) A. Babenko, Postgraduate Student N. Kuzmiak

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362407>



Анотація. У статті розглянуто підхід щодо підвищення точності та стійкості керування відвалом автогрейдера через інтеграцію інерційних вимірювальних модулів (IMU) безпосередньо в конструкцію відвала. Проаналізовано сучасні системи автоматизованого керування відвалом, що базовані на GNSS- та IMU-технологіях, а також виявлено їхні обмеження, пов'язані з розміщенням датчиків на рамі машини або щоглах, чутливістю до

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Бабенко А. О., Кузьмяк Н. В., 2026.

втрати супутникового сигналу і вразливістю до механічних пошкоджень. Запропоновано структурну схему системи стабілізації відвала з локальним ІМУ, який вимірює просторові кути орієнтації та лінійні прискорення відвала. Сформовано математичні співвідношення для визначення просторового положення ріжучої кромки відвала за даними ІМУ, ходу гідроциліндрів і навігаційної системи. Описано алгоритм роботи замкненої системи керування, у якій відхилення від проєктної поверхні компенсують зміни положення відвала за допомогою гідропривода. Показано, що інтеграція ІМУ безпосередньо у відвал дає змогу підвищити точність витримування поздовжнього та поперечного уклонів, зменшити вплив люфтів у кінематичних ланцюгах і покращити рівномірність зношування ріжучої кромки. Сформульовано основні переваги і обмеження запропонованого підходу, а також намічено напрями подальших досліджень.

Ключові слова: автогрейдер, відвал, гідравлічний привод, інерційний вимірювальний модуль (ІМУ), стабілізація, система керування, GNSS.

Abstract. The paper presents an approach to improving the accuracy and robustness of motor grader blade control by integrating inertial measurement units (IMU) directly into the blade structure. Modern automated blade-control solutions based on GNSS and IMU technologies are reviewed, and their practical limitations are identified, including sensitivity to kinematic backlash in the frame-circle-blade chain, dependence on satellite signal quality in partially obstructed environments, and vulnerability of external mounting components to vibration and impact loads. A structural control scheme is proposed in which a blade-mounted IMU acts as a local orientation reference and provides high-rate angular and linear motion data for closed-loop stabilization. Mathematical relationships are formulated for estimating cutting-edge position in global coordinates using fused IMU measurements, hydraulic-cylinder stroke data, and navigation inputs. The control workflow includes state estimation, generation of height and slope error signals relative to the design surface, and computation of hydraulic commands subject to smoothness and actuator-saturation constraints. The expected engineering effect of the proposed architecture is improved longitudinal and cross-slope tracking, lower sensitivity to structural compliance and joint wear, and more stable blade behavior in transient operating modes. Implementation requirements are also outlined, including protected sensor placement, calibration procedures, and compensation of drift under temperature and vibration disturbances. The proposed concept can serve as a practical basis for further simulation and field validation of grader blade stabilization systems. The approach is intended to support repeatable grading quality, reduce corrective passes, and improve overall site productivity.

Keywords: motor grader, blade, hydraulic drive, inertial measurement unit (IMU), stabilization, control system, GNSS.

Вступ. Автогрейдери належать до основних дорожньо-будівельних машин, призначених для формування і планування профілю земляного полотна, узбіч та інших елементів дорожніх і будівельних об'єктів. Якість виконання планувальних робіт переважно визначають точністю витримування положення відвала відносно проєктної поверхні.

У сучасній практиці все частіше застосовують автоматизовані системи 3D-

контролю відвала, що ґрунтовані на високоточних GNSS-приймачах та інерційних вимірювальних блоках (ІМУ). Такі системи (Trimble Earthworks, CHCNAV TG63, FJD H36, eMG30 тощо) забезпечують автоматичне керування відвалом у тривимірному просторі, підвищують продуктивність і зменшують потребу в геодезичній розбивці [1, 2].

Водночас за більшості серійних рішень встановлюють ІМУ на рамі машини

або кабіни, а GNSS-антени – на даху кабіни або щоглах, закріплених до відвала. Це збільшує довжину кінематичного ланцюга «датчик – відвал», робить систему чутливою до люфтів, деформацій і вібрацій, а також ускладнює роботу в умовах обмеженого або нестабільного супутникового сигналу.

Тому актуальним є дослідження можливості безпосередньої інтеграції інерційних модулів у відвал автогрейдера з метою підвищення ефективності системи його стабілізації та керування.

Аналіз існуючих систем автоматизованого керування відвалом автогрейдера. Повністю автоматизовані системи керування відвалом землерийних машин формують положення робочого органу

відповідно до цифрової моделі місцевості, використовуючи інформацію GNSS (часто з RTK-корекціями), датчики кута повороту, ходу гідроциліндрів, IMU та інші сенсори. Сучасні промислові системи для автогрейдерів, зокрема CHCNAV TG63, Trimble Earthworks і FJD H36, забезпечують:

– використання двох GNSS-антен для визначення положення та курсу машини, як показано на рис. 1;

– застосування IMU на корпусі для компенсації динамічних похибок і вібрацій, як показано на рис. 2;

– автоматичне керування гідроприводами підймання, опускання та нахилу відвала на основі заданої 3D-поверхні та виміряного положення машини.

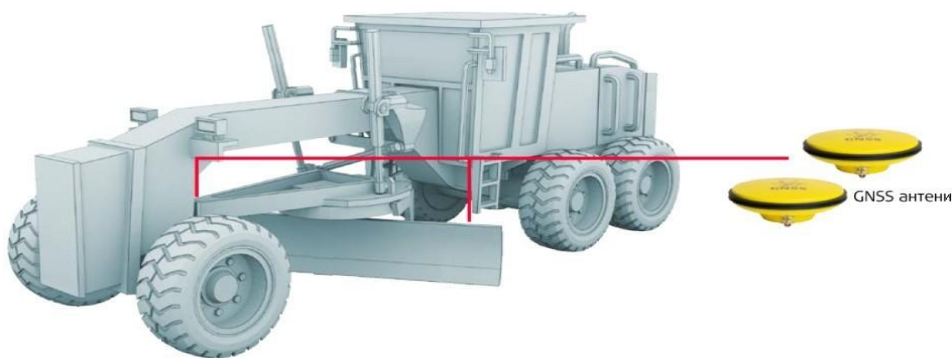


Рис. 1. Приклад використання двох GNSS-антен [3]

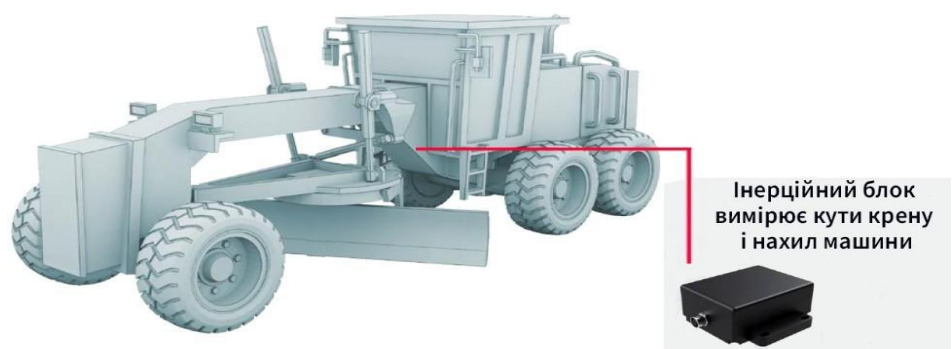


Рис. 2. Приклад застосування IMU на корпусі машини

Крім готових рішень, розробляють науково-технічні підходи, спрямовані на вдосконалення динаміки систем керування

робочими органами машин, включаючи вдосконалення алгоритмів регулювання та

оцінювання якості стабілізації в умовах випадкових збурень [4].

Разом із тим аналіз показує деякі характерні обмеження.

Розміщення IMU на рамі машини. Для обчислення положення відвала використовують геометричну модель кінематичного ланцюга (рама – поворотний круг – відвал). Будь-які люфти, пружні деформації або знос шарнірів призводять до додаткових похибок.

Щогли для GNSS-антен. У системах попередніх поколінь антени встановлювали безпосередньо на відвалі на високих щоглах, що збільшувало масу та інерційність системи і підвищувало ризик механічних пошкоджень [5].

Залежність від GNSS-сигналу. У зонах із затіненням (кар'єри, міська забудова, лісові масиви) можливі втрати або деградація сигналу, що зменшує точність і змушує оператора переходити в ручний режим.

Ці фактори стимулюють пошук архітектур систем стабілізації, у яких основний датчик орієнтації розміщений безпосередньо на відвалі.

Постановка задачі та мета дослідження. Об'єкт дослідження – процес керування робочим органом (відвалом) будівельних машин, що виконує земляні роботи.

Предмет дослідження – структура і параметри системи стабілізації відвала автогрейдера з інтегрованим інерційним вимірювальним модулем у конструкції відвала; механізми впливу методів, алгоритмів і технічних засобів керування на підвищення точності позиціонування і стабілізації відвалу.

Мета дослідження – розробити концепцію інтегрованої системи керування відвалом будівельних машин, яка забезпечує підвищення точності, зменшення витрат пального та скорочення часу виконання земляних робіт.

Для досягнення поставленої мети вирішували такі завдання:

– аналізували особливості роботи існуючих GNSS/IMU-систем керування відвалом і їхні обмеження;

– запропонували структурну схему системи стабілізації відвала з IMU, вбудованим у відвал;

– розробляли математичну модель просторового положення відвала з урахуванням даних IMU, сенсорів ходу гідроциліндрів і навігаційної системи;

– сформулювали алгоритм функціонування замкненої системи керування відвалом;

– оцінили очікуваний технічний ефект від інтеграції IMU у відвал і визначили основні обмеження і напрями подальших досліджень.

Структурна схема системи стабілізації відвала з інтегрованим IMU. Запропонована система містить такі основні елементи:

1. Інерційний вимірювальний модуль (IMU), вбудований у корпус відвала в зоні, максимально наближеній до ріжучої кромки (із захистом від ударів і абразивного зношування). IMU вимірює кутові швидкості та лінійні прискорення у трьох осях, що допомагає визначити кути тангажу, крену та, за необхідності, ризику.

2. GNSS-приймач(і), встановлений(і) на даху кабіни або рамі автогрейдера, що забезпечує(ють) визначення координат машини та її курсу.

3. Датчики положення гідроциліндрів підймання і опускання відвала (лівої та правої сторін), а також, за потреби, гідроциліндрів нахилу та зсуву.

4. Гідравлічний привод відвала з пропорційними чи сервоклапанами, керованими електронним блоком.

5. Електронний блок керування (контролер), який виконує фільтрацію та злиття даних (sensor fusion), реалізує алгоритми регулювання та формує сигнали керування гідроприводом.

6. Людино-машинний інтерфейс (НМІ) у кабіні оператора з відображенням фактичного і проєктного профілю, режимів роботи і діагностичної інформації.

Особливістю запропонованої схеми на рис. 3 є використання IMU як «локального еталона» орієнтації відвала, що дає змогу зменшити роль кінематичної моделі шарнірів і конструктивних деформацій. При

цьому GNSS використовують переважно для прив'язки відносного положення відвала до глобальної системи координат (проектна поверхня).

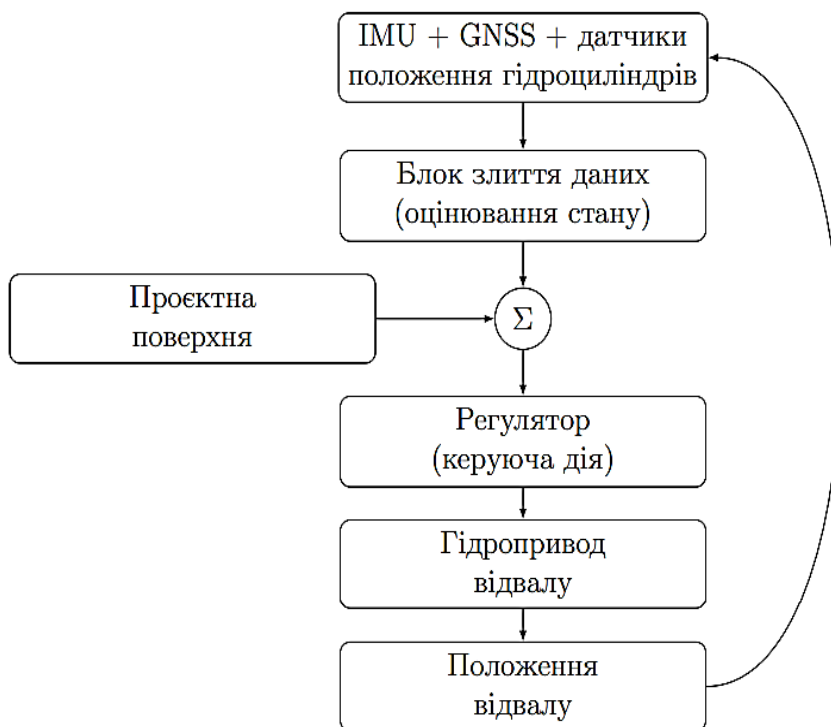


Рис. 3. Спрощена блок-схема системи стабілізації відвала з інтегрованим IMU

Математична модель просторового положення відвала з IMU. Розглянемо декартову систему координат, пов'язану з рамою автогрейдера, і локальну систему координат відвала. Орієнтація відвала відносно рами описана матрицею повороту R_b , що визначено кутами крену (ROLL) φ , тангажу (PITCH) θ і курсу (HEADING) ψ :

$$R_b = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\varphi). \quad (1)$$

Оцінки кутів φ , θ , ψ отримують із сигналів IMU за допомогою фільтра Калмана чи комплементарного фільтра, який об'єднує дані гіроскопів і акселерометрів з урахуванням гравітації (рис. 4) [8, 9].

Положення характерної точки ріжучої кромки (наприклад середини ножа) у глобальній системі координат визначено виразом

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + R_m \mathbf{d}_m + R_b \mathbf{d}_b, \quad (2)$$

де \mathbf{r}_0 — вектор положення базової точки рами автогрейдера у глобальній системі (за даними GNSS);

R_m — матриця повороту рами відносно глобальної системи (за курсом і нахилами машини);

\mathbf{d}_m — радіус-вектор від базової точки рами до поворотного круга;

\mathbf{d}_b — радіус-вектор від поворотного круга до характерної точки відвала в його локальній системі.

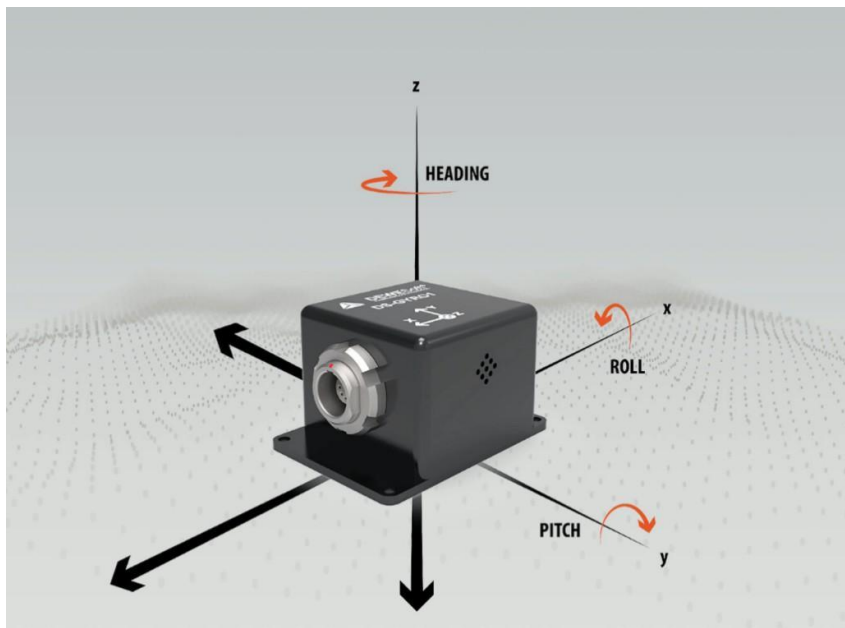


Рис. 4. Просторова чутливість IMU [6]

Величина d_b залежить від ходу гідроциліндрів підймання та нахилу відвала, які вимірюють відповідними датчиками. Отже, IMU дає «жорстке» вимірювання орієнтації відвала, а GNSS і датчики ходу — прив'язку до глобальних координат і контролю глибини різання.

Відхилення від проєктної поверхні в точці \mathbf{r} визначають як

$$e = z(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - z_{\text{proj}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \quad (3)$$

де z — фактична висота ріжучої кромки;

z_{proj} — висота проєктної поверхні в цих координатах.

На рис. 5 наведено порівняльні значення відхилення e для варіантів звичайної системи керування та системи з інтегрованим IMU.

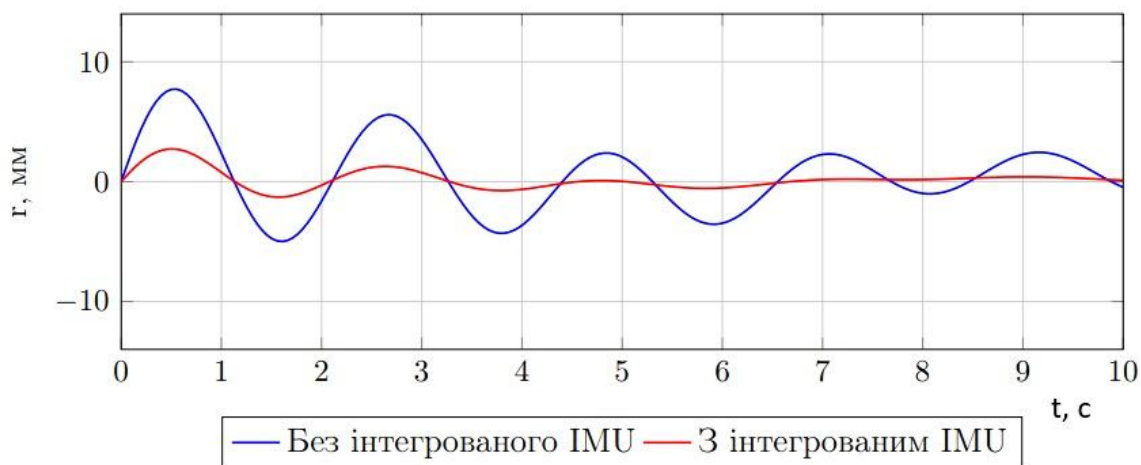


Рис. 5. Порівняльні графіки очікуваного відхилення r із часом

Алгоритм функціонування системи стабілізації відвала. На основі побудованої моделі сформульовано алгоритм роботи системи стабілізації:

1. Зчитування сенсорної інформації. Електронний блок отримує у реальному часі дані IMU (кутові швидкості та прискорення), GNSS-координати, хід гідроциліндрів, тиск у гідролініях тощо.

2. Оцінювання стану. На цьому етапі реалізовано алгоритм злиття даних, який допомагає отримати оцінки орієнтації відвала та положення ріжучої кромки у глобальній системі координат. Для врахування випадкових збурень і шумів можна застосовувати підходи щодо аналізу якості систем стабілізації в стохастичних умовах [4].

3. Формування сигналу помилки. Визначають вектор помилки e , що включає:

- відхилення за висотою від проектної поверхні;
- відхилення поперечного та поздовжнього уклонів;
- за потреби – обмеження за кутами і швидкостями.

4. Обчислення керуючої дії. Для гідроприводів підймання, нахилу та зсуву відвала можна застосовувати ПД-регулятори з корекцією параметрів або більш складні регулятори з компенсацією збурень [10, 11]. Ураховують обмеження за швидкістю зміни сигналу керування (для забезпечення плавності) і насичення клапанів.

5. Формування команд гідропривода. Сформовані сигнали керування надсилають на пропорційні клапани гідросистеми, що змінюють положення відвала так, щоб зменшити вектор помилки.

6. Перемикання режимів. Передбачена можливість безударного (bumpless) переходу між автоматичним і ручним керуванням відвалом, що важливо для безпеки та зручності оператора [12].

Запропонована структура дає змогу реалізувати багатовимірну систему

керування, у якій IMU на відвалі є одним із головних джерел інформації про стан об'єкта.

Оцінювання очікуваного ефекту від інтеграції IMU у відвал. На основі аналізу роботи існуючих систем і властивостей IMU можна виділити такі очікувані переваги інтеграції інерційного модуля безпосередньо у відвал:

– підвищення точності стабілізації. Локальне вимірювання орієнтації відвала зменшує вплив люфтів і деформацій кінематичного ланцюга між рамою та відвалом, що особливо важливо для роботи на нерівних і жорстких ґрунтах;

– поліпшення роботи в динамічних режимах. Висока частота вимірювань IMU (до сотень герців) дає змогу оперативно реагувати на зміни рельєфу та вібрації машини, підвищуючи якість перехідних процесів у системі стабілізації;

– зменшення залежності від GNSS. У режимі часткової втрати супутникового сигналу система може підтримувати орієнтацію відвала на основі IMU та інтерполяції даних, що підвищує стійкість роботи;

– покращення рівномірності зношування робочого органу. Стабільне витримання глибини різання та уклонів зменшує локальні перевантаження і сприяє більш рівномірному зносу ріжучої кромки. Аналіз процесів ударно-абразивного зношування робочих органів дорожньо-будівельних машин підтверджує важливість рівномірного навантаження для підвищення довговічності [7].

Водночас існують такі обмеження та виклики:

– необхідність захисту IMU від ударів, абразивного зношування та вологи (бронекорпус, демпфування вібрацій, герметизація);

– вплив температурних і вібраційних навантажень на дрейф сенсорів;

– потреба в процедурі калібрування IMU після монтажу на відвал і періодичній перевірці параметрів;

– збільшення вартості системи та вимоги щодо кваліфікації персоналу, який обслуговує електронні компоненти.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на моделювання динаміки системи «автогрейдер – ґрунт» із урахуванням IMU на відвалі, розроблення структур регуляторів, оптимізованих під стохастичні збурення, а також експериментальну верифікацію на лабораторних стендах або віртуальних випробувальних полігонах.

Висновки

1. Проаналізовано сучасні системи автоматизованого керування відвалом автогрейдера, у яких IMU переважно встановлюють на рамі машини, а GNSS-антени – на кабіні або щоглах, закріплених на відвалі. Виявлено обмеження, пов'язані з люфтами і деформаціями кінематичного ланцюга, а також залежністю від якості GNSS-сигналу.

2. Запропоновано концепцію системи стабілізації відвала автогрейдера з інтегрованим у відвал інерційним вимірювальним модулем, що є основним

джерелом інформації про орієнтацію відвала у просторі.

3. Побудовано узагальнену математичну модель визначення просторового положення ріжучої кромки відвала на основі даних IMU, GNSS і сенсорів положення гідроциліндрів.

4. Сформовано алгоритм функціонування замкненої системи керування відвалом, який забезпечує автоматичну компенсацію відхилень від проектної поверхні та підтримання заданих уклонів.

5. Показано, що інтеграція IMU у відвал потенційно дає змогу підвищити точність стабілізації, покращити стійкість до динамічних збурень і сприяє більш рівномірному зношуванню робочого органу, хоча потребує додаткових заходів із захисту сенсорів і їх калібрування.

6. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого розроблення та дослідження систем автоматизованого керування відвалом автогрейдера в умовах будівельного майданчика.

Список використаних джерел

1. CHCNAV TG63. (2023). *3D Grade Control for Motor Graders*. Product brochure. CHC Navigation.
2. Trimble Earthworks for Graders. (2022). *3D grade control system for motor graders*. Trimble Inc.
3. NVS Navigation. *Автопілот / системи 3D нівелювання для спецтехніки*. URL: <http://autopilot.nvs-ts.com.ua/> (дата звернення: 10.03.2026).
4. Зозуля, В. А., Осадчий, С. І. (2024). Алгоритм аналізу якості систем стабілізації при стохастичних умовах функціонування. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, 4, 11–19. DOI: 10.31649/2307-5376-2024-4-11-19
5. *Automatic blade control system for a motor grader*: WO 2017061888 A1 / AU 2015411377 A1. (2017), 18. URL: WIPO PATENTSCOPE
6. ALTEM. *Рішення для 3D нівелювання та автоматизації будівельної техніки*. URL: <https://altem.com.ua/> (дата звернення: 10.03.2026).
7. Савуляк, В. І., Гримашевич, В. О. (2024). Аналіз процесів ударно-абразивного зношування робочих органів дорожньо-будівельних машин. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, 4, 114–120. DOI: 10.31649/2307-5376-2024-4-114-120
8. Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2nd ed. Artech House.

9. Grewal, M. S. & Andrews, A. P. (2015). *Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB*. 4th ed. Wiley.
10. Åström, K. J. & Murray, R. M. (2008). *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press.
11. Åström, K. J. & Hagglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
12. Kothare, M. V., Campo, P. J., Morari, M. & Nett, C. N. (1994). A unified framework for the study of anti-windup designs. *Automatica*, 30(12), 1869–1883.

References

1. CHCNAV TG63. (2023). *3D Grade Control for Motor Graders*. Product brochure. CHC Navigation.
2. Trimble Earthworks for Graders. (2022). *3D grade control system for motor graders*. Trimble Inc. [in English].
3. NVS Navigation. *Avtopilot / systemy 3D niveluvannya dlya spetsychnykh [Autopilot/ 3D levelling systems for heavy machinery]*. Retrieved from: <http://autopilot.nvs-ts.com.ua/> (accessed on 10.03.2026) [in Ukrainian].
4. Zozulya, V. A., & Osadchyy, S. I. (2024). Algoritm analizu yakosti system stabilizatsii pry stokhastychnykh umovakh aunktsionuvannya [An algorithm for analysing the quality of stabilisation systems under stochastic operating conditions]. *Research publications of Vinnitsa National Technical University*, 4, 11–19. DOI: 10.31649/2307-5376-2024-4-11-19 [in Ukrainian].
5. *Automatic blade control system for a motor grader*: WO 2017061888 A1 / AU 2015411377 A1. (2017). 18. Access mode: WIPO PATENTSCOPE [in English].
6. ALTEM. *Rishennya dlya 3D niveluvannya ta avtomatyzatsii budivelnnoi tekhniki [Solutions for 3D levelling and the automation of construction machinery]*. Access mode: <https://altem.com.ua/> (accessed on 10.03.2026) [in Ukrainian].
7. Savulyak, V. I. & Gtymashevich, V. O. (2024). Analiz protsesiv udarno-abrazyvnogo znoshuvannya robochykh organiv dorogno-budivelnnykh mashyn [Analysis of impact-abrasive wear processes in the working parts of road construction machinery]. *Research publications of Vinnitsa National Technical University*, 4, 114–120. DOI: 10.31649/2307-5376-2024-4-114-120 [in Ukrainian].
8. Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2nd ed. Artech House [in English].
9. Grewal, M. S. & Andrews, A. P. (2015). *Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB*. 4th ed. Wiley [in English].
10. Åström, K. J. & Murray, R. M. (2008). *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press [in English].
11. Åström, K. J. & Hagglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society [in English].
12. Kothare, M. V., Campo, P. J., Morari, M. & Nett, C. N. (1994). A unified framework for the study of anti-windup designs. *Automatica*, 30(12), 1869–1883 [in English].

Бабенко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. Тел.: +38 (097) 000-93-97. E-mail: babenko_sprpm@ukr.net.

Кузьмяк Назарій Васильович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-8110-7191. Тел.: +38(095)577-43-88. E-mail: nazariy.kuzmyak@gmail.com.

Babenko Andrii, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. Tel.: +38 (097) 000-93-97. E-mail: babenko_spprm@ukr.net.

Kuzmiak Nazarii Vasylovych, Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-8110-7191. Tel.: +38(095)577-43-88. E-mail: nazariy.kuzmyak@gmail.com.

Дата надходження статті 11.03.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 13.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY