

УДК 621.317

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/17>**Бурау Н.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Осовцев А.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ МОБІЛЬНОГО МІНІ-РОБОТА НА МІСЦЕВОСТІ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОФІЛЕМ

Статтю присвячено розробці системи стабілізації та наведення обладнання (цифрові камери, радары, антени, лазерні далекоміри, оптико-електронні модулі різного призначення), встановленого на малорозмірних наземних мобільних роботах колісного типу. Такі об'єкти мають проблеми у подоланні перешкод під час руху по місцевості зі складним профілем, по бездоріжжю, піщаних та в'язких поверхнях, тому системи стабілізації повинні забезпечити ефективне використання встановленого обладнання у широкому діапазоні швидкостей руху, умов та профілю місцевості.

В роботі проведено моделювання збурень, які впливають на встановлене обладнання при русі мобільного робота місцевістю зі складним профілем нерівностей. Згенеровано випадкові збурення для різних класів доріг, та з додатковими імпульсними збуреннями. Для дослідження розроблено схему моделювання системи стабілізації в пакеті Matlab Simulink. Проведено дослідження системи, побудованої за базовою схемою, та з введеним ПІ-регулятором. Отримано часові реалізації реакції системи стабілізації на згенеровані випадкові збурення, визначено їх спектральні щільності потужності, середньоквадратичні відхилення значень вихідної величини, визначено максимальне значення кута відхилення місця встановлення обладнання від площини горизонту, як максимальної похибки стабілізації. Проведено порівняльний аналіз максимальної похибки стабілізації, отриманої для різних профілей місцевості руху та для різних схем побудови системи стабілізації. Встановлено, що система з ПІ-регулятором забезпечує прийнятне значення похибки стабілізації для усіх розглянутих типів збурень. Отримані результати будуть використані для розробки адаптивної цифрової системи стабілізації обладнання, встановленого на мобільних роботах.

Ключові слова: мобільні роботи, система стабілізації, моделювання, нерівності, випадкові збурення, похибка стабілізації.

Постановка проблеми. Розвиток робототехніки загалом і мобільної робототехніки зокрема обумовив стрімке впровадження мобільних роботів практично в усіх сферах людського життя та суспільного виробництва, у пошукових та військових місіях [1]. Мобільні роботи (МР) використовуються у різних фізичних середовищах, які характеризуються специфічними умовами експлуатації та динамічним впливом, що обумовлюють особливості руху МР, необхідності долати перешкоди, вимоги стійкості та маневреності. Класифікація МР проводиться за їх призначенням, середовищем експлуатації та основними характеристиками [1; 2]. Для МР основною проблемою і характеристикою є спосіб переміщення, тому в найбільш загальному випадку МР можна класифікувати за типом руху, як: стаціонарні (мані-

пулятори); водні та підводні; наземні (колісні, гусеничні, крокові, гібридні); повітряні (безпілотні літальні апарати). Для кожного з наведених типів, як зазначено в [3], можна виділити клас МР багатоцільового призначення, які можуть застосовуватись для виконання декількох (двох і більше) завдань. Крім того, значного поширення набувають модульні МР, які складається з частин, що мають незалежні функції, але здатні взаємодіяти між собою різними способами, що призводить до іншої конфігурації МР з новими можливостями [4]. Такі властивості реконфігурації забезпечують універсальність, розширюють можливості багатоцільового призначення МР та підвищують їх відмовостійкість.

Серед наземних багатоцільових МР найбільш розповсюдженими є колісні, до переваг яких

відносяться: найдешевша серед інших типів розробка; простота в керуванні та балансуванні; широкий діапазон швидкостей руху; маневреність. Але для таких об'єктів існують певні проблеми у подоланні перешкод під час руху по місцевості зі складним профілем, по бездоріжжю, піщаних та в'язких поверхнях. Значною мірою різноманітність умов та профілю місцевості впливають на ефективність експлуатації мобільних міні-роботів (розміри за трьома вимірами не перевищують 0,5 м). На таких МР багатозначного призначення у якості обладнання можуть встановлюватись цифрові камери, радары, антени, лазерні далекоміри, оптико-електронні модулі різного призначення. Для ефективного використання встановленого обладнання в умовах комплексних збурень, які зумовлені динамікою та типом руху самого рухомого об'єкту, вібрацією, зовнішніми неконтрольованими збуреннями, недоліками встановлення обладнання на об'єкті, необхідно забезпечити його стабілізацію. В якості вимог до точності стабілізації обладнання використовується значення кута відхилення його місця встановлення від площини горизонту [5], яке не повинно перевищувати 0,35 мрад (0,02 градуса). Тому для наземних МР, у тому числі малорозмірних, актуальною лишається проблема вдосконалення існуючих та розробка нових систем стабілізації встановленого обладнання для ефективного використання його під час руху МР у широкому діапазоні швидкостей, умов та профілю місцевості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз шляхів удосконалення існуючих наукових підходів та технічних рішень для створення адаптивної прецизійної цифрової системи стабілізації та наведення обладнання для рухомих об'єктів як морського, так і наземного базування, наведено в [6]. Проаналізовано та обґрунтовано шляхи вдосконалення елементної бази та алгоритмів керування існуючих систем стабілізації та наведення, показано перспективність використання інерційних вимірювальних модулів, побудованих за MEMS технологією, та алгоритмів адаптивного керування з використанням штучних нейронних мереж.

У статті [7] досліджуються методичне, апаратне та алгоритмічне забезпечення, яке використовується для навігації МР, зокрема при русі у різних середовищах та подоланні перешкод. Проведено аналіз моделей датчиків і кінематики робота, розглядаються методи подолання чи огинання стаціонарних та рухомих перешкод, пропонуються алгоритми навігації на основі прогнозування та ковзного режиму керування. Інерційні вимірю-

вальні модулі, побудовані за MEMS технологією, наприклад, AHRS (Attitude and Heading Reference Systems – системи визначення кутового положення), можуть бути основою для створення двовісної системи непрямої стабілізації обладнання на рухомому об'єкті [5]. Сутність непрямого методу стабілізації полягає в перетворенні кутових координат, що характеризують задане положення осі обладнання в земній системі координат, у відповідні кутові координати (параметри стабілізації) в пов'язаній з рухомим об'єктом системі координат для їх подальшого відпрацювання виконавчим механізмом [5]. Це дозволяє використовувати інформацію вимірювального модуля AHRS і для визначення параметрів орієнтації МР і для стабілізації встановленого на ньому обладнання.

В роботі [8] розглянуто основні принципи моделювання системи з цифровим блоком керування, призначеної для стабілізації обладнання наземного рухомого об'єкта. Для неперервних прототипів системи наведено спосіб представлення дискретних одиниць, проаналізовано основні відмінності моделей системи стабілізації на етапах синтезу та аналізу отриманих результатів, за результатами моделювання проаналізовано перехідні процеси по кутовій швидкості, які отримано з різними способами дискретизації.

Варіант побудови цифрової системи стабілізації платформи антенного поля, яка розміщується на рухомому об'єкті, наведено та обґрунтовано у праці [9]. Автори обґрунтовують структурні схеми, вибір параметрів системи, наводять розрахунки кутових швидкостей, моментів інерції, навантажувальних моментів. Запропонована система є багатоканальною і забезпечує необхідні показники якості. А в роботі [10] для забезпечення потрібних параметрів стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, встановлених на рухомому об'єкті, запропоновано структурно-параметричний синтез цифрової системи стабілізації на основі робастного керування. Розроблено алгоритм структурно-параметричного синтезу, наведено результати моделювання синтезованої системи, які підтвердили ефективність розробленого алгоритму.

У статті [11] розглянуто задачу вибору значень змінюваних параметрів стабілізатора рухомого об'єкту для забезпечення мінімуму адитивного квадратичного інтегрального функціоналу, враховуючого комплекс вимог до замкнутої системи стабілізації. Для розв'язання поставленої задачі запропоновано комбінований метод параметричного синтезу стабілізатора, проведено розрахунки

вагових коефіцієнтів, отримано рішення задачі параметричного синтезу, результати якого показують можливість досягнення прийнятної точності стабілізації.

Для забезпечення високих показників точності та швидкодії в системах керування, у тому числі в системах стабілізації, використовуються регулятори, побудовані як на класичних методах теорії автоматичного керування, так і на основі нечіткої логіки та з використанням нейронних мереж. У працях [12; 13] авторами запропоновано та обґрунтовано використання нейромережових регуляторів для досягнення показників якості керування в системах стабілізації. Розроблено структурні схеми, проведено моделювання, виконано програмно-апаратну реалізацію системи керування на мікроконтролері.

Аналіз літературних джерел показав, що проблема стабілізації та наведення різного за своїм призначенням обладнання на рухомих об'єктах є актуальною. При розробці систем стабілізації проводиться аналіз їх динамічних характеристик за звичай при типових вхідних збуреннях. Але рух малорозмірних МР по місцевості складного профілю генерує складні випадкові збурення на місце встановлення обладнання, тому при розробці системи стабілізації важливим етапом є дослідження її реакції не лише на типові, але й на випадкові збурення, які характеризують вплив на об'єкт різних типів та якості дорожнього покриття. В статті [14] проведено дослідження впливу нерівностей доріг на параметри двовісної системи непрямої стабілізації обладнання, що розміщується на гусеничних наземних об'єктах під час руху. Для цього було визначено залежності динамічних характеристик рухомого об'єкту від збурень, що створюються зовнішнім середовищем, зокрема профілем місцевості, та проаналізовано, яким чином зміна факторів зовнішніх збурень впливає на динаміку руху об'єктів стабілізації та параметри системи стабілізації.

У попередній роботі [15] авторами створено модель повно розмірного колісного рухомого об'єкта та виконано моделювання його руху по дорогах з типовими профілями, в результаті визначено динамічні збурення місця встановлення системи стабілізації обладнання, проведено моделювання системи стабілізації та аналіз її реакції на деякі випадкові динамічні збурення, обумовлені типовими нерівностями поверхні руху об'єкта. Але зазначені дослідження потребують подальшого продовження з метою розробки такої системи, яка б забезпечувала стабілізацію встановленого обладнання для ефективного вико-

ристання його під час руху малорозмірних МР у певному діапазоні швидкостей та режимів руху, на пагорбкуватій та пересіченій місцевості з високим ступенем нерівностей і ділянками з неоднорідним ґрунтом та включеннями з різним ступенем щільності.

Метою статті є моделювання та аналіз ефективності системи стабілізації обладнання, встановленого на малорозмірному наземному МР колісного типу, який рухається місцевістю зі складним профілем нерівностей.

Виклад основного матеріалу

Моделювання збурень при русі МР місцевістю зі складним профілем нерівностей

Нерівності доріг чи поверхні руху об'єкта визначаються їх рельєфом, який в літературі розглядається як сукупність реалізацій випадкових поверхонь для твердої ділянки дороги, за якими можна визначити характеристики нерівностей [15; 16]. Профілем дороги є перетин рельєфу в напрямку руху транспортного засобу. Перетин поверхні конкретної ділянки дороги є реалізацією профілю, а сукупність таких реалізацій дозволяє розглядати профіль дороги як випадковий процес. Зазвичай профіль нерівностей доріг описується випадковою функцією висоти нерівностей дороги, яка може залежати від довжини, тобто пройденої відстані, або часу. Висота нерівностей є випадковою величиною, що має нормальний закон розподілу ймовірності. Тоді профіль описується стаціонарним випадковим процесом з нормальним розподілом висоти нерівностей для будь-якого часового перетину чи значення пройденої відстані [15; 16].

Для моделювання профілю дороги застосовувалась класифікація доріг за рівнем нерівностей за стандартом ISO 8608 [14; 15], відповідно до якого випадкові нерівності для різних типів доріг визначені на основі спектральної щільності потужності S_0 , що є функцією просторової частоти (число коливань на 1 метр шляху). Класи доріг та відповідні їм значення рівня нерівностей наведено в табл. 1.

Для моделювання обрано такі три класи доріг (табл. 1): А (дуже добра дорога, рівень нерівностей – 2×10^{-6}); D (погана дорога, рівень нерівностей – 200×10^{-6}); F (дуже складна для руху дорога, рівень нерівностей – 2000×10^{-6}). Моделювання проводилось за умови, що МР рухається з постійною швидкістю, яка дорівнює 5 км/год (1,4 м/с), час моделювання складав 100 с з періодом дискретизації 0,05 с, а пройдений шлях, відповідно склав 140 м. Для обраних класів доріг було згенеровано

реалізації випадкових збурень – випадкових стаціонарних процесів з обмеженим за частотою до 10 Гц спектром.

Таблиця 1
Класифікація доріг за рівнем нерівностей відповідно до стандарту ISO 8608 [14; 15]

Клас дороги	Рівень нерівності, $S_0(\times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{коливання})$
A (дуже добра)	<8
B (добра)	8-32
C (задовільна)	32-128
D (погана)	128-512
E (дуже погана)	512-2048
F	2048-8192
G	8192-32768
H	>32768

Додатково були сформовані комплексні збурення шляхом додаткового внесення в кожну з утворених реалізацій двох прямокутних імпульсних збурень з такими параметрами: величина прямокутного імпульсу 0,1 м; тривалість – 0,5 с (0,7 м). Перший прямокутний імпульс згенеровано у часовому інтервалі 39,45 с – 39,95 с, а другий – у часовому інтервалі 77,65 с – 78,15 с. Приклади сформованих реалізацій збурень та їх спектрів наведено на рис.1 (для профілю класу дороги D) та рис. 2 (для профілю класу дороги D з додатковими двома імпульсними збуреннями).

Таким чином, всього для моделювання системи стабілізації згенеровано 6 типів збурень при русі МР, які обумовлені місцевістю зі складним профілем нерівностей, з яких 3 типи збурень від-

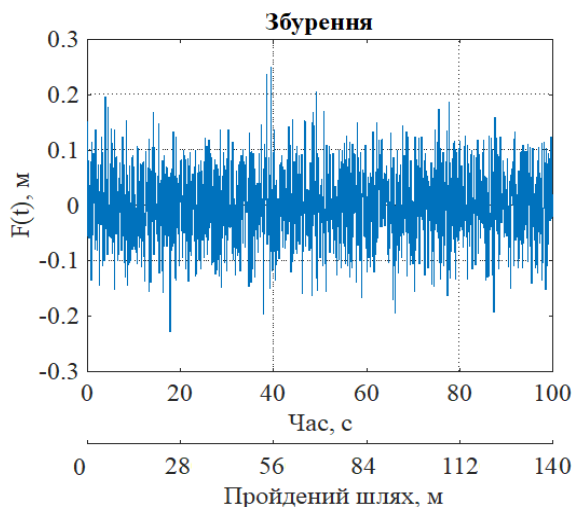
повідають трьом класам доріг (A, D, F) і 3 типи збурень відповідають тим самим класам доріг з двома додатковими імпульсними збуреннями, параметри яких є однаковими для усіх згенерованих реалізацій випадкових збурень.

Моделювання та аналіз реакції системи стабілізації на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта

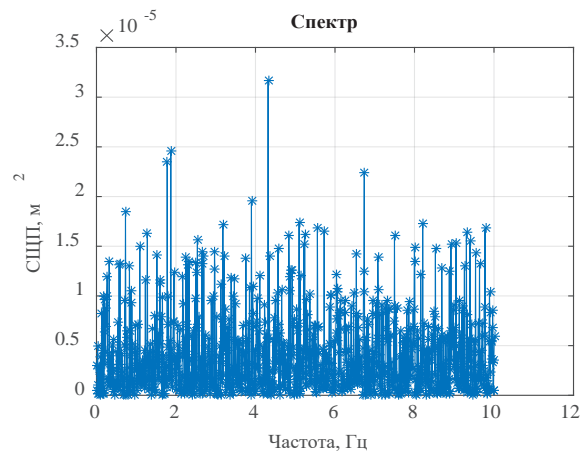
Для моделювання та аналізу ефективності стабілізації обладнання при розглянутих вище збуреннях використано розглянуту в [15] систему стабілізації обладнання, до складу якої входять перетворюючі пристрої, корегуючий пристрій, підсилювач, виконавчий двигун, редуктор. Таку базову структуру (з відповідними параметрами) розроблено для забезпечення потрібних показників стійкості та якості перехідного процесу системи. Для підвищення точності стабілізації до складу системи можуть бути введені регулятори, наприклад, пропорційно-інтегруючий (ПІ) регулятор.

Для моделювання системи в пакеті Matlab Simulink було розроблено схему (рис. 3) з використанням стандартних блоків пакету (Gain, Constant, Integrator, Transfer Fcn, Scope, Sum, Random Number), випадкове збурення задається через канал збурення за допомогою блоку From Workspace Вхідний сигнал є нульовим, тоді реакція системи на збурення буде похибкою системи стабілізації.

Моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення проведено для базової структури системи та структури з ПІ-регулятором (позначений пунктиром на рис.1 блок Izodrom).



а)



б)

Рис. 1. Часова реалізація збурення (а) для профілю класу дороги D та його спектр (б)

В процесі моделювання для кожної розглянутої структури системи стабілізації отримано реакції на сформовані, як було описано вище, 6 типів збурень.

У якості прикладу на рис. 4 наведено результати моделювання системи стабілізації при випадковому збуренні під час руху МР по місцевості з профілем, що відповідає класу дороги D (рис. 1), а на рис. 5 – результати моделювання при випадковому збуренні для профілю того самого класу D з двома додатковими імпульсними збуреннями (рис. 2).

Результати моделювання наведено у вигляді часових реалізацій реакції системи стабілізації $\varphi_{\text{вих}}(t)$ з базовою структурою та з додатково введеним ПІ-регулятором, а також відповідних графіків спектральної щільності потужності реакції системи $S_{\varphi}(f)$, як функції циклічної частоти.

За результатами проведеного моделювання розраховано значення середньоквадратичних відхилень для реалізацій вхідних випадкових збурень σ_F та відповідних вихідних сигналів системи σ_{φ} для розглянутих класів доріг з нерівностями, а також розраховано максимальне значення кута відхилення місця встановлення обладнання від площини горизонту (табл. 2).

Як показали результати моделювання, в загальному випадку досліджувана система є ефективною для стабілізації обладнання, встановленого на МР, які рухаються місцевістю з нерівностями відповідно до розглянутих класів доріг та додаткових збурень.

В умовах руху МР місцевістю з нерівностями відповідно до розглянутих класів доріг та додатко-

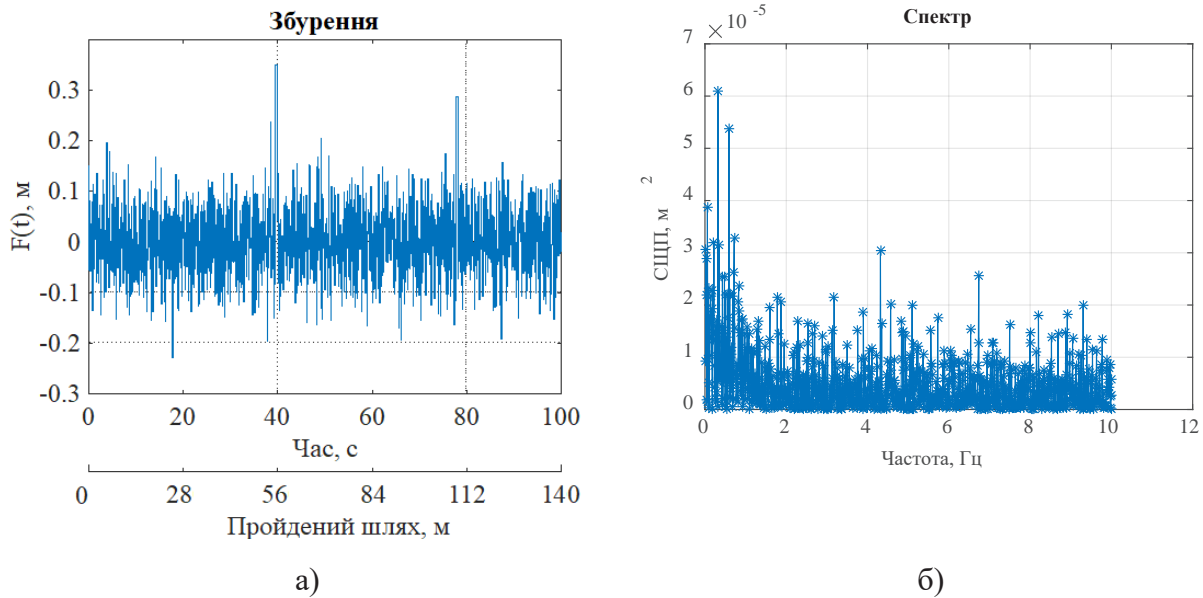


Рис. 2. Часова реалізація збурення (а) для профілю класу дороги D з додатковими двома імпульсними збуреннями та його спектр (б)

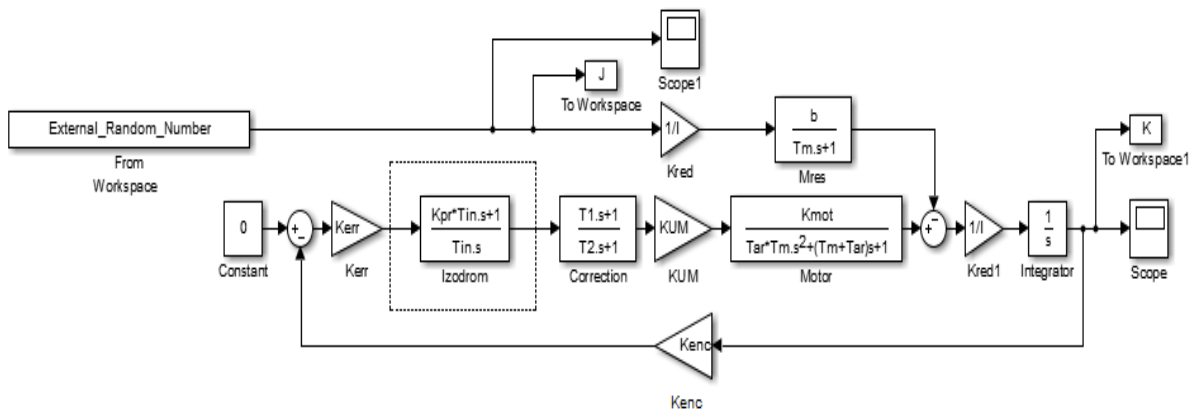


Рис. 3. Схема моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення

Значення середньоквадратичних відхилень для реалізацій вхідних випадкових збурень σ_F та вихідних сигналів системи σ_ϕ , максимальне значення кута відхилення місця встановлення обладнання

Випадкове збурення	Структура системи	$\sigma_F, м$	$\sigma_\phi, м$	Кут відхилення, град
Профіль класу дороги А	Базова	$6,3 \times 10^{-3}$	$1,7615 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-3}$
	з ПІ-регулятором	$6,3 \times 10^{-3}$	$2,1033 \times 10^{-7}$	$2,2549 \times 10^{-4}$
Профіль класу дороги А з імпульсними збуреннями	Базова	$1,36 \times 10^{-2}$	$7,4992 \times 10^{-6}$	$1,91 \times 10^{-2}$
	з ПІ-регулятором	$1,36 \times 10^{-2}$	$3,6266 \times 10^{-7}$	1×10^{-3}
Профіль класу дороги D	Базова	$6,32 \times 10^{-2}$	$1,7615 \times 10^{-5}$	$1,47 \times 10^{-2}$
	з ПІ-регулятором	$6,32 \times 10^{-2}$	$2,1311 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-3}$
Профіль класу дороги D з імпульсними збуреннями	Базова	$7,03 \times 10^{-2}$	$2,6265 \times 10^{-5}$	$5,36 \times 10^{-2}$
	з ПІ-регулятором	$7,03 \times 10^{-2}$	$2,2472 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-3}$
Профіль класу дороги F	Базова	0,1998	$5,5695 \times 10^{-5}$	$4,65 \times 10^{-2}$
	з ПІ-регулятором	0,1998	$6,7452 \times 10^{-6}$	$7,1 \times 10^{-3}$
Профіль класу дороги F з імпульсними збуреннями	Базова	0,2136	$7,3808 \times 10^{-5}$	0.1366
	з ПІ-регулятором	0,2136	$6,9499 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-3}$

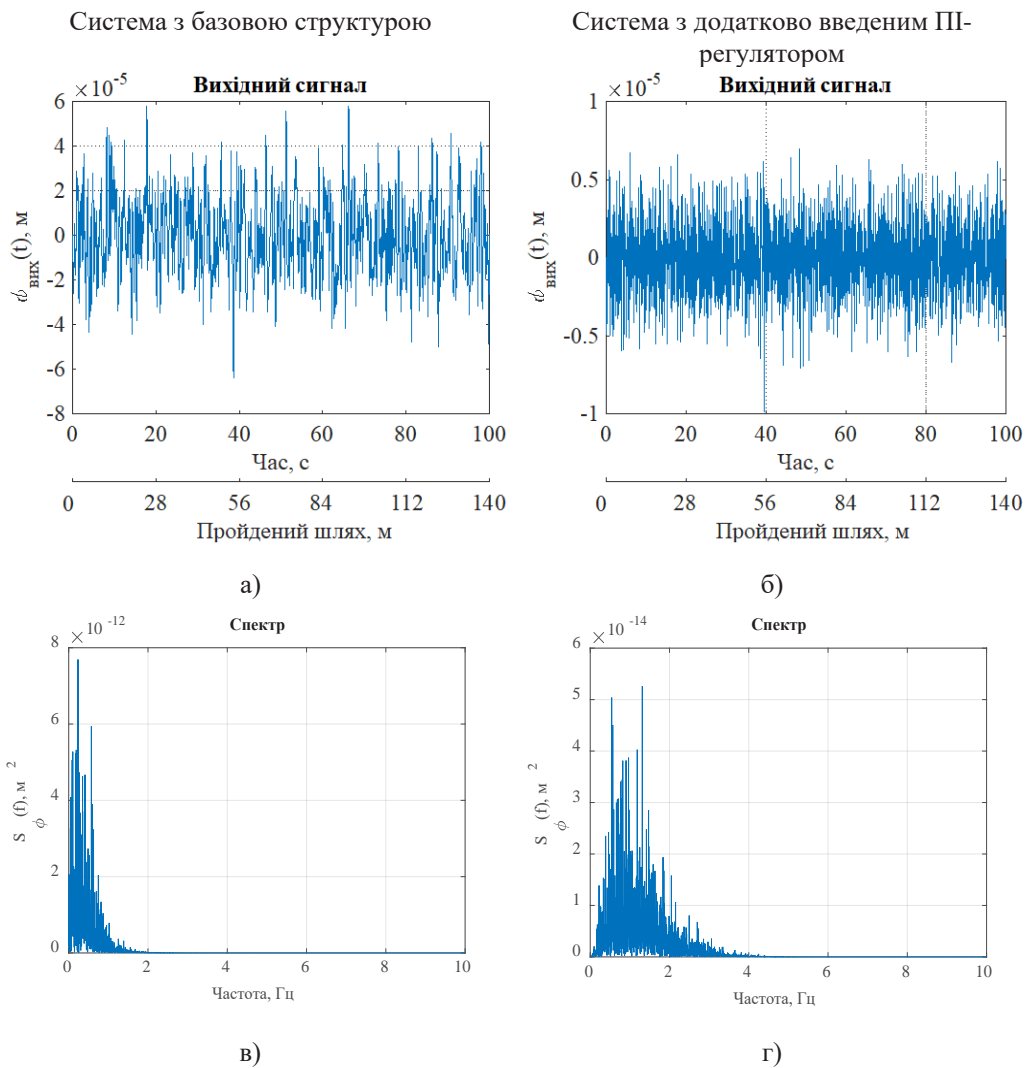


Рис. 4. Результати моделювання системи стабілізації при випадкових збуреннях, обумовлених нерівностями дороги класу D: а) реакція системи з базовою структурою; б) реакція системи з ПІ-регулятором; в) спектр вихідного сигналу системи з базовою структурою; г) спектр вихідного сигналу системи з ПІ-регулятором

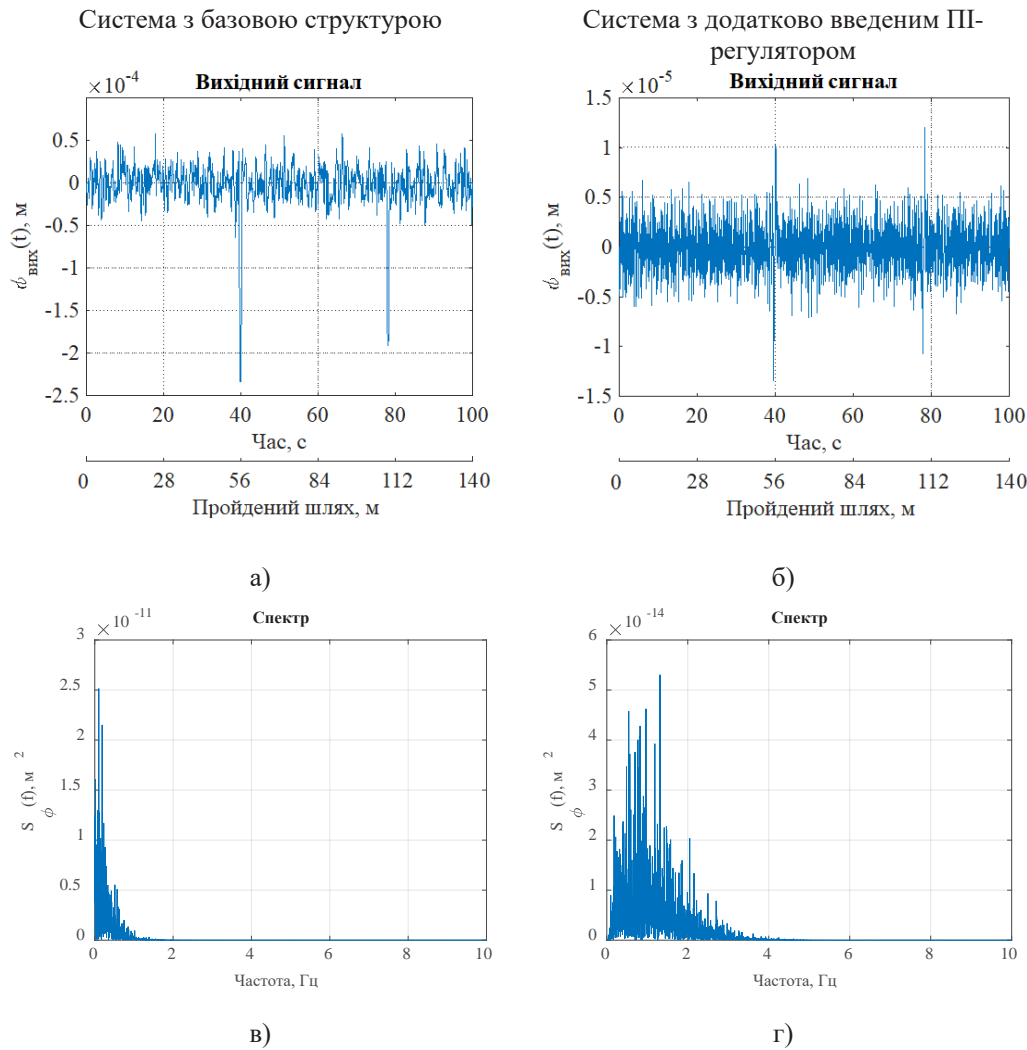


Рис. 5. Результати моделювання системи стабілізації при випадкових збуреннях, обумовлених нерівностями дороги класу D, та з двома додатковими імпульсними збуреннями: а) реакція системи з базовою структурою; б) реакція системи з ПІ-регулятором; в) спектр вихідного сигналу системи з базовою структурою; г) спектр вихідного сигналу системи з ПІ-регулятором

вих збурень, вплив нерівності поверхні руху проявляється як випадкова похибка, спектр якої зосереджений у смузі частот, яка приблизно вдвічі вужча за смугу частот вхідного випадкового збурення, та відрізняється тільки значеннями (зростають відповідно до підвищення рівня нерівностей).

Як видно з наведених в табл. 2 результатів, для базової структури системи стабілізації ефективність стабілізації обладнання стрімко знижується з погіршенням профілю доріг, така система є більш чутливою до комплексних випадкових збурень. Так, вже для збурення, обумовленого рухом МР місцевістю з профілем класу дороги D та з додатковими імпульсними збуреннями, система з базовою структурою не забезпечує допустимого значення кута відхилення місця встанов-

лення обладнання (кут відхилення 0,0536 град. при допустимому значенні 0,02 град.). Введення в систему ПІ-регулятора забезпечує прийнятне максимальне значення похибки стабілізації для усіх розглянутих умов руху МР, така система є менш чутливою до додаткових імпульсних збурень, які можуть бути зумовлені наявністю різких впадин чи пагорбів на розглянутих профілях класів доріг.

Висновки. Розвиток та подальше впровадження багатоцільових мобільних роботів нерозривно пов'язані з розвитком та інтеграцією різних технологічних областей робототехніки для забезпечення пересування, автономної орієнтації та навігації, розширення можливостей сприйняття та інтелектуального керування рухом, підвищення

ефективності засобів зв'язку та систем візуалізації руху. Серед багатьох завдань, які стоять перед розробниками МР, актуальними є завдання підвищення ефективності використання спеціального встановленого на МР обладнання, яке потребує стабілізації місця встановлення при русі МР місцевістю зі складним профілем поверхні та нерівностями.

Для дослідження ефективності системи стабілізації обладнання МР у пакеті Matlab Simulink розроблено схему та проведено моделювання реакції системи на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта відповідно до класифікації доріг за рівнем нерівностей за стандартом ISO 8608. Проаналізовано часові

реалізації та спектральні щільності потужності реакції системи стабілізації, яка при нульовому вхідному сигналі є випадковою похибкою системи стабілізації. Встановлено, що система стабілізації з ПІ-регулятором забезпечує прийнятне значення випадкової похибки системи (не перевищуватиме 0,02 град.) для розглянутих класів доріг з нерівностями та додатковими імпульсними збуреннями.

У подальших дослідженнях необхідно оцінити вплив на точність стабілізації руху в'язкими поверхнями та параметричних збурень.

Отримані результати будуть використані для розробки адаптивної цифрової системи стабілізації обладнання, встановленого на малорозмірних МР багатоцільового призначення.

Список літератури:

1. F.Rubio, F.Valero, C. Liopis-Albert. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019. № 2. P. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>
2. Осовцев А.В. Класифікація багатоцільових мобільних роботів. *XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»: збірник праць*, Київ, 2023. С. 29-32.
3. Герасін О.С. Аналіз особливостей мобільних роботів багатоцільового призначення. *Наукові праці. Комп'ютерні технології*. 2014. № 238. С. 25-31.
4. Brunete A, Ranganath A, Segovia S, et al. Current trends in reconfigurable modular robots design. *Int J Adv Robot Syst*. 2017. 14(3). P. 1–21. DOI: 10.1177/1729881417710457
5. Бурау Н. І., Вознюк А.І., Цисарж В.В. Система стабілізації та наведення для наземних рухомих об'єктів на базі АНRS. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2016. № 29. С. 155-161.
6. Бурау Н.І., Вознюк А.І., Цисарж В.В. Аналіз напрямків удосконалення систем стабілізації та наведення обладнання на рухомих об'єктах. *Вісник Інженерної академії України*. 2015. № 3. С. 73-77.
7. M. Hoy. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey. *Robotica (2015)*. 2015. Volume 33. P. 463–497. DOI: 10.1017/S0263574714000289.
8. Sushchenko O.A., Salyuk A.A., Yehorov S.H. Features of modelling digital system of ground vehicle equipment. *Electronics and Control Systems*. 2020. № 3(65). P. 62-71. DOI: 10.18372/1990-5548.65.14989
9. Кузавков В.В., Зарубенко А.О. Варіант структури автоматичної стабілізації платформи антенного поля рухомого. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2020. № 3(39). С. 23-32. DOI: 10.33099/2311-7249/2020-39-3-23-32
10. Сущенко О.А. Структурно-параметричний синтез дискретної робастної системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2016. Вип. 46. С. 194-201.
11. Александров Є.С., Ванін В.А., Александрова Т.Є., Ванін Б.В. Параметричний синтез стабілізатора рухомого об'єкту. *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2021. №1-2 (2). С. 10-19. DOI: 10.20998/2222-0631.2021.02.02
12. Кравець П.І., Шимкович В.М., Федорчук В.В., Гой А.А. Нейромережевий контролер системи стабілізації рухомого об'єкта з апаратно-програмною реалізацією на ПЛІС. *Вісник НТУУ «КПІ» Інформатика, управління та обчислювальна техніка*. 2015. № 63. С. 4-11.
13. Кузнецов Б.І., Василець Т.Ю., Варфоломій О.О. Нейромережева система наведення і стабілізації з регулятором на основі еталонної моделі model reference controller. *Електротехніка та електромеханіка*. 2015. № 4. С. 35-39.
14. Вознюк А.І. Аналіз параметрів системи непрямої стабілізації рухомих об'єктів під час руху пересіченою місцевістю. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*. 2017. Вип. 54(2). С. 20-26.
15. Бурау Н.І., Вознюк А.І., Осовцев А.В., Шаблій А.С. Аналіз впливу нерівностей місцевості на ефективність стабілізації обладнання рухомого об'єкта. *Вісник інженерної академії України*. 2017. № 2. С. 220-225.
16. Богомолів В.О., Клименко В.І., Шилов А.І., Алексєєв Р.В. Моделювання дорожньої поверхні для розрахунку динаміки руху транспортних засобів. *Автомобільний транспорт*. 2011. Вип. 29. С. 37-42.

**Bourao N.I., Osovtssev A.V. ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE EQUIPMENT
STABILIZATION OF A MOBILE MINI-ROBOT ON GROUND WITH A COMPLEX PROFILE**

The article is devoted to the development of a system of equipment stabilization and guidance (digital cameras, radars, antennas, laser rangefinders, optical-electronic modules for various purposes), installed on small-sized ground mobile robots of the wheel type. Such objects have problems in overcoming obstacles during movement on terrain with a complex profile, on off-road, sandy and viscous surfaces, so stabilization systems must ensure the effective use of the installed equipment in a wide range of movement speeds, conditions and terrain profile.

The work simulates the disturbances that affect the installed equipment when the mobile robot moves through terrain with a complex unevenness profile. Random perturbations for different classes of roads, and with additional impulse perturbations are generated. For the study, a simulation scheme of the stabilization system was developed in the Matlab Simulink package. A study of the system built according to the basic scheme and with the introduced PI-controller was carried out. Time realizations of the reaction of the stabilization system to generated random disturbances were obtained, their spectral power densities, root mean square deviations of the values of the initial value were determined, and the maximum value of the deviation angle of the place of the equipment installation from the horizon plane was determined, as the maximum error of stabilization. A comparative analysis of the maximum stabilization error obtained for different traffic terrain profiles and for different stabilization system construction schemes was carried out. It was established that the system with a PI-controller provides an acceptable value of the stabilization error for all considered types of disturbances. The obtained results will be used to develop an adaptive digital stabilization system for equipment installed on mobile robots.

Key words: mobile robots, stabilization system, simulation, irregularities, random disturbances, stabilization error.