

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»

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ КУТОВИХ НАХИЛІВ МОБІЛЬНОГО РОБОТА ПРИ РУСІ ПОВЕРХНЯМИ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОФІЛЕМ ТА НЕРЕГУЛЯРНИМИ ЗБУРЕННЯМИ

Статтю присвячено розробці адаптивної системи стабілізації обладнання, встановленого на малогабаритному наземному мобільному роботі (МР) колісного типу, з загальною кількістю колес – чотири. Головним завданням стабілізації є забезпечення з прийнятною точністю визначеного положення платформи з обладнанням в умовах складного збуреного руху МР. В якості такого обладнання можуть бути розглянуті радари, антени, цифрові камери, ультразвукові датчики, лазерні далекоміри, оптико-електронні модулі та інші датчики в залежності від поставленого до системи завдання, які для коректної роботи потребують стабілізації в площині горизонту. Для розробки такої системи необхідно сформувавши та обґрунтувати комплексні збурення, що діють впродовж руху МР відносно поздовжньої та поперечної осей, і в умовах дії яких повинна функціонувати система стабілізації. Для цього в роботі на основі математичного опису проведено імітаційне моделювання динаміки кутів нахилів малогабаритного колісного МР відносно площини горизонту при його русі по поверхні зі складним профілем та нерегулярними збуреннями різної інтенсивності під кожним колесом платформи.

За розробленими в середовищі Matlab Simulink структурними схемами на основі повних та спрощених рівнянь динаміки проведено імітаційне моделювання динаміки кутів нахилів для різних комбінацій впливу збурень, тривалості дії перешкод та профілю поверхні руху. Проведено порівняльний аналіз результатів моделювання, отриманих на основі використання повних та спрощених рівнянь динаміки. Отримані результати підтвердили необхідність використання повних рівнянь динаміки кутового руху з врахуванням перехресних зв'язків при побудові двовісної системи стабілізації обладнання, встановленого на МР.

Результати будуть використані для подальшої розробки двовісної адаптивної системи стабілізації обладнання.

Ключові слова: мобільні роботи, система стабілізації, кутовий рух, математична модель, імітаційне моделювання, поверхня руху, профіль, випадкові збурення.

Постановка проблеми. Сьогодні важко уявити будь-яку сферу життєдіяльності людини без використання різноманітних робототехнічних засобів, маніпуляторів, платформ та комплексів. Як окремий науковий та практичний напрямок в робототехніці розглядаються мобільні роботи (МР) [1], які рухаються та виконують свої функції в різних фізичних середовищах без участі людини. В останні роки цей напрямок науково-технічної діяльності розвивається у дуже високому темпі завдяки новим сенсорним технологіям, вдосконаленню алгоритмів орієнтації і навігації, широкому використанню штучного інтелекту для забезпе-

чення руху в неструктурованих середовищах та в умовах невизначеності. Використання МР вже набуло поширення у віддалених та небезпечних середовищах, при проведенні рятувальних операцій, усуненні наслідків надзвичайних ситуацій, при виконанні військових місій (доставлення корисного навантаження, евакуація поранених, розмінування), при проведенні моніторингу та діагностики об'єктів критичної інфраструктури (трубопроводів, підземних комунікацій тощо).

Для вирішення зазначених вище завдань на МР, як корисне навантаження, встановлюється спеціальне обладнання, для ефективної експлу-

атації якого необхідно забезпечити стабілізацію поверхні, на якій встановлено обладнання, у відповідному положенні у просторі чи на поверхні руху. Найчастіше системи стабілізації розробляються на основі технологій інерціальних стабілізованих платформ [2], які зазвичай складаються з карданних підвісів та гіроскопів. Карданний підвіс забезпечує стабілізацію та наведення обладнання навколо двох чи більше ортогональних осей, досягнення кращої ізоляції обладнання від збурень носія потребує встановлення додаткових карданних підвісів, що призводить до значного збільшення масо-габаритних характеристик стабілізованої платформи. Особливо критичним це може бути для МР класу «міні», розміри яких за трьома вимірами не перевищують 0,5м, а маса корисного навантаження не перевищує 5 кг.

Для розробки системи стабілізації обладнання, яке встановлюється на малогабаритних наземних МР колісного типу, важливо визначити характер та величини збурень, які виникають в залежності від типу поверхні руху МР (різне покриття, пісок, ґрунти, болотиста місцевість, ями, пагорби тощо). Також важливим фактором є крутизна поверхні руху МР і її вплив на точність системи стабілізації. Тому важливим завданням при розробці системи стабілізації обладнання, наприклад, в площині горизонту, є моделювання переміщення МР на різних поверхнях руху для виявлення впливів різноманітних збурень, в умовах дії яких необхідно забезпечити стабілізацію обладнання з прийнятною точністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати моделювання одновісної системи стабілізації обладнання в умовах руху МР на місцевості зі складним профілем наведено в роботі [3]. Профіль описується за стандартом ISO 8608. Моделювання та порівняльний аналіз проведено для різних конфігурацій системи стабілізації, в результаті встановлено, що використання ПІ-регулятора забезпечує прийнятну точність стабілізації, похибка стабілізації не перевищувала $0,02^\circ$. Продовження досліджень в роботі [4] було присвячено дослідженню впливу крутизни поверхні руху МР на точність стабілізації обладнання. Результати показали, що конфігурація одновісної системи стабілізації з ПІ-регулятором забезпечує прийнятну точність і при русі по поверхнях з поганим профілем та змінною крутизною.

Задача забезпечення гарантованої точності стабілізації при довільних збуреннях вирішується в роботі [5]. Автори пропонують формування коригуючого впливу як функції наближення змін-

ної стану системи до границі її допустимого значення, і який повинен компенсувати дію зовнішніх збурень. Запропонований алгоритм є ефективним для компенсації моментів сухого тертя, система залишається стійкою та покращується якість перехідного процесу.

Розробку математичної моделі системи стабілізації представлено у статті [6]. Описуються декілька режимів роботи системи стабілізації, зокрема режим стабілізації, цілевказівки, авто-супроводу цілі та електричного аретування. Математичну модель отримано відповідно до теореми про зміну кінетичного моменту, наведено розрахунок всіх моментів, які впливають на систему стабілізації.

Вплив нерівностей дороги на двовісну систему непрямої стабілізації, яка встановлюється на гусеничну техніку, було досліджено у роботі [7], автором проаналізовано вплив збурень на динамічні характеристики системи.

Актуальність використання системи стабілізації та наведення обладнання у військових завданнях описано у статті [8]. В роботі продемонстровано реальні приклади, які показують необхідність та доцільність її встановлення на сучасній військовій техніці в умовах динамічної стрільби, основною вимогою щодо точності системи є необхідність забезпечення мінімального відхилення від лінії прицілювання при пострілі.

Кутові нахили корпусу наземного транспорту, які викликані нелінійною характеристикою відновлювальної сили амортизаторів, описані в роботі [9], а також наведено основні методи дослідження впливу поодиноких нерівностей шляху на поздовжньо-кутові коливання корпусу об'єкта, отримано частотні та амплітудні характеристики цих коливань.

Не зважаючи на значний науковий інтерес та широке практичне застосування систем стабілізації та наведення обладнання на різного класу рухомих об'єктах, обмеженими є дослідження руху малогабаритних колісних МР в умовах нерегулярних збурень різної інтенсивності під кожним колесом платформи, чи при наявності різних поверхонь руху під різними осями, що характеризує екстремальні непрохідні чи важко прохідні умови експлуатації. Такі умови руху МР обумовлюють відмінні від типових збурення місць встановлення обладнання МР і вимагають детального дослідження та врахування при розробці просторових систем стабілізації.

Постановка завдання. Метою роботи є математичний опис та імітаційне моделювання дина-

міки кутових нахилів малогабаритного колісного МР відносно площини горизонту при його русі по поверхні зі складним профілем та нерегулярними збуреннями різної інтенсивності під кожним колесом платформи.

Виклад основного матеріалу. *Математичний опис кутового руху об'єкту.* Для проведення комп'ютерного моделювання та визначення впливу збурень на динамічні характеристики колісного МР необхідно мати математичний опис динаміки його кутових нахилів відносно площини горизонту. Для спрощення представимо МР моделлю прямокутної платформи на чотирьох колесах (рис. 1), з якою пов'яжемо систему координат OXYZ, причому центр системи координат O зіставимо з центром мас платформи, вісь OY направимо вздовж повздовжньої осі платформи, вісь OX – вздовж поперечної осі, а вісь OZ – вздовж вертикальної осі.

Нехай у стані спокою платформа знаходиться в площині горизонту (OXYZ). При русі по місцевості зі складним профілем поверхні об'єкт буде мати кутове відхилення від площини горизонту внаслідок виникнення кутових швидкостей за осями OX та OY. Поява кутової швидкості $\dot{\alpha}$ за віссю OX призводить до повороту системи координат OXYZ до системи $OX_1Y_1Z_1$ на кут α , а потім поява кутової швидкості $\dot{\beta}$ за віссю OY_1 забезпечує поворот системи координат $OX_1Y_1Z_1$ до системи координат $OX_2Y_2Z_2$ на кут β , як показано на кінематиці поворотів на рис. 2 в кутах Ейлера-Крилова [10].

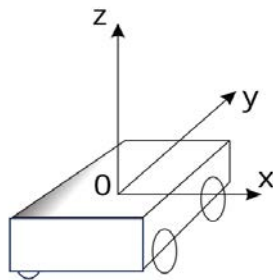


Рис. 1. Спрощене представлення фізичної моделі об'єкту

Для отримання рівнянь динаміки кутового руху платформи використовуємо рівняння Лагранжа II роду [10]. Кінетична енергія кутового руху моделі визначається за виразом:

$$T = \frac{1}{2} \cdot [J_x \cdot \omega_{x_2}^2 + J_y \cdot \omega_{y_2}^2 + J_z \cdot \omega_{z_2}^2],$$

де J_x, J_y, J_z – моменти інерції платформи відносно осей; $\omega_{x_2}, \omega_{y_2}, \omega_{z_2}$ – проекції кутової швидкості платформи на осі системи координат $OX_2Y_2Z_2$.

Визначимо проекції кутової швидкості $\omega_{x_2}, \omega_{y_2}$ та ω_{z_2} :

$$\omega_{x_2} = \dot{\alpha} \cdot \cos \beta;$$

$$\omega_{y_2} = \dot{\beta};$$

$$\omega_{z_2} = \dot{\alpha} \cdot \sin \beta.$$

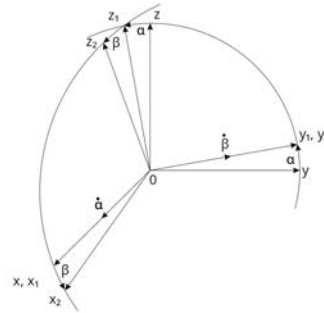


Рис. 2. Кінематика поворотів моделі в кутах Ейлера-Крилова

Після математичних перетворень рівнянь Лагранжа II роду отримаємо систему диференціальних рівнянь, які описують динаміку кутового руху платформи:

$$\begin{cases} (J_x \cdot \cos^2 \beta + J_z \cdot \sin^2 \beta) \cdot \ddot{\alpha} + 2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \cdot (J_z - J_x) \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta = M_x \\ J_y \cdot \ddot{\beta} - \dot{\alpha}^2 \cdot (J_z - J_x) \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta = M_y \end{cases}, \quad (1)$$

де M_x та M_y – узагальнені моменти відносно відповідних осей.

Вилучивши з розгляду нелінійні та члени другого порядку малості, рівняння (1) можна спростити до вигляду:

$$\begin{cases} (J_x \cdot \cos^2 \beta + J_z \cdot \sin^2 \beta) \cdot \ddot{\alpha} = M_x \\ J_y \cdot \ddot{\beta} = M_y \end{cases}. \quad (2)$$

Для розрахунку моментів інерції в наведених рівняннях використаємо такі розміри платформи, що має форму паралелепіпеда: довжина 0,5м; ширина 0,4м; висота 0,3м; товщина стінок 0,003м. Для матеріалу АЛ20 загальна вага моделі складе 3,78кг, а розраховані моменти інерції мають такі значення: $J_x=0,1071 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_y=0,0788 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_z=0,1292 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Структурна схема для імітаційного моделювання. За рівняннями (1) і (2) було зібрано схеми для імітаційного моделювання динаміки кутових нахилів платформи у пакеті Matlab Simulink. Схеми складаються зі стандартних блоків бібліотеки Simulink (Constant, Integrator, From Workspace, To Workspace). Блок-схему для імітаційного моделювання повних диференціальних рівнянь (1) наведено на рис. 3.

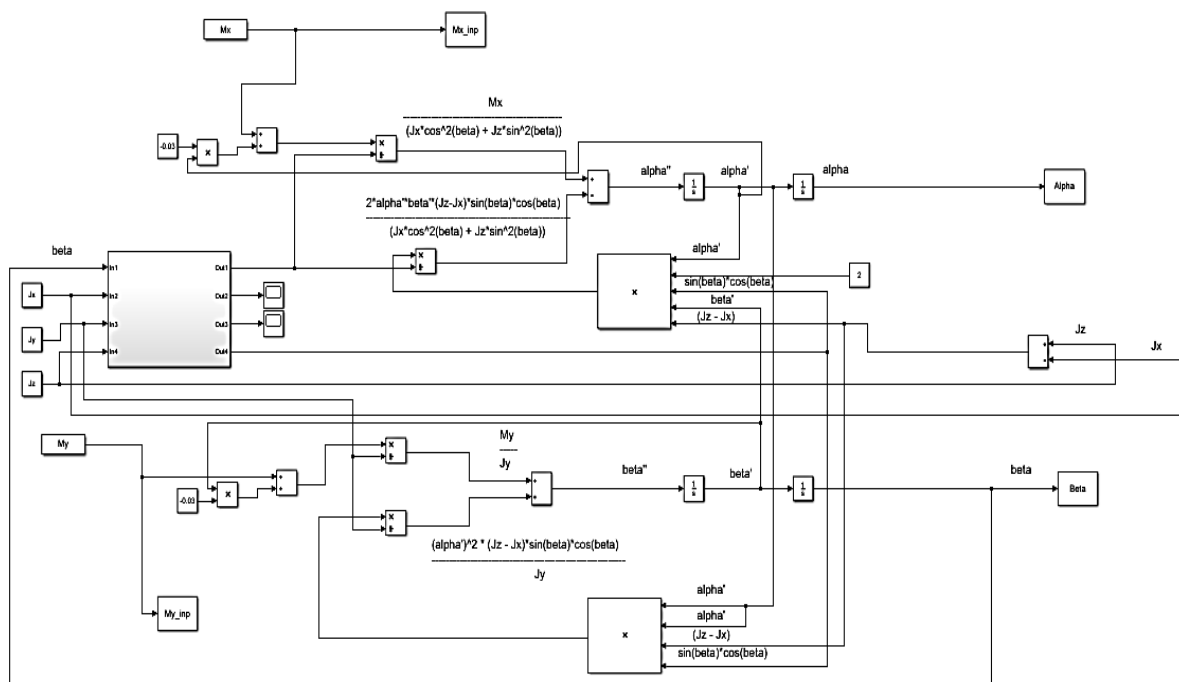


Рис. 3. Схема для моделювання повних диференціальних рівнянь

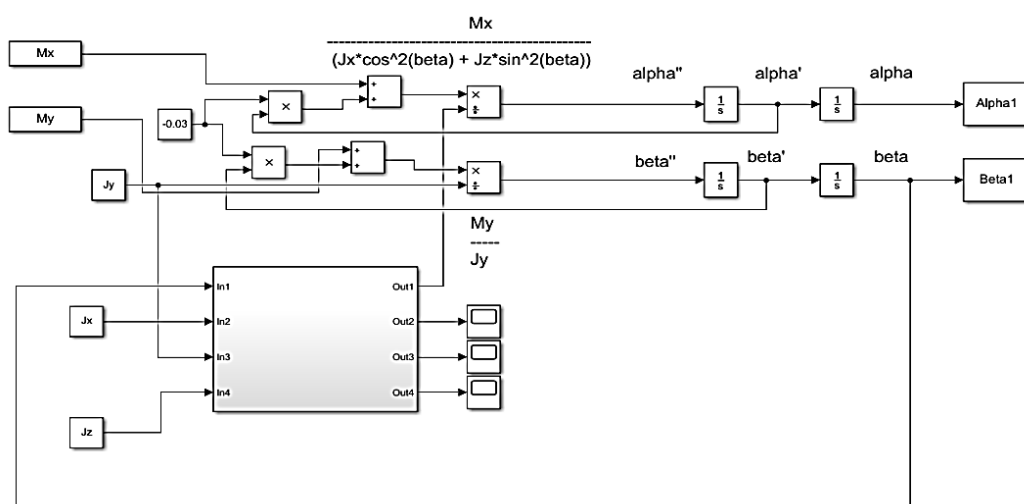


Рис. 4. Схема для моделювання спрощених диференціальних рівнянь

Блок-схему для імітаційного моделювання спрощених диференціальних рівнянь (2) наведено на рис. 4.

Моделювання збурень, зумовлених профілем місцевості при русі мобільного робота. Головним джерелом збурень є вплив місцевості, по якій здійснює рух мобільний робот. Для опису особливостей поверхні руху (місцевості, дороги) використовується рельєф, який в літературних джерелах часто представляється сукупністю випадкових поверхонь для площини ділянки твердої дороги [11]. А профіль дороги – це випадковий процес сукупності реалізацій перетинів

рельєфів. Тому профіль дороги можна описувати випадковою функцією залежності нерівностей рельєфу від пройденої дистанції, де висота нерівностей – випадкова величина з нормальним законом розподілу ймовірностей, тоді профіль дороги описується стаціонарним випадковим процесом з нормальним розподілом ймовірності.

Класифікацію доріг за рівнем нерівностей описує стандарт ISO 8608 [12], який описує випадкові нерівності як функцію просторової частоти (число коливань на метр шляху) і характеризує їх на основі спектральної щільності потужності S_0 . У табл. 1 наведена класифікація різних типів доріг [11, 12].

Таблиця 1

Класифікація доріг за рівнем нерівностей відповідно до стандарту ISO 8608

Клас дороги	Рівень нерівності, $S_0(\times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{коливання})$
А (дуже добра)	<8
В (добра)	8-32
С (задовільна)	32-128
Д (погана)	128-512
Е (дуже погана)	512-2048
Ф	2048-8192
Г	8192-32768
Н	>32768

Для проведення моделювання було розглянуто різні можливі режими руху об'єкту, коли збурення діють як окремо за повздовжньою чи поперечною осями об'єкта, в той час як за іншою віссю немає збурення, так і одночасно за обома осями, що дозволить оцінити вплив перехресних зв'язків у рівняннях (1) при складному збуренні об'єкта. Моделювання динаміки проведено для повних та спрощених диференціальних рівнянь.

Перший вплив, який розглядається, це імітація руху, коли МР наїжджає на пагорб, а також заїжджає у яму. Час впливу перешкоди складає 1с або 2с, повний час руху складає 300с, для моделювання було обрано такі умови: пагорби були реалізовані на 30с, 175с, 270с; ями – на 110с та 220с; в інші інтервали часу збурення відсутнє. Приклад реалізації такого збурення наведено на рис. 5 для перешкод, які діють протягом 1с.

Для формування моментів збурення було прийнято такі умови: висота підйому або глибина ями вздовж поперечної осі ОХ дорівнює $x=0,03\text{м}$, а вздовж повздовжньої осі ОУ – $y=0,05\text{м}$. Для розрахунку моментів врахуємо значення довжини ($l=0,5\text{м}$), ширини ($w=0,4\text{м}$) та маси ($m=3,78\text{кг}$) об'єкта. Також було введено коефіцієнт в'язкого демпфування для загасання коливань та змен-

шення наростання швидкості $c=0,03$, враховано прискорення вільного падіння g . Швидкості $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ беруться після першого інтегратора. Моменти збурення визначаємо та аналітичними виразами:

$$M_x = \frac{m x l}{2} + m g l (1 - \cos \theta) - c \dot{\alpha}, \theta = \arctan \left(\frac{x}{l} \right);$$

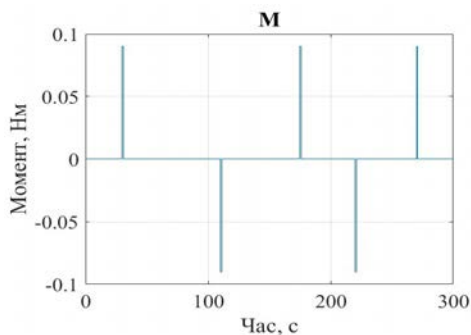
$$M_y = \frac{m y w}{2} + m g w (1 - \cos \theta) - c \dot{\beta}, \theta = \arctan \left(\frac{y}{w} \right).$$

Прискорення $\ddot{x}, \ddot{y}$, залежать від часу дії впливу, якщо вплив триває 1с, то ці прискорення дорівнюють $\ddot{x} = 2\ddot{x}, \ddot{y} = 2\ddot{y}$. А якщо вплив триває 2с, то ці прискорення дорівнюють $\ddot{x} = \frac{2x}{4} = \frac{x}{2}, \ddot{y} = \frac{2y}{4} = \frac{y}{2}$.

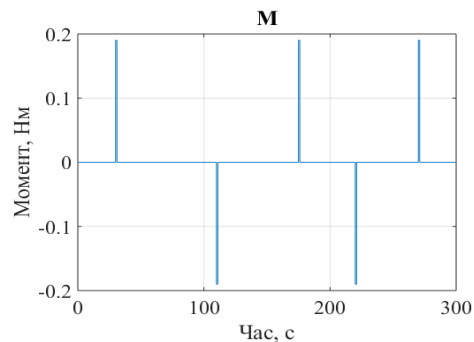
Інший вплив, який досліджується, є комплексним збуренням, що складається з описаного вище (чергування пагорбів та ям) з додаванням різних профілів дороги. Для імітації більш реалістичних умов руху було обрано профіль дороги класу А (дуже добра дорога, рівень нерівності $2 \cdot 10^{-6}$) згідно стандарту ISO 8608 (табл. 1). Реалізації комплексного збурення наведено на рис. 6.

Моделювання руху МР проводилось для таких умов: швидкість мобільного робота дорівнює 5 км/год (1,4 м/с) і є сталою; час моделювання 300с з періодом дискретизації 0,05с, тому пройдений шлях складає 420м.

Результати імітаційного моделювання. Спочатку було проведено моделювання динаміки МР за рівняннями (1) і (2), якщо рух відбувається по поверхні з чергуванням пагорбів та ям, реалізації якого наведено на рис. 5 (час дії перешкоди 1с). Реалізації збурення подавались по чергову у відповідні канали схем на рис. 3 та рис. 4, в той час як момент збурення за іншою віссю не діяв. В результаті отримано вихідні реалізації (рис. 7), які характеризують змінювання кутів α і β нахилу платформи відносно площини горизонту. Для почергового збурення платформи відносно повздовжньої та поперечної осей результати моде-



а)



б)

Рис. 5. Приклад реалізації збурення: а) за віссю ОХ; б) за віссю ОУ

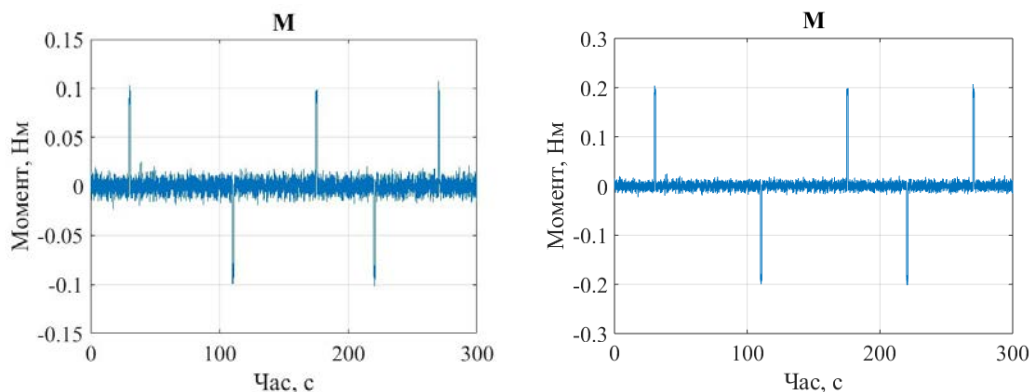


Рис. 6. Приклад реалізації комплексного збурення: а) за віссю ОХ; б) за віссю ОУ

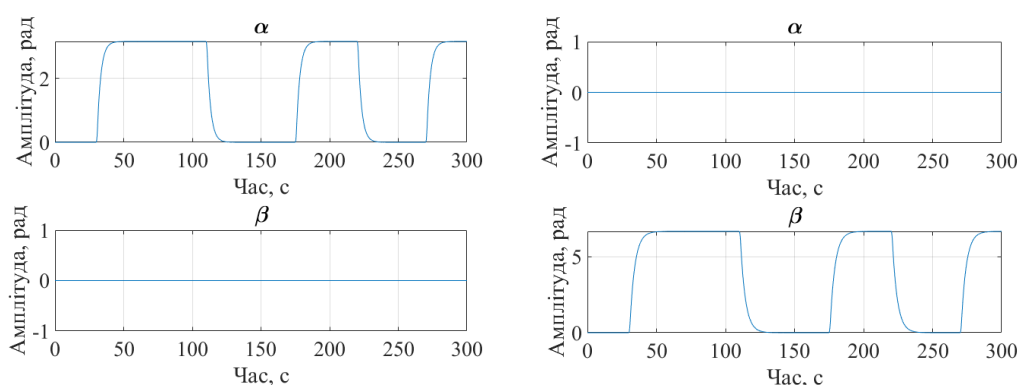


Рис. 7. Вихідні реалізації каналів при почерговому поданні збурення в кожен канал: а) вихідний сигнал каналу α ; б) вихідний сигнал каналу β

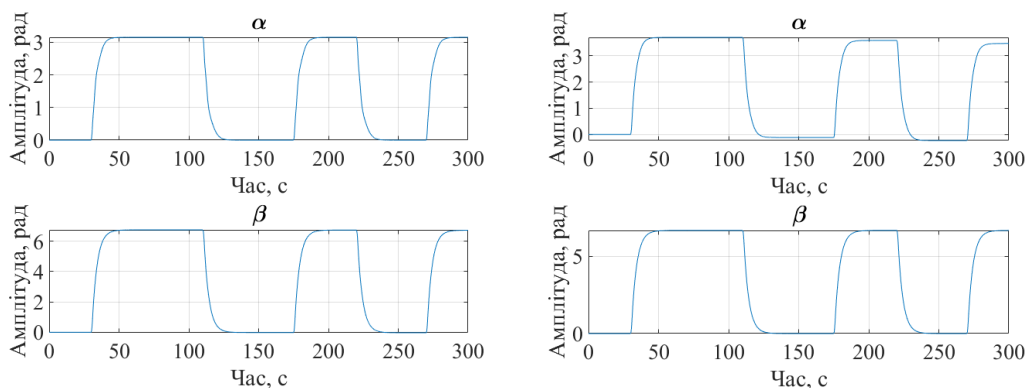


Рис. 8. Вихідні реалізації каналів при одночасному поданні збурень в канали α та β (тривалість перешкоди 1с): а) моделювання повних рівнянь; б) моделювання спрощених рівнянь

лювання за повними та спрощеними рівняннями співпадають. Як можна побачити з наведених на рис. 7 вихідних реалізацій, на кожній перешкоді наростає швидкість кутового руху, але введенне демпфування обмежує це зростання.

Результати моделювання кутового руху МР при одночасному поданні збурення в канали визначення кутів α та β наведено на рис. 8.

Як видно з наведених реалізацій, результати моделювання за повними рівняннями (рис. 8,а) та за спрощеними рівняннями (рис. 8,б) при одночасному впливі моментів збурення відносно повздовжньої та поперечної осей суттєво відрізняються, що обумовлено впливом перехресних зв'язків на обидва канали. Графіки змінювання різниці кутів нахилу платформи $\Delta\alpha$ та $\Delta\beta$, отри-

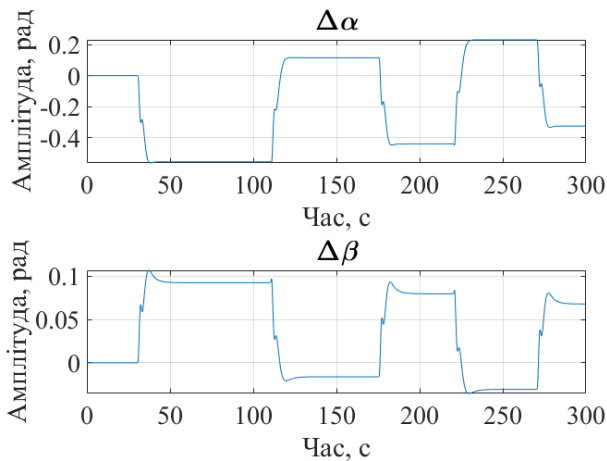


Рис. 9. Графіки змінювання різниці кутів нахилу платформи при використанні повних та спрощених рівнянь

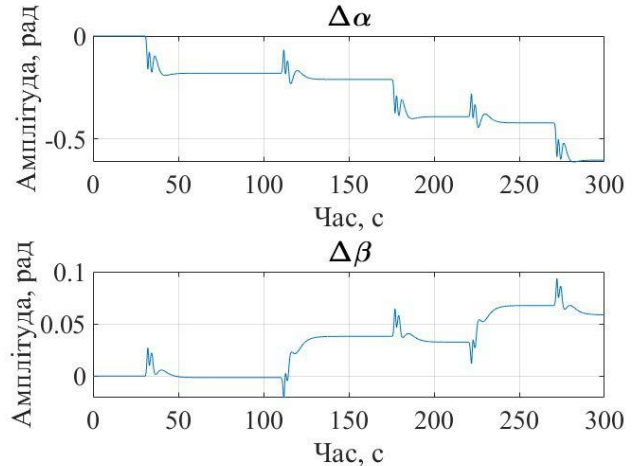
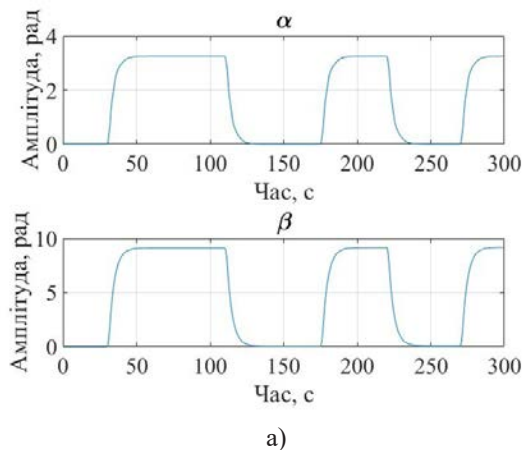
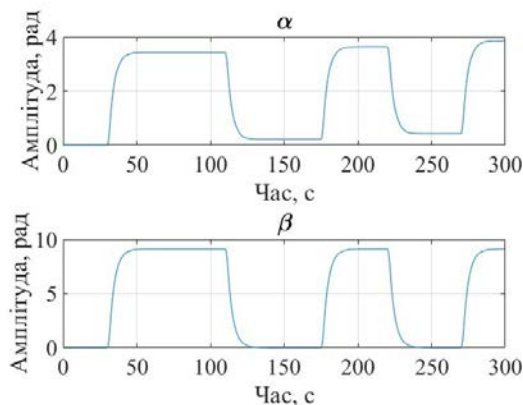


Рис. 11. Графіки змінювання різниці кутів нахилу платформи при використанні повних та спрощених рівнянь



а)



б)

Рис. 10. Вихідні реалізації каналів при одночасному поданні збурень в канали α та β (тривалість перешкоди 2с): а) моделювання повних рівнянь; б) моделювання спрощених рівнянь

маних моделюванням за повними та спрощеними рівняннями, наведено на рис. 9.

Проведено моделювання кутового руху МР при одночасному поданні збурення в канали

визначення кутів α та β за умови збільшення тривалості дії перешкод до 2с. Результати моделювання у вигляді вихідних реалізацій кутового руху з каналів визначення кутів α та β наведено на рис. 10, а графіки змінювання різниці кутів нахилу платформи $\Delta\alpha$ та $\Delta\beta$ при моделюванні повних та спрощених рівнянь наведено на рис. 11.

Як видно з наведених на рис. 10 вихідних реалізацій, з часом з'являються відмінності у реалізаціях каналів визначення кутів α за повними та спрощеними рівняннями. Збільшення тривалості перешкод з 1с до 2с призводить до збільшення значень кутів нахилу платформи як при моделюванні за повними рівняннями, так і при моделюванні за спрощеними рівняннями кутового руху платформи.

Проведено моделювання кутового руху МР при одночасному поданні збурення в канали визначення кутів α та β за умови комплексного збурення (чергування пагорбів та ям тривалістю 2с з врахуванням профілю дороги класу А). Результати моделювання у вигляді вихідних реалізацій кутового руху з каналів визначення кутів α та β наведено на рис. 12, а графіки змінювання різниці кутів нахилу платформи $\Delta\alpha$ та $\Delta\beta$ при моделюванні повних та спрощених рівнянь наведено на рис. 13.

Порівняльний аналіз отриманих під час моделювання результатів показав, що рух МР по місцевості зі складними перешкодами різної тривалості дії та складним профілем дороги призводить до кутового збурення платформи відносно повздовжньої та поперечної осей МР. Наявність та нерегулярне змінювання різниці кутів нахилу платформи, отриманих при моделюванні повних та спрощених рівнянь, свідчить про необхідність

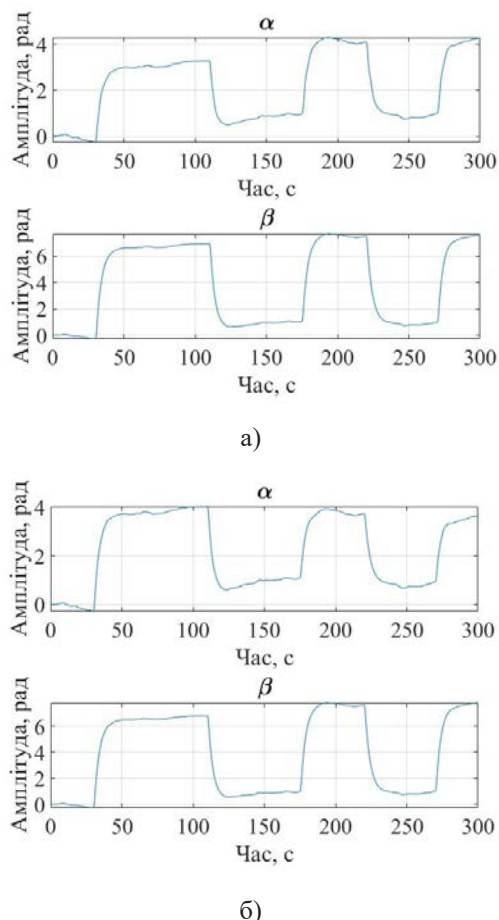


Рис. 12. Вихідні реалізації каналів при одночасному поданні комплексних збурень з урахуванням профілю дороги в канали α та β (тривалість перешкоди 2с): а) моделювання повних рівнянь; б) моделювання спрощених рівнянь

використання повних рівнянь динаміки. Результатами моделювання підтверджено і вплив перехресних зв'язків на характер кутового руху платформи, що обмежує використання окремих, не пов'язаних між собою каналів стабілізації обладнання і вимагає врахування таких зв'язків у двовісній системі.

Висновки. Складні умови руху та кутові нахили малогабаритних колісних МР відносно площини горизонту негативно впливають на корисне навантаження та встановлене на МР обладнання, що обумовлює необхідність його стабілізації. Для розробки системи стабілізації обладнання в роботі проведено моделювання та дослідження кутового руху малогабаритних колісних

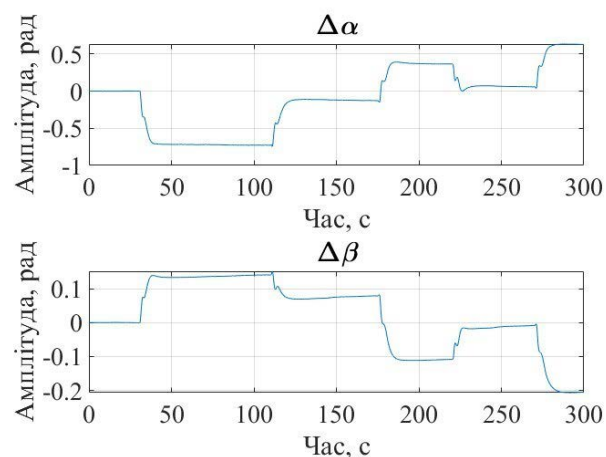


Рис. 13. Графіки змінювання різниці кутів нахилу платформи під впливом комплексного збурення при використанні повних та спрощених рівнянь

МР в умовах нерегулярних збурень різної інтенсивності під кожним колесом, які характеризують екстремальні непрохідні чи важко прохідні умови експлуатації.

Отримано математичний опис динаміки кутових нахилів моделі МР відносно площини горизонту у вигляді повних та спрощених диференціальних рівнянь, за якими розроблено структурні схеми для їх моделювання у пакеті Matlab Simulink. Сформовано реалізації збурень, зумовлених рухом МР по місцевості зі складним профілем дороги та складними перешкодами (імітація чергування пагорбів та ям різної висоти та тривалості дії). Моделювання проведено за умови окремої та одночасної дії збурень за повздовжньою та поперечною осями моделі МР. Проведений порівняльний аналіз результатів моделювання, отриманих на основі використання повних та спрощених рівнянь динаміки, показав необхідність використання повних рівнянь динаміки кутового руху з врахуванням перехресних зв'язків при побудові двовісної системи стабілізації обладнання, встановленого на МР.

Отримані результати будуть використані при подальшій розробці контуру керування двовісною адаптивною системою стабілізації обладнання, встановленого на малогабаритних наземних МР колісного типу.

Список літератури:

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. №2. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>
2. Hilkert J.M. Inertially stabilized platform technology: concepts and principles. *IEEE Control Systems Magazine*. February 2008, P. 26–46. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.910256>

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. №5 (Том 34 (73)). С. 99–107.
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(Том 46). С. 114–125.
5. Збруцький О.В., Осокін В. С. Система стабілізації та керування гарантованої точності оптичною віссю. *Механіка гіроскопічних систем. Розділ: Системи та процеси керування*. 2022. №43. С. 5–11.
6. Нестеренко О.І., Рижков Л.М., Осокін В.С. Математичні моделі гіростабілізатора за різних режимів його роботи. *Механіка гіроскопічних систем. Розділ: Системи та процеси керування*. 2020. №40. С. 5–11.
7. 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.
8. Maciej Dorczuk. Modern weapon systems equipped with stabilization systems: division, development objectives, and research problems. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces. Volume 52, Number 3(197)*. 2020. P. 651–659. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3959
9. Нанівський Р.А. Моделювання динаміки колісних транспортних засобів під час руху шляхом із нерівностями. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2022. Т. 16. № 2. С. 72–80. DOI: 10.31649/2413-4503-2022-16-2-72-80.
10. Павловський М. А. Теоретична механіка: Підручник. К.: Техніка, 2002. 512 с.
11. 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.
12. 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.

Bouraou N.I., Osovtssev A.V. MODELING THE DYNAMICS OF ANGULAR INCLINATIONS OF A MOBILE ROBOT WHEN MOVING ON SURFACES WITH A COMPLEX PROFILE AND IRREGULAR DISTURBANCES

The article is devoted to the development of an adaptive stabilization system for equipment installed on a small-sized ground mobile robot (MR) of wheeled type, with a total number of wheels – four. The main task of stabilization is to ensure with acceptable accuracy the specified position of the platform with equipment in conditions of complex disturbed MR movement. Such equipment can include radars, antennas, digital cameras, ultrasonic sensors, laser rangefinders, optoelectronic modules, and other sensors, depending on the task assigned to the system, which require stabilization in the horizon plane for correct operation. To develop such a system, it is necessary to form and substantiate complex disturbances that act during the MR movement relative to the longitudinal and transverse axes, and under the conditions of which the stabilization system should function. For this purpose, in the work, based on a mathematical description, a simulation modeling of the dynamics of angular inclinations of a small-sized wheeled MR relative to the horizon plane during its movement on a surface with a complex profile and irregular disturbances of different intensity under each wheel of the platform was carried out.

According to the structural diagrams developed in the Matlab Simulink environment, based on full and simplified dynamics equations, a simulation modeling of the dynamics of angular inclinations was carried out for various combinations of the influence of disturbances, the duration of the obstacle action and the profile of the movement surface. A comparative analysis of the modeling results obtained based on the use of full and simplified dynamics equations was carried out. The results confirmed the need to use full equations of angular motion dynamics taking into account cross-connections when building a two-axis stabilization system for equipment installed on the MR.

The results will be used for further development of a two-axis adaptive stabilization system for equipment.

Key words: mobile robots, stabilization system, angular motion, mathematical model, simulation modeling, motion surface, profile, random disturbances.

Дата надходження статті: 04.11.2025

Дата прийняття статті: 21.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025