

великою кількістю даних та засобами візуалізації. За допомогою формул та логічних операцій можна створювати RBD (діаграми баз даних) при моделюванні надійності продукції; ймовірності безвідмовної роботи від часу, гістограм розподілу та діаграм Парето, дозволяє наочно оцінювати вплив параметрів окремих елементів на загальну надійність системи та полегшує прийняття проектних рішень.

Висновки. Застосування Excel для виконання апіорного аналізу надійності на етапі проектування дозволяє інженерам ефективно й швидко оцінювати і аналізувати працездатність майбутніх технічних систем. Завдяки широкому набору математичних функцій, інструментів моделювання, зручності обробки даних та можливостям автоматизації, Excel забезпечує високий рівень точності та наочності аналізу. Таким чином, використання Excel сприяє підвищенню якості проектних рішень, зменшенню ризику відмов та оптимізації витрат та створення технічних виробів. Це робить інструмент важливою складовою сучасної інженерної практики у сфері забезпечення надійності.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Київ : Держстандарт України, 1994.
2. ДСТУ ІЕС 61078:2010. Аналіз технік надійності. Метод блок-схем надійності. – Київ : Держспоживстандарт України, 2010.
3. ДСТУ ІЕС 60600-3-1:2017. Керування надійністю. Частина 3-1. Застосування – Аналіз надійності. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.

DOI 10.70286/ISU-28.01.2026.004

ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ МОБІЛЬНОГО РОБОТА З АДАПТИВНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Осовцев Андрій Володимирович

аспірант

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського", Україна

У сучасних умовах спостерігається стійке зростання кількості завдань, виконання яких є неможливим або недоцільним за безпосередньої участі людини. Це обумовлено як складними та небезпечними умовами зовнішнього середовища, так і загальносвітовими тенденціями до автоматизації процесів у різних галузях. Одним із найбільш ефективних засобів розв'язання таких завдань є мобільні роботи, здатні функціонувати в агресивних або небезпечних умовах, непридатних для перебування людини, а також у випадках, коли критичними є

малі габаритні розміри системи, наприклад під час обстеження підземних комунікацій або ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

У загальному випадку мобільні роботи поділяються на стаціонарні, наземні, повітряні, надводні та підводні. У даній роботі основну увагу приділено наземним мобільним роботам колісного типу класу «міні», габаритні розміри яких не перевищують 0,5 м по кожній з трьох координатних осей [1].

Водночас ефективне виконання прикладних завдань багатоцільового призначення вимагає не лише використання мобільних роботизованих платформ, але й забезпечення високоточної стабілізації обладнання, встановленого на них. До такого обладнання належать камери, антени, радіолокаційні системи, лазерні далекоміри, елементи вимірювальних комплексів та інші прилади, для яких точність просторового орієнтування є критично важливою.

Процес стабілізації істотно ускладнюється сукупною дією зовнішніх збурень, що виникають унаслідок динаміки руху носія, умов експлуатації та конструктивних обмежень при розміщенні обладнання. Застосування адаптивної системи стабілізації дозволяє забезпечити універсальність і придатність рішення для широкого класу обладнання масою до 5 кг. Відповідно до результатів аналізу літературних джерел, допустима похибка стабілізації не повинна перевищувати $0,02^\circ$.

Під час проектування системи стабілізації обладнання необхідно враховувати основні зовнішні збурення, які мають найбільш істотний вплив на точність функціонування системи. Для мобільного робота класу «міні» таким домінуючим фактором є нерівність опорної поверхні, по якій здійснюється рух. У зв'язку з цим, при синтезі системи та проведенні комп'ютерного моделювання важливим є встановлення взаємозв'язку між характеристиками рельєфу місцевості та параметрами системи стабілізації з метою їх обґрунтованого вибору.

Нерівності та дефекти поверхні руху зумовлюються рельєфом місцевості, який з математичної точки зору може бути поданий як множина реалізацій випадкових поверхонь, що відображають ступінь нерівномірності. У цьому контексті профіль дороги розглядається як перетин рельєфу площиною, орієнтованою вздовж повздовжньої осі руху мобільного робота. Такий профіль моделюється у вигляді випадкового процесу, що описується випадковою функцією висот нерівностей з нормальним законом розподілу та залежить від пройденої відстані і часу. У межах моделювання профіль дороги приймається стаціонарним випадковим процесом із нормальним розподілом.

Класифікація доріг за рівнем нерівностей здійснюється відповідно до міжнародного стандарту ISO 8608, який використовується для формування профілю дороги під час моделювання. Випадкові нерівності поверхні описуються через просторову частоту та спектральну щільність потужності S_0 . Зокрема, для дуже поганих та складних умов руху відповідає дорога класу «F» з рівнем нерівності в діапазоні $2048 \times 10^{-6} - 8192 \times 10^{-6}$.

У роботі [2] представлено структуру системи стабілізації обладнання та результати її комп'ютерного моделювання, які були використані як базові під час

розроблення та аналізу ефективності запропонованого рішення в даному дослідженні. У зазначеній роботі також розглядаються зовнішні збурення, зумовлені нерівностями дорожнього профілю. Система стабілізації включає виконавчий електродвигун, редуктор, підсилювач і перетворювальні елементи. У межах даної роботи ефективність системи стабілізації оцінюється шляхом порівняльного аналізу системи з класичним ПІ-регулятором та системи з ПІ-регулятором, доповненим адаптивним підналаштуванням коефіцієнтів.

Моделювання системи виконувалося в середовищі Matlab Simulink. На основі стандартних блоків Constant, Gain, Integrator, Scope, Sum, Random Number та Transfer Fcn була сформована програмна модель системи стабілізації обладнання. Через блок From Workspace до каналу зовнішніх збурень подавався випадковий сигнал, сформований відповідно до профілю дороги. Похибкою системи вважався кут відхилення стабілізованої платформи від нульового положення, тобто від горизонтальної площини, оскільки вхідний сигнал системи керування приймався таким, що дорівнює нулю. Крім того, до моделі були введені блоки Backlash та Coulomb & Viscous для врахування нелінійних властивостей системи, а до ПІ-регулятора реалізовано механізм адаптивного налаштування параметрів.

Одним із найбільш результативних підходів до компенсації факторів пов'язаних з нелінійностями, зміною навантаження на вихідний вал двигуна, та збуреннями, пов'язаними з профілем та крутизною поверхні руху, є Model Reference Adaptive Control (MRAC) — метод адаптивного керування з еталонною моделлю, який забезпечує автоматичне коригування параметрів регулятора в процесі функціонування системи [3]. Використання MRAC у контурі стабілізації дозволяє істотно знизити похибку регулювання навіть за наявності нелінійностей приводу та в умовах дії випадкових збурень, зумовлених нерівностями дорожнього профілю.

У низці сучасних досліджень метод MRAC рекомендовано для застосування в прецизійних сервоприводах, виконавчих актуаторах, редукторних механізмах, роботизованих маніпуляторах і гіростабілізованих платформах [4,5], що підтверджує доцільність та актуальність використання даного підходу.

На рис. 1 представлено модель адаптивного регулятора, яка складається з трьох послідовно з'єднаних динамічних ланок, що формують закон керування стабілізаційною платформою мобільного робота. Першою ланкою схеми є ПІ-регулятор, призначений для попередньої компенсації динамічних властивостей об'єкта керування та зменшення похибки регулювання.

Далі сигнал похибки передається до адаптивного регулятора, реалізованого в середовищі Simulink у вигляді окремої підсистеми, яка на рисунку позначена центральним блоком. Ця підсистема здійснює автоматичне підналаштування параметрів регулятора в режимі реального часу на основі закону адаптації MRAC. Коефіцієнти ПІ-регулятора дорівнюють: $K_{PI} = 10$, $K_{IH} = 100$.

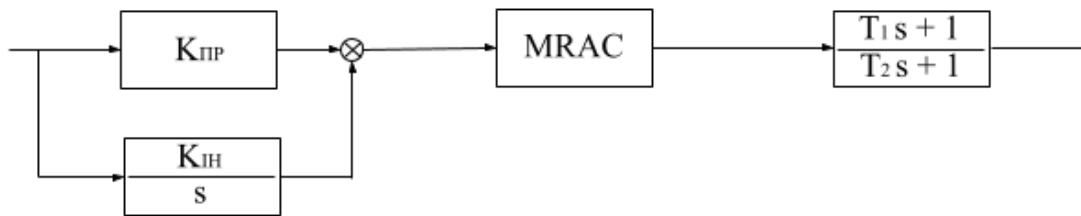


Рис. 1. Структурна схема адаптивного регулятора

На виході адаптивного регулятора формується керуючий сигнал

$$u(t) = K_{\text{пр}}(t) e(t) + K_{\text{ин}}(t) \int e(t) dt, \quad (1)$$

який надходить на коригувальну ланку диференціюючого типу.

Як було показано в попередніх дослідженнях, ця ланка використовується для забезпечення необхідних показників стійкості системи та покращення якості перехідного процесу.

У сукупності зазначені елементи утворюють узагальнений закон керування (1), у якому попередня лінійна корекція поєднується з механізмом адаптивного налаштування параметрів. Такий підхід забезпечує підвищену точність та стійкість стабілізації в широкому діапазоні режимів руху мобільного робота.

Проведено моделювання з урахуванням впливу нелінійностей і зміни навантаження у 3 рази на 50 секунд моделювання, виконано аналіз похибки стабілізації при русі МР по поганій дорозі (класу F) з додатковим впливом двох прямокутних імпульсних збурень (реалізацію збурення наведено на рис. 2). Вихідний сигнал похибки системи стабілізації наведено на рис. 3.

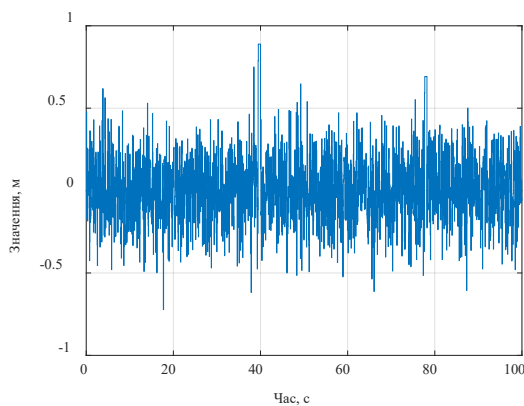


Рис. 2. Часова реалізація збурення для профілю дороги класу F з додатковими двома імпульсними збуреннями

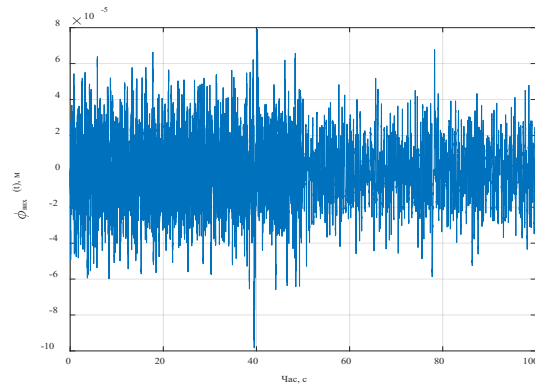


Рис. 3. Похибка стабілізації системи з адаптивним ПІ-регулятором

Аналіз результатів моделювання, наведеного на рис. 3, показав, що середньо-квадратичне відхилення (СКВ) похибки складає $0,018^\circ$.

Наступне моделювання проведено для збурення яке викликане випадковими збуреннями дороги класу F з нахилом $4,1^\circ$, з урахуванням нелінійностей та збільшенням навантаження у 3 рази. Реалізацію збурення наведено на рис. 4, а вихідний сигнал похибки системи стабілізації на рис. 5.

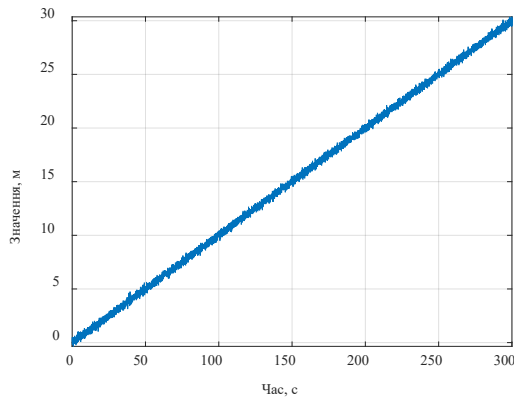


Рис. 4. Часова реалізація збурення від нахилу місцевості 4,10 з нерівностями профілю доріг класу F

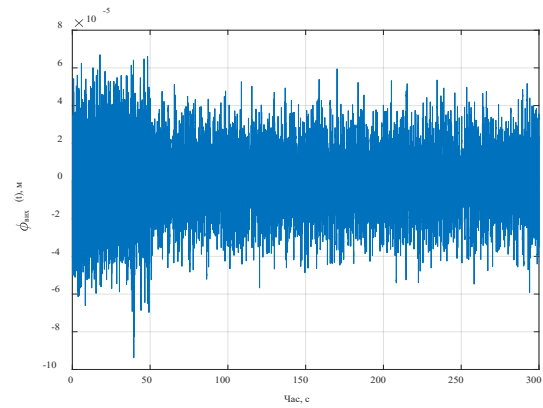


Рис. 5. Похибка стабілізації системи з адаптивним ПІ-регулятором

Аналіз результатів моделювання, наведеного на рис. 5, показав, що СКВ похибки складає $0,019^\circ$.

Фінальне моделювання проведено для в'язкої місцевості, де збурення розглядається як низькочастотний випадковий процес, часову реалізацію якого наведено на рис. 6. Також враховано нелінійності та зміну навантаження у 3 рази.

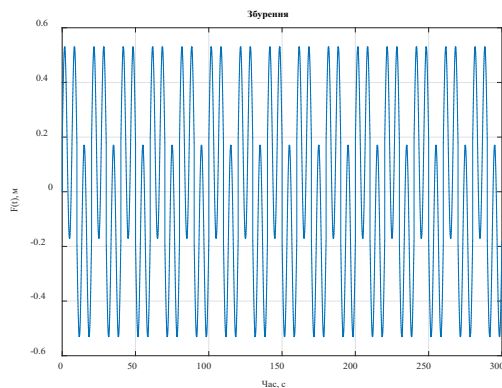


Рис. 6. Часова реалізація збурення при імітації руху мобільного робота по в'язкій місцевості

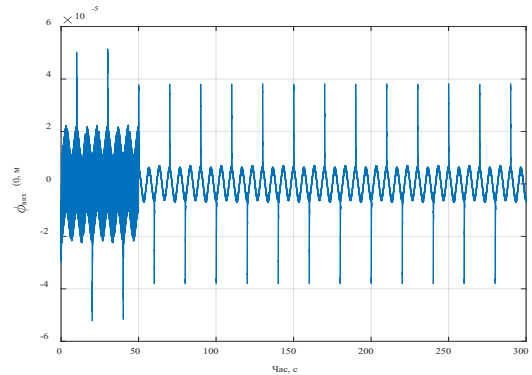


Рис. 7. Похибка стабілізації системи з адаптивним ПІ-регулятором

Аналіз результатів моделювання, наведеного на рис. 7, показав, що СКВ похибки складає $0,013^\circ$.

Висновок

Отримані результати підтверджують, що застосування адаптивного ПІ-регулятора істотно підвищує робастність системи стабілізації мобільного робота та забезпечує її стійку працездатність у широкому діапазоні зовнішніх і параметричних збурень, що є критично важливим під час експлуатації спеціалізованого обладнання в реальних умовах, а також дозволяє збільшити навантаження на стабілізаційну платформу до трьох разів без втрати точності стабілізації. Усі результати проведеного моделювання показують, що похибка стабілізації не перевищує $0,02^\circ$ при різних збуреннях та збільшенні навантаження у 3 рази, що відповідає встановленим вимогам.

Список використаних джерел

1. Бурау Н. І., Осовцев А.В. Обґрунтування вибору елементної бази системи стабілізації обладнання мобільного роботу класу «міні». Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2025, №1, С. 108 - 117.
2. 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(34), С. 99 – 107.
3. Petros Ioannou, Jing Sun. Robust Adaptive Control. Dover Publications. 2015. 412 p.
4. Trung Nguyen, Keum-Shik Hong. MRAC for nonlinear servo systems with friction. Control Engineering Practice. 2018. Vol. 76. P. 145–158.
5. Shaowu Pan, Zhenyu Liu, Yong Chen, Wenliang Xiao. Adaptive compensation in gimbal systems with nonlinear friction. Sensors. 2018. Vol. 18(11). P. 1–15.