

УДК 629.3.025.2(045)

О. А. Сущенко, канд. техн. наук, доц.,
С. П. Малярів,
Р. А. Сайфетдінов,
Г. Є. Янкелевич, канд. техн. наук

ОСОБЛИВОСТІ АВТОНОМНОГО ТЕСТУВАННЯ СТАБІЛІЗАТОРА НАЗЕМНОГО РУХОМОГО ОБ'ЄКТА

Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: fsu@nau.edu.ua
ВАТ "НВК "КЗА ім. Г.І. Петровського", e-mail: kza@g.com.ua

Виконано аналіз можливих способів завдання тестових сигналів для контролю стабілізатора в умовах автономного тестування. Запропоновано методику визначення динамічної похибки стабілізатора та визначено спосіб її оцінки.

Ключові слова: стабілізатор, динамічна похибка, автономне тестування, наземний рухомий об'єкт, режим наведення, режим стабілізації

Постановка проблеми. Останнім часом зростає актуальність створення нових перспективних стабілізаторів наземних рухомих об'єктів з дискретним регулятором. Створення таких стабілізаторів потребує використання нових методів перевірки його похибок, які б дозволяли успішно розробляти нові зразки систем досліджуваного класу, призначені для експлуатації в умовах бездоріжжя. При цьому велике значення має перевірка точнісних параметрів, перш за все динамічної похибки, та створення відповідних методик перевірки за умови автономного тестування, що є актуальним для розробників стабілізаторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Загальні принципи підходів до організації перевірок методичної похибки та її оцінювання для систем автоматичного керування широкого класу наведено у праці [1]. Аналіз похибок гіроскопічних систем стабілізації, до яких належить система досліджуваного типу, наведено у праці [2]. Теоретичну оцінку динамічної похибки можна визначити на підставі передатної функції системи; відповідний математичний опис стабілізатора наведено у праці [3].

Методика визначення динамічної похибки стабілізатора. У практиці створення стабілізаторів передбачається оцінювання точнісних параметрів за умови встановлення на наземному об'єкті та руху наземного об'єкта по випробувальній трасі. Цей процес досить складний і потребує використання випробувальної траси, наземного рухомого об'єкта та кіноапаратури. Перехід до створення стабілізаторів з дискретними регуляторами дозволяє створювати методики параметрів системи з використанням програмних засобів. За таких умов можлива організація контролю стабілізатора під час автономних перевірок за умови використання випробувального стенда, що є більш зручним для розробника стабілізатора.

Одним з найбільш важливих параметрів стабілізатора є динамічна похибка. Поняття динамічної похибки досить широке. До динамічних похибок систем широкого класу керування належать усі види похибок, які трапляються під час динамічних процесів, наприклад, за умови змінюваних зовнішніх впливів (збурень або керувань). На підставі теореми граничного переходу вираз для статичної похибки можна подати у вигляді [1]

$$x(t) = \left[\frac{g(t)}{1+W(p)} \right]_{p \rightarrow 0} + \left[\frac{\sum_{k=1}^n W_k(p) f_k}{1+W(p)} \right]_{p \rightarrow k},$$

де $x(t)$ – статична похибка; $g(t)$ – задавальний вплив; $W(p)$ – зображення розімкненої передатної функції за Лапасом; $W_k(p)$ – передатна функція за збуренням; f_k – збурювальний вплив; k – кількість збурень.

На рис. 1, 2 введено такі позначення: W_1 – передатна функція пульта керування для режиму наведення та W_1 – блок задання переносної кутової швидкості для режиму стабілізації; W_2 – послідовне з'єднання інтегратора з підсилювачем; W_3 – послідовне з'єднання підсилювача напруги та широтно-імпульсного модулятора; W_4 – об'єднана модель двигуна та об'єкта керування у просторі станів; W_5 – модель гіротахометра; W_6 – послідовне з'єднання підсилювача, фільтрів високих та низьких частот, які обслуговують сигнал зворотного зв'язку за струмом, що надходить з датчика струму і являє собою збурення; W_7 – модель фільтра низьких частот сумарного сигналу за струмом та кутовим прискоренням; W_8 – послідовне з'єднання підсилювача та фільтра низьких частот (диференціатора) сигналу кутової швидкості; W_9 – модель суматора з фільтром низьких частот для сигналу за збуренням з урахуванням смугового фільтра, який забезпечує роботу гіротахометра на безпечних для нього частотах; W_{10} – модель підсилювача; W_{11} – модель фільтра низьких частот сигналу головного зворотного зв'язку, який надходить від вимірювача абсолютної кутової швидкості системи; $W_{12} = I_{p.m} \frac{1}{s}$ – модель формування моменту, зумовленого переносною швидкістю робочого модуля, тобто кутовою швидкістю об'єкта, на якому встановлюється стабілізатор, для горизонтального каналу, та $W_{12} = I_{6.a} \frac{1}{s}$ – модель формування моменту, зумовленого переносною швидкістю блока апаратури, тобто кутовою швидкістю об'єкта, на якому встановлюється стабілізатор для вертикального каналу; W_{13} – модель підсилювача суматора відносної та переносної кутових швидкостей робочого модуля та блока апаратури для горизонтального та вертикального каналів відповідно. Слід зазначити, що моделі W_{12} та W_{13} використовуються в режимі стабілізації та в сумісному режимі наведення і стабілізації. Номерами з індексами 1 та 0 позначено входи та виходи окремих моделей. Об'єднану пружним зв'язком модель двигуна та об'єкта керування детально описано у праці [2].

На підставі структурних схем 1, 2 та математичного опису, поданого у праці [2], можна отримати вирази для передатних функцій розімкненої та замкненої схем і частотних характеристик стабілізатора наземного рухомого об'єкта, наприклад, використовуючи обчислювальні засоби системи MATLAB.

Для аналізу точності стабілізації доцільно замінити два канали впливів кутової швидкості одним через уведення відповідних передатних функцій за збуренням [2]. При цьому необхідно забезпечити приведення збурення до виходу приводу через відповідні перетворення.

Серед похибок стабілізатора можна виокремити три найважливіші складові. Перша складова характеризує похибку наведення відносно заданого вхідного сигналу, тобто похибку задавального впливу і визначається виразом

$$x_{\text{нав}} = \frac{U_{\text{п.к}}}{[1 + W(p)]},$$

де $U_{\text{п.к}}$ – напруга пульта керування.

Друга складова характеризує похибку, зумовлену дією зовнішніх моментів. Зазвичай ця похибка визначається відносно кута положення об'єкта керування і її можна описати виразом

$$x_{\text{мом}} = \frac{W_{M1} M}{[1 + W(p)]p},$$

де W_{M1} – передатна функція за моментом незрівноваженості, M – момент незрівноваженості.

Третя складова є похибкою стабілізації і враховує дію кутової швидкості наземного об'єкта, на якому встановлюють стабілізатор. Її також визначають відносно кута положення об'єкта керування. Цю кутову швидкість розглядають як збурення. Джерелом похибки стабілізації є також момент обертання, зумовлений кутовою швидкістю наземного рухомого об'єкта, що діє на привід стабілізатора. Тоді сумарна похибка буде визначатись виразом

$$x_{\text{стаб}} = \frac{(1 - W_{M_2} W_{\Pi} Jp) \omega_{\text{н}}}{[1 + W(p)]p},$$

де W_{M_2} – передатна функція за моментом обертання, зумовленим швидкістю носія; W_{Π} – передатна функція приведення моменту збурення, зумовленого кутовою швидкістю носія, до входу об'єкта керування.

Основні похибки стабілізатора за умов автономного тестування з урахуванням можливостей випробувального стенда пропонується оцінювати в такий спосіб.

Похибку наведення доцільно визначати заданням напруги пульта керування та оцінюванням відповідної кутової швидкості. Перевірку доцільно виконувати за умови нерухомості носія. Похибку наведення визначають рівнянням перехідної функції $x_{\text{нав}} = x_{\text{ст}} h(t)$.

Похибку за моментом доцільно оцінювати заданням стрибкоподібного змінювання моменту, що діє на привід, передусім моменту незрівноваженості, та визначенням різниці кутів положення об'єкта керування стабілізатора. Цю перевірку виконують за умови нерухомості носія. Вона дозволяє також виконати оцінку кутової жорсткості системи.

Похибку стабілізації доцільно оцінювати заданням руху носія, змінюваного відповідно до гармонічного закону. Такий режим контролю досить поширений, оскільки дозволяє найбільш повно оцінити динамічні властивості системи стабілізації [1]. Під час руху за гармонічним законом безперервно змінюється напрямок руху наземного об'єкта та відповідно об'єктів стабілізації, при цьому одночасно змінюється напрямок дії сил сухого тертя, що дає змогу якомога ліпше оцінити динамічні властивості стабілізатора. За умови задання такого руху похибка кутового положення в усталеному режимі буде змінюватись за гармонічним законом з частотою $x(t) = x_{\text{max}} \sin(\omega_{\text{к}} t + \psi)$. З огляду на наявність зсуву фази точність стабілізатора може бути оцінена за максимальною амплітудою x_{max} . Величину цієї амплітуди визначають символьним методом на підставі підставлення $p = j\omega_{\text{к}}$ [1]

$$x_{\text{max}} = \frac{\omega_{\text{н}} - |W_{M_2}(j\omega)W_{\Pi}(j\omega)Jj\omega| \omega_{\text{н}}}{|1 + W(j\omega)| j\omega}. \quad (1)$$

Оскільки амплітуда похибки значно менша за амплітуду вхідного впливу, то вираз (1) можна замінити приблизним виразом

$$x_{\text{max}} = \frac{\omega_{\text{н}} - |W_{M_2}(j\omega)W_{\Pi}(j\omega)Jj\omega| \omega_{\text{н}}}{|W(j\omega)| j\omega},$$

де $|W(j\omega)|$ – модуль частотної передатної функції розімкненої системи за умови, що $\omega = \omega_{\text{к}}$. Передатні функції для оцінювання максимальної амплітуди динамічної похибки можна визначити за структурними схемами, показаними на рис. 1, 2.

Для об'єктів досліджуваного класу під час випробувань у складі наземного рухомого об'єкта вважається за доцільне використовувати випробувальну трасу. За умови використання випробувального стенда під час автономного тестування ці перевірки аналогічні заданню змінюваної за гармонічним законом кутової швидкості, що відповідає кутовому профілю контрольної траси, який визначають виразом $\varphi(t) = \varphi_{\text{max}} \sin \omega_{\text{к}} t$. Тоді кутова швидкість буде визначатись за виразом $\omega_{\text{н}} = \dot{\varphi}(t) = \varphi_{\text{max}} \omega_{\text{к}} \cos \omega_{\text{к}} t$. Тестові сигнали,

які відповідають випробувальній трасі, слід задавати з урахуванням особливостей випробувального стенда. Є різні способи задання таких сигналів. По-перше, контрольний сигнал може задаватись безпосередньо на виході інтегратора напругою, яка дорівнює куту, змінюваному за гармонічним законом, по-друге, – на вході інтегратора; по-третє, – на вході гіротахметра заданням сигналу, пропорційного кутовій швидкості. Результати моделювання усіх можливих способів задання кутових сигналів подано на рис. 3.

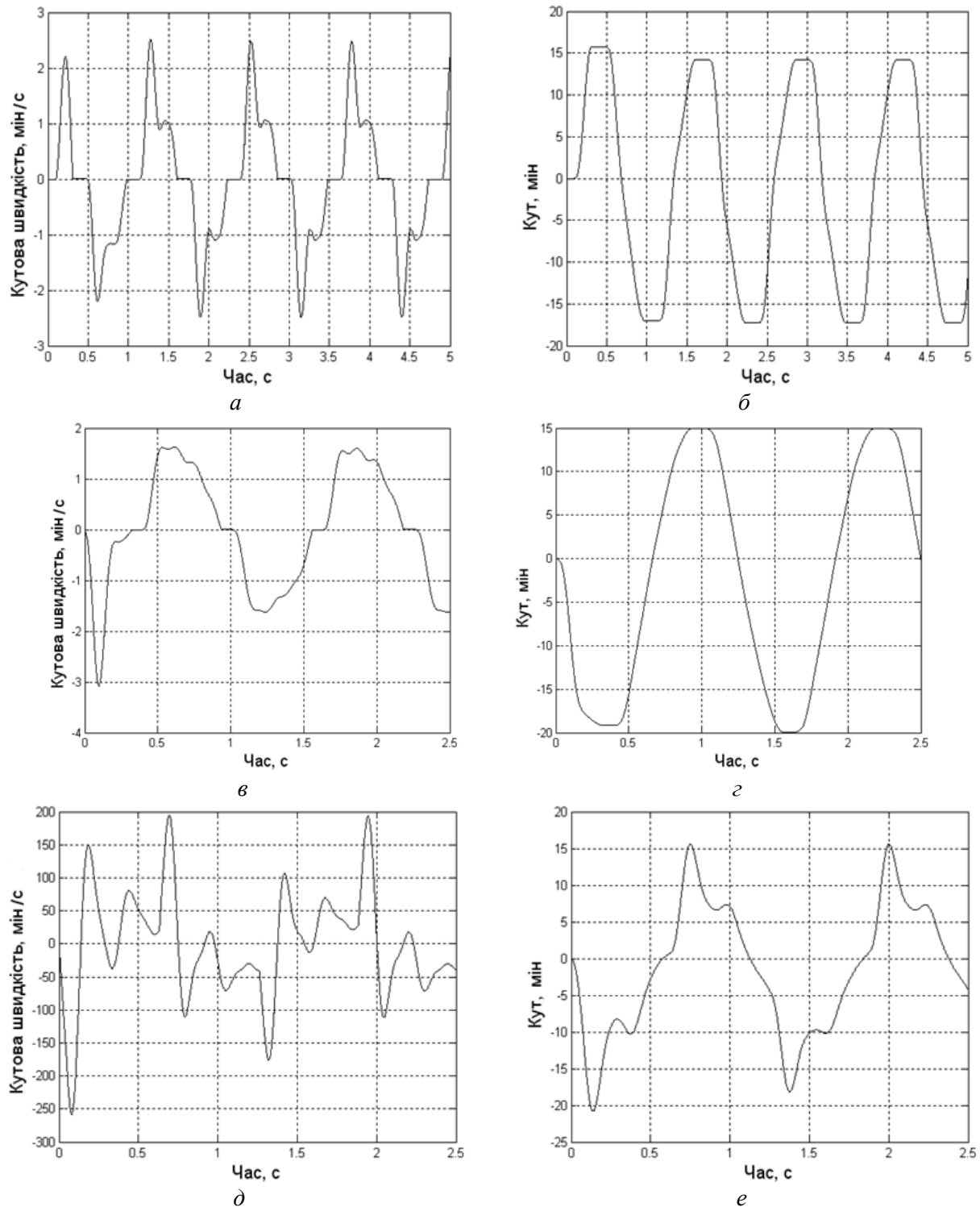


Рис. 3. Кутові швидкості та похибки кутового положення стабілізатора за умови різних способів задання контрольних сигналів: *а, б* – на виході інтегратора; *в, г* – на вході ланцюга інтегратора; *д, е* – на вході гіротахметра

На підставі аналізу цих результатів вважається за доцільне оцінювати динамічну похибку стабілізатора за рахунок задання гармонічного сигналу програмними засобами контрольного обладнання після інтегратора в основному тракті дискретного регулятора. Такий спосіб перевірки забезпечує імітацію руху наземного об'єкта у різних напрямках з різними швидкостями. При цьому відбувається підсумовування вихідного сигналу тракту керування, який відповідає відхиленню об'єкта керування на деякий кут, і задавального впливу, що зумовлює відхилення об'єкта стабілізації за кутом із заданими амплітудою та частотою.

Отже, методика перевірки динамічної похибки стабілізатора, яка реалізується програмними засобами, має складатись з таких етапів.

1. Тарування амплітуди гармонічного впливу для забезпечення відхилення об'єктів керування стабілізатора на деякі задані кути. Стабілізатор містить два незалежні канали у вертикальній та горизонтальній площинах. Перевірки за обома каналами мають деякі несуттєві особливості, наприклад, стосовно величини амплітуди модельованого сигналу.

2. Формування синусоїдного сигналу і задання його у точку тракту визначення кута розузгодження кутового положення стабілізованого об'єкта протягом деякого заданого часу.

3. Підсумовування тестового гармонічного сигналу й основного сигналу тракту керування.

4. Визначення амплітуди кутового положення об'єкта стабілізації та оцінювання різниці між визначеною амплітудою та її заданим значенням. Ця оцінка і є оцінкою динамічної похибки.

Запропонований підхід можна використовувати для оцінювання запасу стійкості за такої послідовності дій: визначення в процесі тарування в статичному режимі амплітуди сигналу, який забезпечує відхилення стабілізованого об'єкта на деякий заданий кут та задання сигналу з визначеним рівнем у контрольну точку після інтегратора протягом певного заданого часу. Процес визначення перерегулювання показано на рис. 4.

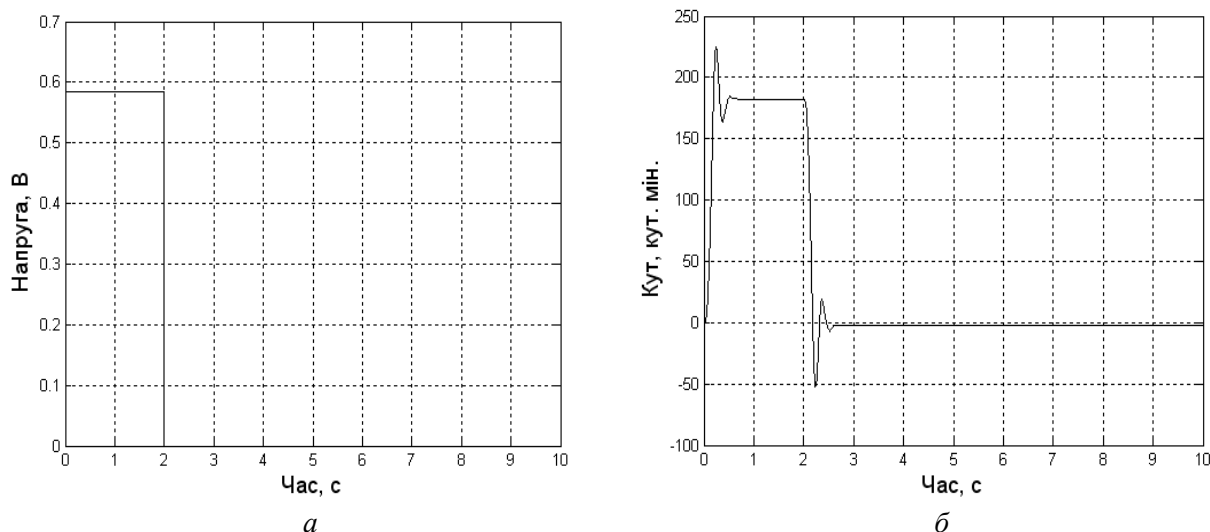


Рис. 4. Методика перевірки перерегулювання: *а* – задання тестового сигналу; *б* – процес змінювання кутового положення стабілізованого об'єкта

Висновки. Визначено особливості автономного тестування стабілізатора наземного рухомого об'єкта. Запропоновано методику визначення динамічної похибки стабілізатора із дискретним регулятором, яка може бути реалізована за допомогою програмних засобів.

Список літератури

1. *Теория систем автоматического регулирования* // В. А. Бесекерский, Е. П. Попов – М.: Наука, 1975. – 768 с.
2. *Кочергин В. В.* Следящие системы с двигателем постоянного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 168 с.
3. *О. А. Сущенко, Р. А. Сайфетдінов* Математична модель системи стабілізації рухомого наземного об'єкта / Електроніка та системи управління. – К. 2007. – №3(13). – С. 146 – 151.

О. А. Сущенко, С. П. Маляров, Р. А. Сайфетдінов, Г. Є. Янкелевич

Особенности автономного тестирования стабилизатора наземного объекта

Выполнен анализ возможных способов задания тестовых сигналов для контроля стабилизатора в условиях автономных испытаний. Предложена методика определения динамической ошибки стабилизатора и определен способ ее оценки.

O. A. Sushchenko, S. P. Malyarov, P. A. Sayfetdinov, G. E. Yanklevich

Features of off-line testing for ground vehicle stabilizer

Possible ways to give test signals for stabilizer checking in conditions of line-tests are analysed. Method for stabilizer dynamic error determination and way of its estimation are suggested.