

УДК 629.3.025.2(045)

О. А. Сущенко, канд. техн. наук,
С. В. Карасьов

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРИЛАДОВОГО СКЛАДУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

Виконано аналіз особливостей приладового складу систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв. Досліджено вплив інтервалу дискретизації і типу інерціального датчика на характеристики системи. Наведено результати моделювання.

Ключові слова: система стабілізації, інформаційно-вимірювальний пристрій, інерціальний датчик.

Вступ. Необхідність стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв зумовлена високими точнісними вимогами до визначення положення їх ліній візування відносно заданого орієнтира та супроводження цього орієнтира. Підтримувати постійної орієнтації інформаційно-вимірювального пристрою у напрямку орієнтира стає складно, якщо пристрій встановлено на рухомому об'єкті, або якщо орієнтир являє собою динамічний об'єкт. Керування лінією візування інформаційно-вимірювального пристрою за допомогою системи інерціальної стабілізації дозволяє розв'язати ці складні проблеми. Рационально спроектована система інерціальної стабілізації керує лінією візування інформаційно-вимірювального пристрою з високою точністю, незважаючи на необхідні маневри об'єкта, випадковий рух та зовнішні збурення.

Керування лінією візування характеризується двома важливими вимогами. Лінія візування має бути визначеною відповідно до розрахованого напрямку на орієнтир або на ділянку навколо нього і утримуватись незмінною в інерціальному просторі відповідно до обраної орієнтації. Перша вимога характеризується похибкою стеження, в той час, як друга вимога характеризується розсіюванням.

Першою головною метою інерціальної стабілізації платформи зі встановленими на ній інформаційно-вимірювальними пристроями є забезпечення високої якості зображення орієнтира або ділянки навколо нього. У зв'язку з цим виникають три проблеми, пов'язані з рухом орієнтира, рухом об'єкта та впливом навколишнього середовища [1].

Проблема стеження за рухомим орієнтиром полягає у такому. Якщо орієнтація поля огляду інформаційно-вимірювального пристрою є фіксованою та некерованою, рухомий орієнтир може вийти з поля огляду пристрою. При цьому втрата орієнтира може зумовлюватись його як переносним, так і обертальним рухом.

Рух об'єкта, на якому встановлюється інформаційно-вимірювальний пристрій, також може призвести до похибок. Переносний рух об'єкта може спричинити вихід орієнтира з поля зору пристрою, якщо система інерціальної стабілізації не відпрацьовує зміни у відносному русі між орієнтиром та рухомим об'єктом. Аналогічно обертання рухомого об'єкта за кутами ристання, крену та диференту може призвести до втрати лінії візування з поля зору пристрою. Вібрація або рух об'єкта з малими амплітудами можуть також спотворити зображення орієнтира.

Навколишнє середовище впливає на якість стеження. У багатьох випадках, пов'язаних зі стеженням за орієнтиром, керування інерціальною стабілізованою платформою базується на інформації, що надходить від оптичного датчика. Атмосферні умови, такі як туман, дим або пил між оптичним датчиком та орієнтиром і затінення схилами та деревами, можуть спричинити втрату орієнтира. За допомогою методів оброблення зображення протягом його втрати процес стеження можна продовжити.

Система інерціальної стабілізації зі встановленими на ній інформаційно-вимірювальними пристроями дає змогу також визначати положення орієнтира відносно уже визначеної системи координат. Датчики, встановлювані на стабілізованій платформі, визначають положення орієнтира у системі координат, зв'язаній з об'єктом. Для визначення положення орієнтира відносно інерціальної системи координат необхідно суміщати вимірювання інерціальним вимірювальним блоком або інерціальною навігаційною системою з вимірюваннями датчиками орієнтації лінії візування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У праці [1] наведено основні методи створення сучасних інерціальних стабілізованих платформ, які важливі для інформаційно-вимірювальних систем широкого класу, встановлюваних на різних рухомих об'єктах. Детальний аналіз інерціальної стабілізації оптичних систем і таке новітнє застосування, як стабілізація мобільних антен супутникового зв'язку, тобто антен, установлюваних на наземних рухомих об'єктах, наведено у працях [2; 3].

У всіх вищезгаданих працях подані загальні концепції інерціальної стабілізації, підходи до побудови контурів керування, різні аспекти проектування, а також обґрунтовано необхідність системного підходу до створення інерціальних стабілізованих платформ.

Огляд приладового складу. Характеристики систем інерціальної стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв значною мірою залежать від приладів, що входять до їх складу [1]. Найважливішою складовою таких систем є гіроскопічні прилади, які натеper випускаються у широкому діапазоні за габаритами, вартістю та основними характеристиками. До найбільш критичних параметрів гіроскопічних приладів належать смуга пропускання та шуми. Якщо гіроскопічний прилад використовується у системі зворотного зв'язку, його смуга пропускання та динамічні характеристики визначають смугу пропускання системи у цілому. Тому гіроскопічний прилад має характеризуватись широкою смугою пропускання до декількох сотень герців у найбільш відповідальних випадках. Шуми гіроскопічного приладу значно впливають на характеристики системи у цілому. Водночас точність масштабного коефіцієнта та його широке застосування не мають вирішального значення.

В інерціальних системах стабілізації використовують різні типи гіроскопічних приладів. У найбільш відповідальних випадках дотепер використовують електромеханічні гіроскопічні вимірювачі кута або кутової швидкості завдяки низьким шумам та високим динамічним характеристикам. Частіше починають використовувати волоконні оптичні швидкісні гіроскопи, оскільки вони також мають високі динамічні характеристики та більший ресурс роботи порівняно з електромеханічними гіроскопами. Кільцеві лазерні гіроскопи широко застосовують в інерціальній навігації завдяки відмінним характеристикам стосовно відходів та характеристик масштабного коефіцієнта. Але їх рідко використовують для стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв унаслідок їх великих розмірів та високих шумів квантування. Заслугове на увагу дослідження можливості використання гіроскопічних вимірювачів кутової швидкості, побудованих за MEMS-технологією, які характеризуються низькою вартістю та простотою експлуатації.

Критичними параметрами, що визначають вибір підвісу платформи системи, є тертя та жорсткість несучої конструкції. Ці вимоги є суперечливими, оскільки жорсткий підвіс часто має найбільше тертя. Натеper найбільше поширені шарикопідшипникові опори, які часто встановлюють із попереднім натягом для усунення їх вільного руху. Попереднє ретельне оброблення дозволяє усунути зчеплення та збільшити тертя за умови дії високих температур. За малих швидкостей підвісу можна використовувати шарніри або цапфи. Хоча ці пристрої мають дуже низьке тертя, їх пружність впливає на систему керування у цілому. У разі жорстких вимог до тертя та наявності додаткового місця можуть використовуватися магнітні підвіси та газові підшипники, хоча ці пристрої дуже складні для встановлювання, і у цьому випадку досягнення необхідної жорсткості є проблематичним.

Системи інерціальної стабілізації потребують застосування виконавчих механізмів, здатних забезпечити необхідні моменти та швидкість без надлишкового зачеплення та гістерезису [1]. При цьому ставляться дві вимоги. До виконавчого механізму 1) має розвивати момент, спроможний придушити моменти збурення та виконати вхідні команди для забезпечення руху підвісу та лінії візування; 2) має реагувати на високочастотні шуми, неминучі для систем із широкою смугою пропускання, без насичення та перевантаження. Зазвичай швидкість стабілізованої платформи є малою, максимально $100^\circ/\text{с}$, тому під час конструювання зубчастої передачі можна зменшити розміри та масу виконавчого механізму, особливо за умови відомих вимог до моментів. Для систем з малим кутовим переміщенням можуть іноді використовуватись сталі стрічки, що дозволяє досягти необхідного передатного числа за умови відсутності люфтів та похибок унаслідок розділення кола на частини, які є характерними для зубців шестерні. Взагалі існує декілька недоліків використання зубчастих передач в інерціальних стабілізованих платформах. Незалежно від того, який механізм використовується для досягнення необхідного передатного числа, реактивний момент виконавчого механізму із зубчастою передачею являє собою момент збурення, який погіршує характеристики системи стабілізації. Крім того, більшість пристроїв із зубчастою передачею призводить до додаткового тертя та крутильного резонансу в системі. Тому перевага має віддаватись безредукторним виконавчим механізмам, якщо це не заперечує вимоги, поставлені до системи. До найбільш поширених безредукторних виконавчих механізмів належать електродвигуни постійного струму, спроможні розвивати великі моменти на малих швидкостях. Електроприводи з лінійною обмоткою ідеально підходять для застосувань з обмеженим обертанням, оскільки вони не мають зубчастого зачеплення і їх стала часу становить менше ніж 1 мс.

На додаток до інерціальних вимірювачів в інерціальних стабілізованих платформах для вимірювання положення підвісу відносно основи та положення лінії візування широко використовують датчики кутів. У системах із прямим зв'язком датчики кутів, тобто датчики відносного руху, необхідні для забезпечення процесу стабілізації. Найбільш важливими характеристиками цих датчиків є точність та роздільна здатність, яким має віддаватись перевага порівняно з розмірами та масою. Точність необхідна для керування положенням лінії візування, якщо система використовується в режимі стеження. Роздільна здатність важлива для випадку, коли датчик використовується для утримання лінії візування в усталеному положенні. Для усіх датчиків відносного руху точність залежить від ексцентриситету установки та механічних впливів, у той час, як роздільна здатність залежить від властивостей датчика, електронних перетворювачів та шумів аналогового сигналу. Слід зазначити, що точність вимірювань значно легше забезпечити для малого кутового переміщення. Для вимірювань більш ніж декілька градусів можна застосовувати індукційні датчики, наприклад, багатообмоткові синусно-косинусні обертальні трансформатори. У підвісах традиційно встановлюють індуктосини, оскільки вони є захищеними від впливу зовнішнього середовища і за умови правильного застосування можуть досягати високої точності, у той час як багатообмоткові датчики потребують осереднення внаслідок впливу ексцентриситету. Індуктосини також мають високу роздільну здатність, обмежену перш за все аналого-цифровим перетворенням та рівнем електричних сигналів.

Останнім часом набувають поширення інкрементальні енкодери, які забезпечують роздільну здатність до 10^{-6} рад завдяки інтерполяції сигналу аналогового детектора. Ці пристрої значно менші порівняно з індуктивними датчиками. Але досягнення високої точності потребує спеціальної установки або використання декількох головок зчитування для осереднення ексцентриситету установки. Енкодери мають також дещо кращі динамічні характеристики порівняно з індуктивними датчиками, ефективна смуга пропускання яких залежить від частоти збудження. Незалежно від використання енкодерів або індукційних

датчиків доцільно калібрувати вимірювальну систему. Але калібрування потребує адекватної відтворюваності і не може використовуватись для підвищення роздільної здатності.

Дослідження вибору мікроконтролера. Для проектування сучасної системи інерціальної стабілізації важливим є вибір інтервалу дискретизації, що, в свою чергу, впливає на вибір типу процесора та відповідно мікроконтролера, на якому будується цифровий блок керування системи. Відомо, що інтервал дискретизації може бути вибраний на підставі теореми Котельнікова [5]

$$f_d \geq 1/(2f_r),$$

де f_d – частота дискретизації; f_r – гранична частота.

На підставі експериментальних досліджень було встановлено, що гранична частота дискретизації системи досліджуваного типу становить 200 Гц, відповідно період дискретизації має бути не більший за 2,5 мс (400 Гц).

Під час вибору процесора для реалізації цифрового блока керування враховувалась необхідність досягнення компромісу між вимогами до точності та вартості, а також ступінь складності проектування пристроїв спряження, який підвищується зі збільшенням тактової частоти процесора. Аналіз заданих вимог дозволяє зупинитися на мікроконтролерах, що належать до сім'ї i8051.

Результати дослідження вибору періоду дискретизації, з яких випливає можливість використання частоти дискретизації 200 Гц, показано на рис. 1.

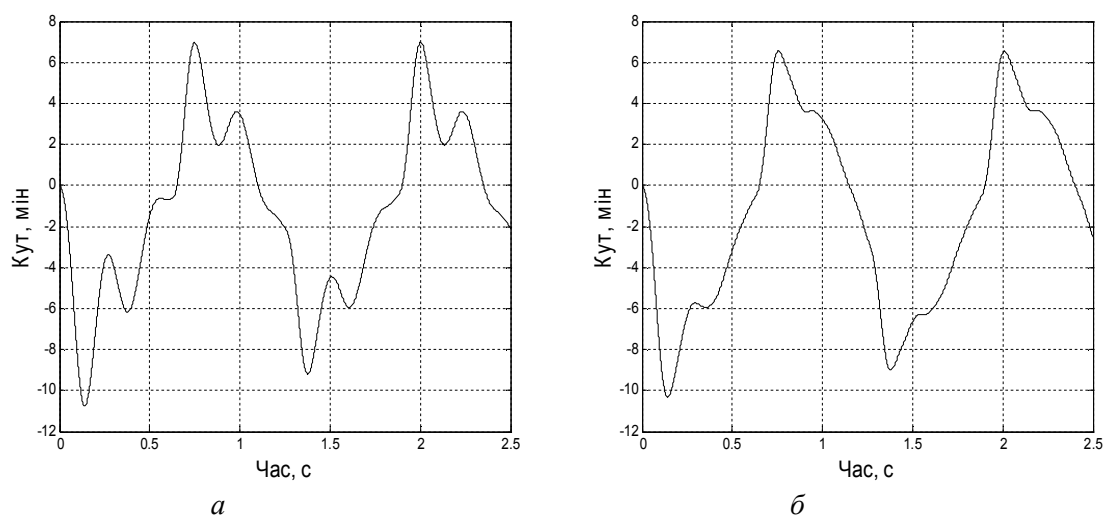


Рис. 1. Результати вибору інтервалу дискретизації: *а* – похибка відпрацювання гармонічного сигналу для інтервалу дискретизації 2,5 мс (400 Гц); *б* – похибка відпрацювання гармонічного сигналу для інтервалу дискретизації 0,5 мс (2000 Гц)

Дослідження можливості використання сучасних вимірювачів кутової швидкості. Принцип дії більшості мікроелектромеханічних гіроскопів ґрунтується на здатності вібраційного механічного елемента сприймати обертання. Такі датчики не мають обертальних частин і не потребують застосування шарикопідшипників, що полегшує їх мініатюризацію та виготовлення. На підставі огляду сучасного стану і тенденцій їх розвитку [4] було визначено MEMС-гіроскопи, найбільш придатні до застосування у системах інерціальної стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, що встановлюються на наземних рухомих об'єктах. Відповідно до аналізу таких характеристик, як діапазон вимірювання, поріг чутливості, смуга пропускання та стійкість до ударів було визначено, що найбільш придатними для вищезгаданого застосування є малогабаритні мікромеханічні гіроскопи виробництва Gladiator Technologies G20, G5200 з низьким енергоспоживанням та великим ресурсом експлуатації [6]. Результати моделювання процесів стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, призначених для експлуатації на наземних рухомих

об'єктах, показано на рис. 2. Для дослідження була використана математична модель МЕМС-гіроскопа [7] у вигляді передатної функції $W = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2}$, де ω – смуга пропускання; ξ – коефіцієнт демпфування.

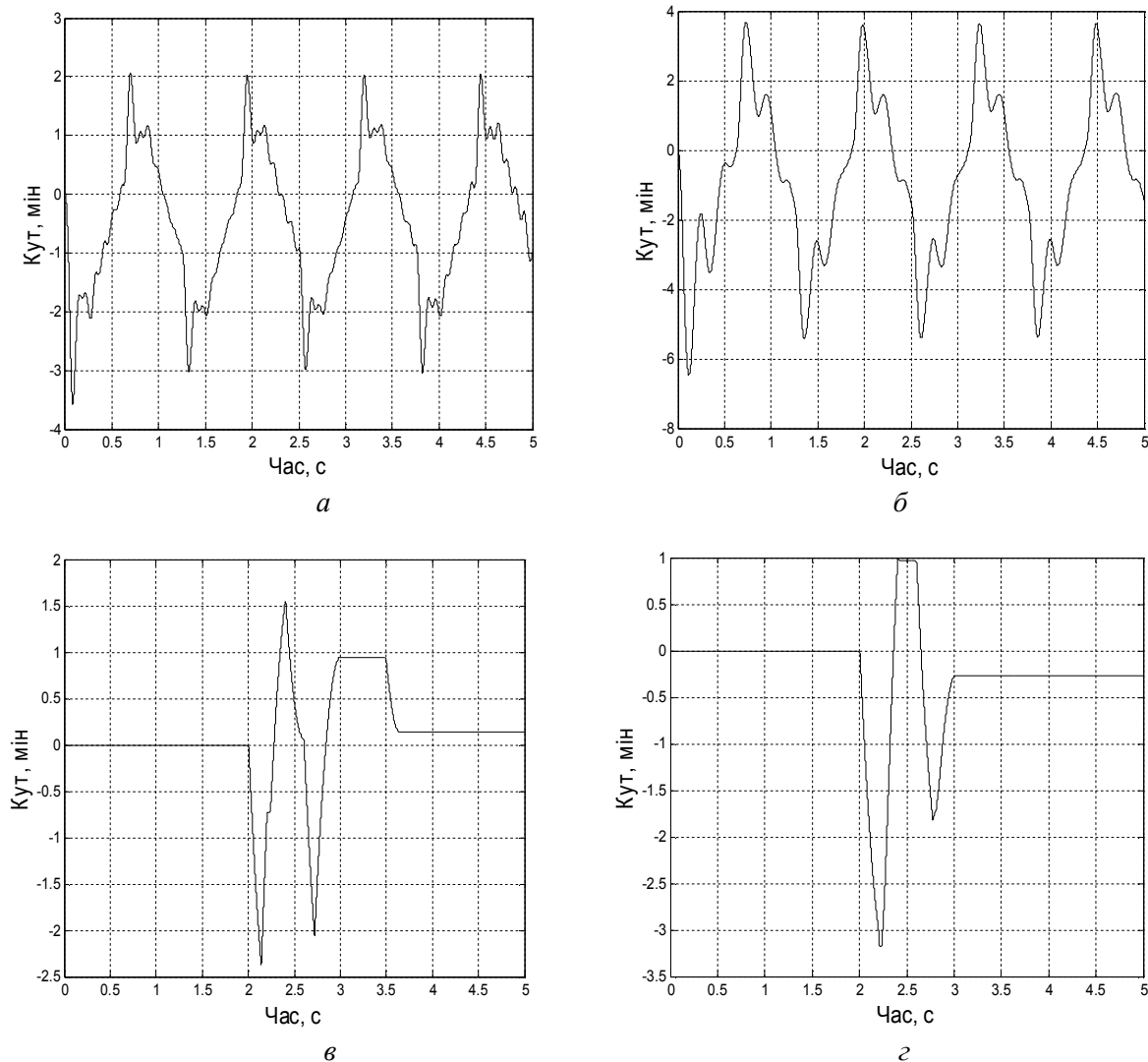


Рис. 2. Реакція системи на гармонічну кутову швидкість: а – для G20; б – для G5200 та імпульсне збурення за моментом в – для G20; г – для G5200

Використання МЕМС-гіроскопів, незважаючи на низку їх переваг, можливе за умови коригування температурних похибок та випадкових відходів. З цієї точки зору заслуговує на увагу цифровий МЕМС-гіроскоп G20, який містить чутливий МЕМС-елемент, спеціальну інтегральну мікросхему та мікропроцесор. Цифрове керування повністю вилучає вплив температурних явищ та явищ старіння, що є характерним для аналогової електроніки та забезпечує постійні характеристики у широкому діапазоні умов експлуатації. Крім того, гіроскопи зазначеного типу мають убудовану систему захисту від вібрацій та ударів.

У деяких випадках традиційні електромеханічні гіроскопи потребують використання смугових фільтрів. Зрозуміло, що заміна традиційного вимірювача на МЕМС-гіроскоп дозволяє вилучити ці фільтри із блока керування. Відповідно до результатів моделювання заміна гіроскопа забезпечує високу точність та спрощує структуру блока керування. Щодо

відмінностей динамічних характеристик MEMС-гіроскоп характеризується зменшенням сталої часу на порядок.

Висновки. Виконано огляд приладового складу системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв. Досліджено можливість заміни гіроскопічних вимірювачів на більш перспективні та вирішено завдання вибору періоду дискретизації. Наведено результати моделювання.

Список літератури

1. *Hilkert J. M.* Inertially stabilized platform technology/ IEEE Control Systems / J. M. Hilkert – #1. – Vol. 28. – 2008. – P. 26 – 46.
2. *Masten M. K.* Inertially stabilized platforms for optical imaging systems / M. K. Masten // IEEE Control Systems. – #1. – Vol. 28. – 2008. – P. 47 – 64.
3. *Debruin D.* Control systems for mobile satcom antennas / D. Debruin // IEEE Control Systems. – #1. – Vol. 28. – 2008. – P. 86 – 101.
4. *Сущенко О.* Обзор современного состояния микроэлектромеханических датчиков угловой скорости и тенденции их развития. / О. А. Сущенко, С. В. Карасёв // Електроніка та системи управління. – 2011. – Vol. 27. – P. 83 – 88.
5. *Landau I.* Digital control systems. Design, identification and implementation / I. Landau, G. Zito. London: Springer-Verlag, 2006. – 484 p.
6. *G20 two axis MEMS gyro.* <http://www.gladiatortechologies.com>
7. *Woon-Tahk S.* Controller Design of a MEMS Gyro-Accelerometer with a Single Proof Mass/ Woon-Tahk Sung, Taesam Kang*, and Jang Gyu Lee. // “International Journal of Control, Automation, and Systems”. – 2008. – Vol. 6. – P. 873 – 883.

О. А. Сущенко, С. В. Карасёв

Исследование влияния приборного состава на характеристики системы стабилизации информационно-измерительных устройств

Выполнен анализ особенностей приборного состава систем стабилизации информационно-измерительных устройств. Исследовано влияние интервала дискретизации и типа инерциального датчика на характеристики системы. Приведены результаты моделирования.

О. F. Sushchenko, S. V. Karasyov

Research of instrument configuration influence on performances of the information-measuring stabilization system

In this paper is carried out analysis of instrument configuration for information-measuring stabilization systems. Influence of the sampling interval and type of the inertial sensor on a system's characteristics is researched. The simulation results are represented.