

УДК 629.3.025.2(045)

О.А. Сущенко, к.т.н., доц.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАСТОСУВАНЬ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Національний авіаційний університет  
E-mail: fsu@nau.edu.ua

*Наведено характеристику основних прикладних застосувань систем інерціальної стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, установлюваних на наземних рухомих об'єктах, нелінійних пристроїв, оптичних датчиків, мобільних антен супутникового зв'язку. Визначено їх основні особливості з точки зору організації ефективних процедур проектування.*

**Ключові слова:** інформаційно-вимірювальні системи, системи інерціальної стабілізації.

### Постановка проблеми

Актуальність застосування систем інерціальної стабілізації зумовлена необхідністю забезпечення високих вимог до точності процесів стабілізації та спостереження, що супроводжують експлуатацію інформаційно-вимірювальних систем на рухомих об'єктах.

Основна проблема інерціальної стабілізації полягає в урахуванні руху Землі й об'єкта, на якому встановлюється інформаційно-вимірювальна система, тобто в урахуванні переносної швидкості та переносних і коріолісових прискорень, зумовлених рухом Землі й об'єкта. У іншому випадку вони можуть вважатися системами інерціальної стабілізації в деякому наближенні.

Процес розвитку сучасних інформаційно-вимірювальних систем характеризується значними досягненнями в підвищенні їх точності, що потребує вдосконалення відповідних систем стабілізації. Підходи до проектування таких систем залежать від їх призначення. Дослідження їх сучасних прикладних застосувань є актуальним для визначення ефективних напрямів проектування.

### Аналіз досліджень і публікацій

Аспекти прикладного застосування інерціальної стабілізації інформаційно-вимірювальних систем висвітлюються у багатьох працях. Основні проблеми проектування систем досліджуваного типу, призначених для експлуатації на літальних та космічних апаратах, викладено у праці [1].

У праці [2] розглянуто узагальнені підходи до проектування систем інерціальної стабілізації та висвітлено актуальність пошуку нових алгоритмів синтезу оптимальних систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі з урахуванням їх актуальності для прикладних застосувань.

У праці [3] розглядаються особливості інерціальної стабілізації інформаційно-вимірювальних систем, призначених для експлуатації на морських рухомих об'єктах в умовах стохастичних збурень, зумовлених морським хвилюванням, наводиться характеристика систем стабілізації, експлуатованих на літаках та наземних рухомих об'єктах. Досліджено різні підходи до стабілізації інформаційно-вимірювальних систем, встановлюваних на рухомій основі, у тому числі методи безпосередньої та опосередкованої стабілізації.

При цьому велика увага надається питанням геометрії та кінематики систем безпосередньої та опосередкованої стабілізації, де найбільш складними є відповідні положення щодо кінематичних співвідношень. Особливості слідкувальних систем гіроскопічної стабілізації досліджено у праці [4].

У цій праці на перше місце виходить дослідження слідкувального приводу, тобто лише одна складова в ідеології створення стабілізованих платформ, але в ній міститься багато корисних положень про математичний опис об'єктів стабілізації та наводяться прикладні особливості створення таких систем.

Ця праця є корисною для створення систем стабілізації, призначених для встановлення на наземних рухомих об'єктах.

У термінології сучасної проблематики з часом відбулися зміни. Основні терміни зафіксовані у стандартах IEEE і детально проаналізовані у праці [5].

У праці [6] наведено основні підходи до створення сучасних інерціальних стабілізованих платформ, які мають значення для інформаційно-вимірювальних систем, установлених на рухомих об'єктах різного типу.

Детальний аналіз інерціальної стабілізації оптичних систем та таке новітнє застосування, як стабілізація мобільних антен супутникового зв'язку, виконано у працях [7; 8].

Інерціальна навігація за допомогою платформних систем не втратила своєї актуальності для технологічно розвинених країн. Такий підхід є актуальним для створення високоточних автономних систем, що не потребують корекції від зовнішніх джерел інформації. Сучасні досягнення та перспективи розвитку таких систем подано у праці [9].

У працях [6–9] наведено загальні концепції сучасної інерціальної стабілізації, підходи до побудовання контурів керування, різні аспекти проектування, необхідність системного підходу до створення інерціальних стабілізованих платформ.

Актуальні для інерціальної стабілізації інформаційно-вимірювальних систем широкого класу процедури робастної оптимізації, що дозволяє створювати системи, які в найкращій спосіб задовольняють вимоги стійкості до збурень за умови збереження вимог до точності, висвітлені у працях [10; 11].

Залежно від типу корисного навантаження основні прикладні застосування систем інерціальної стабілізації інформаційно-вимірювальних систем можуть бути класифіковані в такий спосіб:

- стабілізація апаратури спостереження та робочих модулів різного призначення;
- стабілізація пеленгаційних пристроїв;
- стабілізація оптичних датчиків та мобільних антен супутникового зв'язку.

### **Стабілізація апаратури спостереження, встановлюваної на наземних рухомих об'єктах**

Особливістю наземних систем стабілізації є значні розміри корисного навантаження, маса якого може варіюватися від кілограмів до тон, що впливає на габарити, конструкцію платформи, підвісу та на організацію контурів керування.

Типова система інерціальної стабілізації, призначена для керування лінією візування апаратури спостереження, містить:

- підвіс, який забезпечує зв'язок між апаратурою спостереження та рухомих об'єктом;
- систему стабілізації та керування лінією візування апаратури;
- додаткове обладнання різного призначення.

Загальноприйнятним підходом до стабілізації апаратури спостереження та робочих модулів різного призначення, встановлених на наземних рухомих об'єктах, залишається принцип інерціальної стабілізації платформи з установленим на ній корисним навантаженням, тобто принцип безпосередньої інерціальної стабілізації.

Завдяки керуючим впливам лінія візування апаратури залишається нерухомою в інерціальному просторі, незважаючи на обертання платформи, на якій установлюється апаратура.

У випадку одновісної системи стабілізації підвіс, на якому встановлено стабілізований об'єкт, являє собою вал платформи, підвішеної на підшипниках, що забезпечує його вільне обертання.

Конструкція підвісу має забезпечувати мінімальні значення моментів тертя та інших моментів збурення, що діють на платформу.

Для мінімізації дії моменту незрівноваженості необхідно збалансувати платформу з установленим на ній корисним навантаженням відносно точки опори підвісу.

У загальному випадку необхідно розглядати підвіс, який складається з трьох рамок із взаємно ортогональними осями.

При цьому динаміка системи буде описуватись рівняннями Ейлера [12]:

$$\begin{aligned} M_x &= \dot{\omega}_x J_x + \omega_y \omega_z (J_z - J_y) - (\omega_y^2 - \omega_z^2) J_{yz} - \\ &- (\omega_x \omega_y + \dot{\omega}_z) J_{xz} + (\omega_x \omega_z - \dot{\omega}_y) J_{xy}; \\ M_y &= \dot{\omega}_y J_y + \omega_x \omega_z (J_x - J_z) - (\omega_z^2 - \omega_x^2) J_{xz} - \\ &- (\omega_z \omega_y + \dot{\omega}_x) J_{xy} + (\omega_x \omega_y - \dot{\omega}_z) J_{xz}; \\ M_z &= \dot{\omega}_z J_z + \omega_x \omega_y (J_y - J_x) - (\omega_x^2 - \omega_y^2) J_{xy} - \\ &- (\omega_x \omega_z + \dot{\omega}_y) J_{yz} + (\omega_x \omega_z - \dot{\omega}_x) J_{xz}; \end{aligned}$$

де  $M_x, M_y, M_z$  – моменти, що діють за осями підвісу;

$\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$  – проекції кутового прискорення платформи на її власні осі;

$J_x, J_y, J_z$  – моменти інерції осей підвісу;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекції кутової швидкості платформи на її власні осі;

$J_{yz}, J_{xz}, J_{xy}$  – відцентрові моменти інерції підвісу.

Однією з важливих задач систем керування рухом та положенням робочих модулів, установлюваних на наземних рухомих об'єктах, є можливість довільної орієнтації стабілізованої апаратури у просторі відповідно до сигналу апаратури визначення місцезнаходження орієнтира.

До особливостей стабілізації робочих модулів, установлюваних на наземних рухомих об'єктах, слід віднести необхідність урахування руху об'єкта.

Найбільш сучасним підходом до створення систем, здатних функціонувати за умови збурень, зумовлених рухом об'єкта, є синтез робастних систем стабілізації.

### Стабілізація пеленгаційних пристроїв

Для стабілізації пеленгаційних пристроїв використовують опосередкований та безпосередній методи стабілізації [3].

Велике практичне значення має стабілізація антен радіолокаційних станцій для кораблів та літальних апаратів. Ця проблема виникла в результаті розвитку техніки радіолокації, необхідності точного керування положенням променя у просторі для повної реалізації переваг, зумовлених вузькою спрямованістю випромінювання.

Безпосередній метод стабілізації полягає в установці вимірювального пристрою на платформі й утриманні платформи разом із встановленим пристроєм у незмінному положенні у площині горизонту відносно заданого азимуту шляхом введення поправок на обертання площадки відносно осей стабілізації за допомогою пристрою стабілізації, який складається з підвісу та слідкувальних приводів. При використанні цього методу осі стабілізації платформи та осі наведення вимірювального пристрою не збігаються.

Опосередкований метод стабілізації вимірювального пристрою полягає в утриманні його лінії візування в заданому напрямку шляхом введення поправок на обертання вимірювального пристрою відносно осей наведення.

Для опосередкованого методу осі стабілізації та осі наведення збігаються. При цьому вимірювальний пристрій установлюється безпосередньо на рухомому об'єкті, а не на платформі. Схеми безпосереднього та опосередкованого методів стабілізації показано на рис. 1.

Технічна реалізація опосередкованого методу стабілізації в деяких випадках простіша за реалізацію безпосереднього методу. Це стосується вимірювальних пристроїв зі значними габаритами, наприклад, корабельних пеленгаційних пристроїв.

Розширення галузі застосування опосередкованого методу можна досягти за рахунок двох факторів: загальної стабілізації рухомого об'єкта та використання високоточних слідкувальних приводів. Залежно від кількості осей наведення існують одновісні, двовісні та тривісні системи опосередкованої стабілізації.

При виконанні стабілізації за креном пеленгаційний пристрій встановлюється на зовнішній рамці карданового підвісу.

Осі горизонтального наведення схем (рис. 2) перпендикулярні площині рамки підвісу, а вісь вертикального наведення схеми (рис. 2, б) – паралельна цій площині.

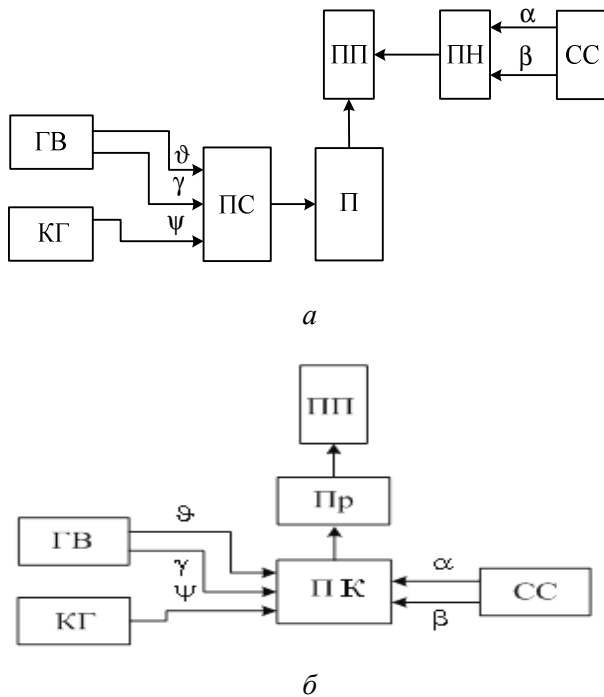


Рис. 1. Безпосередній (а) та опосередкований (б) методи стабілізації пеленгаційного пристрою:

ГВ – гіровертикаль;  
 КГ – курсовий гіроскоп;  
 ПС – привід стабілізації;  
 П – платформа;  
 ПП – пеленгаційний пристрій;  
 ПН – привід наведення;  
 СС – система супроводження;  
 ПК – перетворювач координат;  
 Пр – привід;  
 $\psi$ ,  $\vartheta$ ,  $\gamma$  – кути рихання, диференту, крену рухомого об'єкта (корабля);  
 $\alpha$ ,  $\beta$  – кути азимуту та місця

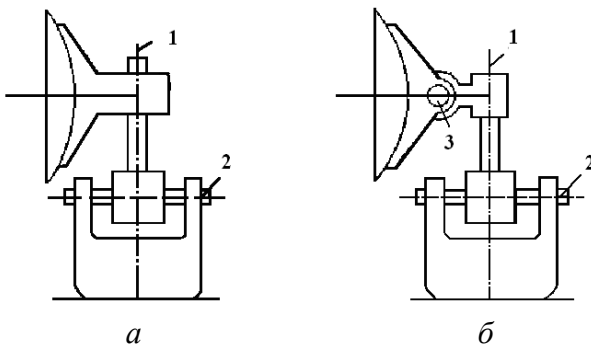


Рис. 2. Одновісна безпосередня стабілізація антени:

а – з горизонтальним наведенням;  
 б – з горизонтальним та вертикальним наведенням;  
 1 – вісь стабілізації;  
 2 – вісь горизонтального наведення;  
 3 – вісь вертикального наведення

### Стабілізація оптичних датчиків

Висока точність оптичних датчиків, у тому числі телевізійних або інфрачервоних камер може бути досягнута лише за умови керування лінією візування. Ця задача ускладнюється за умови встановлення оптичного датчика на рухомому об'єкті або за умови руху об'єкта спостереження. Її розв'язання можливе за допомогою систем інерціальної стабілізації.

Головною метою інерціальної стабілізації оптичних датчиків є визначення місцезнаходження об'єкта спостереження та досягнення високої точності його зображення. Більшість практичних застосувань оптичних датчиків вимагає стабілізації та визначення напрямку за двома осями відповідно використання двох ортогональних підвісів. При цьому можна застосовувати два підходи до інерціальної стабілізації (рис. 3):

- стабілізацію платформи з встановленим на ній корисним навантаженням;
- стабілізацію окремих елементів оптичного датчика.

У ході використання першого способу інерціальної стабілізації платформа з встановленим оптичним датчиком або в загальному випадку іншим корисним навантаженням повертається завдяки кардановому підвісу, що дозволяє змінювати положення датчика лінії візування відносно рухомого об'єкта.

Повороти платформи забезпечуються за допомогою слідкувальних приводів, які можуть використовувати двигуни з прямою передачею, встановлювані на осі підвісу, або двигуни, зв'язані з підвісом через трибову передачу або механічний зв'язок іншого типу.

Такий спосіб інерціальної стабілізації корисного навантаження отримав назву стабілізації платформи або стабілізації маси [6; 7].

У ході використання другого способу інерціальної стабілізації змінювання орієнтації лінії візування відбувається завдяки руху окремих елементів оптичного датчика, встановлюваних у кардановому підвісі, наприклад, дзеркала відображення, призми та лінзи, у той час як сам оптичний датчик є фіксованим відносно рухомого об'єкта. При цьому відбувається стабілізація окремого елемента оптичної системи.

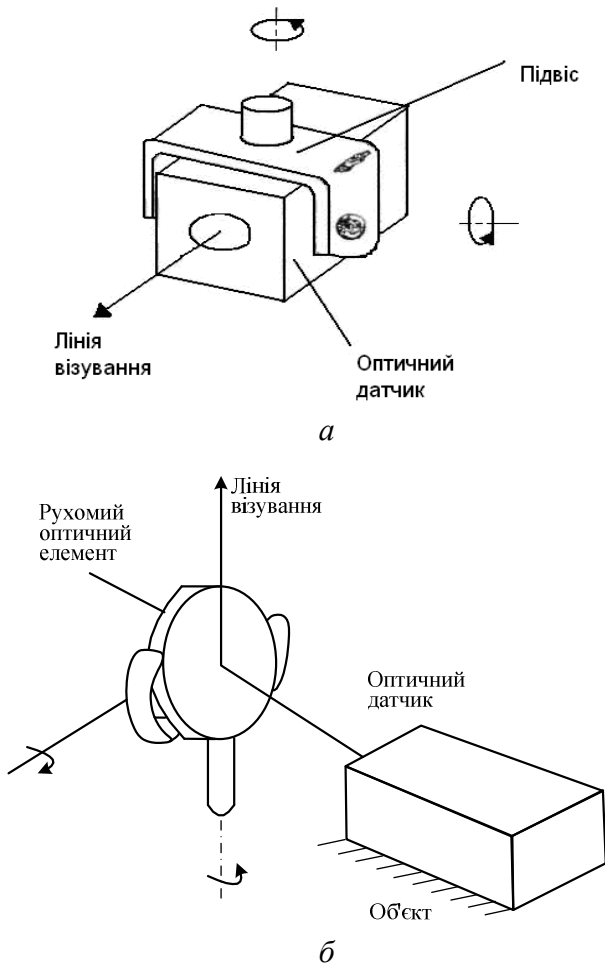


Рис. 3. Інерціальна стабілізація:  
 а – платформи з встановленим оптичним датчиком;  
 б – окремих елементів оптичного датчика

Головною метою інерціальної стабілізації платформи з встановленим на ній корисним навантаженням є підтримка незмінної орієнтації корисного навантаження в інерціальному просторі. Існує два основних способи реалізації такого підходу: за допомогою приводів із прямою та трибовою передачею [7].

Математична модель системи стабілізації з одновісним підвісом та безредукторним приводом може бути описана диференціальним рівнянням

$$J \frac{d^2 \theta_{\text{л}}}{dt^2} = M_{\text{к}} + M_{\text{зб}},$$

де  $J$  – сумарний момент інерції корисного навантаження та підвісу;

$\theta_{\text{л}}$  – кутове положення лінії візування корисного навантаження;

$M_{\text{к}}$  – момент керування, створюваний двигуном;

$M_{\text{зб}}$  – моменти збурення.

Еквівалентний момент збурення  $M_{\text{зб}}$  зумовлений дією всіх збурень, які впливають на систему. До таких збурень відносять:

- тертя в осях підвісу;
- пружні згини від електричних кабелів;
- явища дебалансу;
- вплив зв'язку з другими рамками підвісу для багатовісних підвісів;
- вплив руху об'єкта;
- внутрішні збурення, що діють на складові системи;
- зовнішні збурення.

Трибовий редуктор природно передає рух основи об'єкта корисному навантаженню.

При цьому система має компенсувати рух, зумовлений ривками, креном та диферентом об'єкта.

Динаміка системи стабілізації з трибовим редуктором описується системою рівнянь:

$$J_{\text{д}} \frac{d^2 \theta_{\text{д}}}{dt^2} = M_{\text{к}} - rF + M_{\text{зб1}};$$

$$J \frac{d^2 \theta_{\text{л}}}{dt^2} = RF + M_{\text{зб2}},$$

де  $J_{\text{д}}$  – момент інерції двигуна;

$\theta_{\text{д}}$  – кут повороту двигуна;

$r$  – радіус шестірні, спряженої з двигуном;

$F$  – сила взаємодії між спряженими шестірнями;

$R$  – радіус шестірні, спряженої з підвісом.

Момент збурення  $M_{\text{зб1}}$ , який діє на корисне навантаження, зумовлений тертям, вигинами кабелів, моментом незрівноваженості та взаємодією з зовнішнім середовищем.

Момент збурення  $M_{\text{зб2}}$ , що діє на двигун, зумовлений трибовим зчепленням та тертям у підшипниках.

Співвідношення для схеми з трибовим редуктором, які описують кінематичний зв'язок між корисним навантаженням, двигуном та об'єктом такі:

$$\theta_{л} = \theta_{л\text{до}} + \theta_{о};$$

$$\theta_{д} = \theta_{д\text{до}} + \theta_{о};$$

$$\theta_{д\text{до}} = N\theta_{л\text{до}},$$

де  $\theta_{л\text{до}}$  – орієнтація осі лінії візування відносно основи, тобто об'єкта;

$\theta_{д\text{до}}$  – орієнтація осі двигуна відносно об'єкта;

$\theta_{о}$  – кут нахилу основи відносно заданої системи відліку, наприклад, кут нахилу у площині горизонту;

$N$  – передаточне число.

Основна різниця між безредукторним приводом та приводом із трибовим редуктором полягає у впливі руху об'єкта на рух лінії візування для останнього випадку.

Контур керування системи з трибовим редуктором має компенсувати вплив швидкості об'єкта та моменту збурення  $M_{зб}$ .

Хоча найбільш поширеним способом інерціальної стабілізації є стабілізація корисного навантаження, встановленого на платформі, у деяких випадках використовується стабілізація окремих елементів оптичних приладів, установлюваних у кардановому підвісі (рис. 3, б).

Цей підхід характеризується зменшенням габаритів та маси системи в цілому. Тим не менш, кінематика такої системи може бути достатньо складною. У деяких випадках цей підхід може доповнюватися стабілізацією всієї оптичної системи за однією з її осей.

Якщо двигун установлений на осі дзеркала, рівняння кутового руху системи стабілізації оптичного елемента можуть бути подано у вигляді [7]:

$$J_{д} \frac{d^2\theta_{д}}{dt^2} = M_{к} - R(F_1 - F_2) + M_{зблз};$$

$$J_{г} \frac{d^2\theta_{г}}{dt^2} = r(F_1 - F_2) + M_{збр},$$

де  $R, r$  – радіуси валів дзеркала та гіроскопічного пристрою;

$F_1, F_2$  – сили, що діють на верхню та нижню частини стрічки, що з'єднує вали дзеркала та гіроскопічного пристрою;

$M_{зблз}$  – сумарний момент збурень, що діють за віссю дзеркала;

$J_{г}$  – момент інерції гіроскопічного пристрою;

$\theta_{г}$  – кут повороту гіроскопічного пристрою;

$M_{збр}$  – сумарний момент збурень, що діють за віссю гіроскопічного пристрою.

Кінематичні співвідношення системи стабілізації оптичного елемента подібні до співвідношень системи стабілізації з трибовою передачею з урахуванням того, що відношення  $R/r$  дорівнює 2:

$$\theta_{г} = \theta_{г\text{до}} + \theta_{о};$$

$$\theta_{д} = \theta_{д\text{до}} + \theta_{о};$$

$$\theta_{г\text{до}} = 2\theta_{д\text{до}},$$

де  $\theta_{г\text{до}}$  – орієнтація осі гіроскопічного пристрою відносно об'єкта.

Така система забезпечує збіг кутових рухів вала гіроскопічного пристрою та лінії візування

$$\dot{\theta}_{л} = \dot{\theta}_{г}.$$

### Стабілізація мобільних антен супутникового зв'язку

Перспективним застосуванням платформних систем інерціальної стабілізації є їх використання в системах керування антенами [8] мобільного супутникового зв'язку.

У наш час мобільний зв'язок охоплює майже весь світ, але швидкість передачі даних для деяких застосувань залишається недостатньо високою.

Збільшення швидкості передачі даних та зниження вартості можливі за умови використання нових супутників, спроможних забезпечити функціонування малих супутникових терміналів. Прикладом типового застосування таких терміналів є некомутовані захищені мережі підприємств та доступ до Інтернету в сільській місцевості.

Анени супутникового зв'язку рухомих малих терміналів мають поєднувати такі характеристики, як малу апертуру, високу пропускну здатність, високу швидкість передачі даних та доступне за ціною обслуговування.

За інших рівних умов двовісна платформа, яка забезпечує стабілізацію за азимутом та кутом місця, має більш жорстку конструкцію та є дешевшою та компактнішою порівняно з тривісною конфігурацією. На перший погляд, перевагою двовісної платформи є наявність напівсферичного поля зору, орієнтованого у площині горизонту. Але суттєвим недоліком двоосної платформи є наявність проблеми складання ортогональних рамок підвісу. Ця проблема виникає, коли кут місця дорівнює  $90^\circ$ , тобто лінія візування спрямована під прямим кутом і збігається з віссю азимутального підвісу. При цьому рух азимутального підвісу не впливатиме на орієнтацію лінії візування, і платформа буде мати тільки одну ступінь вільності.

У статичному випадку складання рамок не є проблемою, оскільки лінія візування може бути точно орієнтована всередині напівсферичного поля зору. Але режими слідкування та стабілізації функціонують у динаміці і потребують швидкого змінювання кутів нахилу рамок підвісу. При цьому явище складання рамок підвісу може вивести систему з ладу.

Цю проблему можна усунути введенням третьої осі. Існує чотири конфігурації тривісних підвісів рухомих антен супутникового зв'язку, які забезпечують наведення та стабілізацію за такими параметрами [8]:

- азимутом, кутом місця, кутом місця у поперечній площині;
- азимутом, горизонтом, кутом місця;
- азимутом, нахиленим горизонтом, кутом місця;
- нахилом, азимутом, кутом місця.

Система стабілізації за азимутом, кутом місця та кутом місця в поперечній площині відрізняється від системи стабілізації за азимутом та кутом місця додатковою третьою рамкою, яка є внутрішньою відносно рамки кута місця.

Ця додаткова рамка є носієм апертурного корисного навантаження. Якщо вісь цієї рамки знаходиться у площині горизонту (кут місця дорівнює  $0^\circ$ ), вона збігається із віссю рамки азимуту.

Введення третьої рамки забезпечує додаткову ступінь вільності, що дозволяє розв'язати головну проблему двовісного підвісу.

Головним недоліком цієї системи є те, що рух із великим кутом місця в поперечній площині може призвести до механічної або радіочастотної інтерференції.

Система стабілізації за кутом азимута, горизонтом та кутом місця відрізняється від системи стабілізації за азимутом та кутом місця додатковою середньою рамкою рівня, яка знаходиться між рамками азимуту та кутом місця.

Апертурне навантаження, електронні пристрої та рамки кута місця та кута нахилу до площини горизонту підтримуються однією щоглою, яка прикріплюється до рамки азимуту. На малих кутах місця стабілізація здійснюється за віссю азимуту, а на великих – за кутом нахилу до площини горизонту.

Такі системи характеризуються обмеженою жорсткістю та вантажопідйомністю, тому вони найбільш поширені за не дуже жорстких умов експлуатації, переважно, в комерційних застосуваннях.

Жорсткість системи стабілізації за кутом азимуту, горизонтом та кутом місця можна збільшити нахилом осі горизонтальної площини, внаслідок чого вона не буде ортогональною до осі азимуту. Нахил до  $35^\circ$  забезпечує підвищену жорсткість без суттєвого погіршення інших характеристик порівняно з традиційними підходами до створення конструкції підвісу. Але вантажопідйомність залишається обмеженою, і це є недоліком, якщо приймач-передавач є частиною корисного навантаження.

Система стабілізації за нахилом, азимутом та кутом місця відрізняється нахилом осі горизонту на більший кут, приблизно  $70^\circ$ . Власне ця вісь є вертикальною відносно площини азимуту, але підвіс у цілому встановлюється під деяким кутом нахилу в горизонтальній площині.

Осі азимуту та кута місця використовуються для попереднього визначення напрямку на супутник та стабілізації.

Вісь нахилу використовується для відхилення складових оптичної системи, які встановлюються на рамках азимуту та кута місця, що необхідно в екваторіальних районах.

Для апертурного навантаження з фіксованою лінією візування зазвичай використовуються системи інерціальної стабілізації зі швидкісними контурами керування. При цьому система стабілізації має забезпечувати відсутність кутового руху лінії візування, оскільки внаслідок віддаленості супутника переносний рух антени не впливає на положення лінії візування.

Точніше, система стабілізації має забезпечувати відсутність складових кутового руху в будь-якому напрямку, ортогональному до лінії візування. Для цього гіроскопічні пристрої встановлюються так, щоб їхні осі чутливості були ортогональними до лінії візування, що забезпечує безпосереднє вимірювання кутового руху лінії візування.

Такий підхід дозволяє реалізувати простий закон керування, в основу якого покладено збереження нульових сигналів на виході гіроскопічних пристроїв. Цей метод має дві переваги.

По-перше, гіроскопічний пристрій забезпечує безпосереднє вимірювання кутового руху як збурення в широкому діапазоні частот і забезпечує його швидку компенсацію без координатних перетворень.

По-друге, оскільки гіроскопічні пристрої працюють поблизу нуля, точність масштабного коефіцієнта гіроскопічного пристрою не є критичною.

## Висновки

Розглянуто стан сучасної проблематики інерціальної стабілізації.

Надано характеристику основним прикладним застосуванням систем інерціальної стабілізації інформаційно-вимірювальних систем.

Досліджено особливості цих застосувань, які є важливими для організації ефективних процедур проектування.

## Література

1. *Пельпор Д.С.* Гироскопические системы ориентации и навигации / Д.С. Пельпор. – М.: Машиностроение, 1982. – 165 с.
2. *Блохин Л.Н.* Оптимальные стабилизаторы: учеб. пособие / Л.Н. Блохин, А.А. Туник. – К.: КИИГА, 1983. – 44 с.
3. *Ривкин С.С.* Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании / С.С. Ривкин. – М.: Наука, 1978. – 320 с.
4. *Кочергин В.В.* Следящие системы с двигателем постоянного тока / В.В. Кочергин. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 168 с.
5. *Curey R., M. Ash, L. Thielman, C. Burker.* Proposed Inertial Systems Terminology Standard and Other Inertial Sensor Standards / R. Curey, M. Ash, L. Thielman, C. Burker. – Режим доступа: [group.ieee.org/groups/gap/p4127.pdf](http://group.ieee.org/groups/gap/p4127.pdf)
6. *Hilkert J.M.* Inertially stabilized platform technology / J.M. Hilkert // IEEE Control Systems. – 2008. – N1, Vol. 28. – P. 26–46.
7. *Masten M.K.* Inertially stabilized platforms for optical imaging systems / M.K. Masten // IEEE Control Systems. – 2008. – N1, Vol. 28. – P. 47–64.
8. *Debruin D.* Control systems for mobile satcom antennas / D. Debruin // IEEE Control Systems. – 2008. – N 1, Vol. 28. – P. 86–101.
9. *Wang H.G., Williams T.C.* Strategic inertial navigation systems / H.G. Wang, T.C. Williams // IEEE Control Systems. – 2008. – N 1, Vol. 28. – P. 65–85.
10. *Сущенко О.А.* параметрична оптимізація систем стабілізації наземних рухомих об'єктів / О.А. Сущенко // Вісник НАУ. – 2008. – №4. – С.23–29.
11. *Сущенко О.А.* Робастна параметрична оптимізація системи стабілізації та визначення курсу / О.А. Сущенко // Електроніка та системи управління. – 2009. – № 1. – С.11–118.
12. *Лурье А. И.* Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М.: Госиздат, 1961. – 822 с.

Стаття надійшла до редакції 06.06.11.