

УДК 629.3.025.2(045)

О. А. Сущенко, канд. техн. наук,
Д. О. Луцко, асп.

ПОВНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЛАТФОРМНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КУРСУ В РЕЖИМІ ПРИВЕДЕННЯ ДО ГОРИЗОНТУ

Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: fsu@nau.edu.ua

Виконано аналіз особливостей математичного опису платформної системи стабілізації та визначення курсу в режимі приведення до горизонту. Запропоновано повну модель системи з урахуванням кутового руху платформи, особливостей управління досліджуваного режиму та наявності електронних пристроїв у складі реальних систем.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку транспортних засобів потребує удосконалення підходів до створення систем керування рухомими об'єктами різного класу. Велике значення для навігації рухомих об'єктів має визначення курсу. Останнім часом у зв'язку з появою високоточних мініатюрних навігаційних датчиків, а також обчислювальних засобів, що характеризуються високою швидкістю, появилась тенденція до розроблення систем стабілізації та визначення курсу, які за своїми можливостями наближаються до інерціальних навігаційних систем, але відрізняються від них більшою простотою та меншою вартістю. Зазвичай до складу таких систем входять гіровертикаль і гіроскопічний вимірювач курсу, а також акселерометри, що забезпечують корекцію гіроскопічних приладів та отримання інформації про лінійну швидкість і пройдений шлях рухомого об'єкта.

Відомо, що в навігації морських об'єктів значну увагу приділяють платформним системам, у яких датчики кутового положення та лінійного прискорення встановлюють на стабілізованій платформі. Перевагами таких систем є висока точність і простота обробки навігаційної інформації внаслідок розміщення вимірювачів на гіростабілізованій платформі та відповідно більш сприятливих умов їх роботи.

Сучасні тенденції створення систем стабілізації та визначення курсу полягають в підвищенні вимог до їхніх функціональних можливостей з одночасними вимогами щодо скорочення термінів проектування. Задовольнити такі протилежні вимоги можна лише за допомогою ефективного проектування системи вже на ранніх етапах її створення. Одним з інструментів такого ефективного проектування є використання сучасних методологій оптимального синтезу, які, в свою чергу, потребують створення повного математичного опису досліджуваних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Особливості створення моделей систем та приладів, призначених для визначення курсу рухомих об'єктів, розглядаються в багатьох працях. Повну математичну модель малогабаритного коригованого гірокомпаса на основі гіроскопа з динамічним настроюванням, у якій враховано рух платформи, описано в праці [1]. Але на відміну від [1] у цій роботі розглядається система визначення курсу з іншою орієнтацією осей триосного карданового підвісу та іншим складом чутливих елементів. Моделі засобів визначення курсу платформного типу з розділенням на режими роботи точного приведення до горизонту та роботи в режимі вимірювача курсу подано в праці [2], але там розглядається платформа з двоосним кардановим підвісом. Отже, такі особливості сучасних систем визначення курсу, як наявність великої кількості різних режимів, що характеризуються різним складом датчиків і відповідно різними особливостями керування, ще потребують дослідження. Велике значення для моделювання платформних систем визначення курсу має врахування кутового руху платформи, на якій встановлюють датчики параметрів орієнтації та лінійних прискорень. Урахування такого руху потребує введення в модель системи визначення курсу рівнянь руху платформи, а також відповідних

кінематичних співвідношень. Підхід до розв'язання цієї проблеми розглянуто в праці [1], але цей підхід обтяжений громіздкими перетвореннями на відміну від підходу, запропонованого в праці [3].

Особливості досліджуваної системи стабілізації та визначення курсу. Вибір типу досліджуваної системи зумовлюється високими точнісними вимогами. До складу досліджуваної платформної системи входять два гіроскопи з динамічним настроюванням, що виконують функції гіровертикалі і вимірювача курсу, а також три акселерометри. Особливістю цієї системи є орієнтація осі зовнішнього карданового підвісу по поздовжній осі рухомого об'єкта. Стабілізація платформи здійснюється за сигналами гіровертикалі, що коригується за допомогою акселерометрів з використанням інтегральної корекції. При цьому осі чутливості акселерометрів та гіроскопічних вимірювачів, що розміщуються на платформі, можуть бути розгорнуті відносно осей карданового підвісу платформи у площині горизонту на довільний кут. Відмінністю розглянутої схеми є також використання акселерометра, ось чутливості якого розташована по вертикалі. Наявність цього акселерометра дозволяє компенсувати похибку від вертикальної складової прискорення об'єкта під час реалізації інтегральної корекції, що дозволяє підвищити точність приведення до горизонту.

Створення повного математичного опису системи стабілізації та визначення курсу потребує урахування кутового руху платформи, наявності різних режимів роботи системи та наявності електронних пристроїв у реальних системах.

Урахування кутового руху. Урахування руху платформи, на якій встановлюються датчики навігаційної інформації, потребує визначення рівнянь її кутового руху, а також відповідних кінематичних співвідношень, для чого необхідно ввести такі системи координат: $Ox_0y_0z_0$ – систему координат, зв'язану з об'єктом; $Ox_{\Pi}y_{\Pi}z_{\Pi}$ – систему координат, зв'язану із платформою. Перехід від системи координат, зв'язаної з об'єктом, до системи координат, зв'язаної з платформою, здійснюється за допомогою поворотів на кути α , β та γ , як показано на рис. 1. Положення об'єкта відносно вихідної системи координат, яке визначається поворотами на кути ψ_0 , ϑ_0 , ϕ_0 , показано на рис. 2.

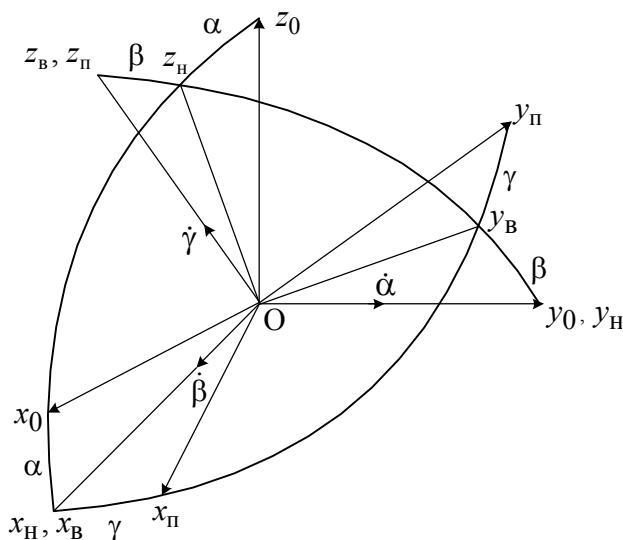


Рис. 1. Взаємне положення систем координат зв'язаних з об'єктом і платформою

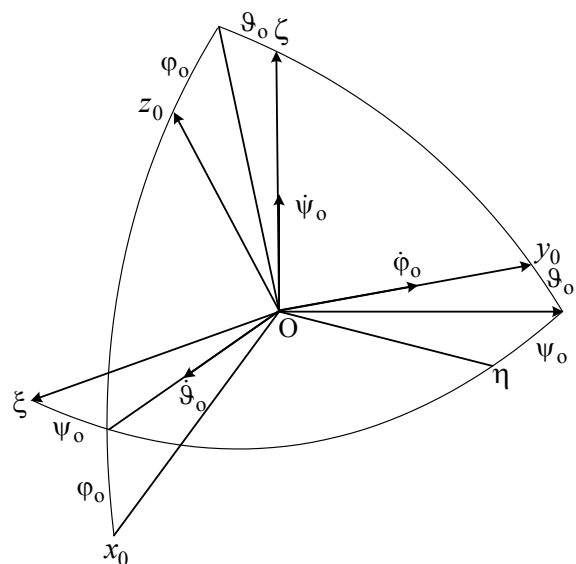


Рис. 2. Положення об'єкта відносно вихідної системи координат

Рівняння руху платформи можуть бути отримані на основі теореми змінювання кінетичного моменту твердого тіла [4]:

$$\begin{aligned}
\frac{dK_{zп}}{dt} + \omega_{хп} K_{yп} - \omega_{yп} K_{хп} &= M_{zп}; \\
\frac{dK_{хв}}{dt} + \omega_{yв} K_{zв} - \omega_{zв} K_{yв} &= M_{хв}; \\
\frac{dK_{yн}}{dt} + \omega_{zн} K_{хн} - \omega_{хн} K_{zн} &= M_{yн},
\end{aligned} \tag{1}$$

де $K_{хп}, K_{yп}, K_{zп}, \omega_{хп}, \omega_{yп}, \omega_{zп}, M_{хп}, M_{yп}, M_{zп}$ – кінетичні моменти, кутові швидкості платформи та зовнішні моменти, що діють за осями платформи відповідно.

Кінетичні моменти, що входять до виразів (1), визначаються такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
K_{хп} &= I_{хп} \omega_{хп}; \\
K_{yп} &= I_{yп} \omega_{yп}; \\
K_{zп} &= I_{zп} \omega_{zп}; \\
K_{хв} &= I_{хв} \omega_{хв} + K_{хп} \cos \gamma - K_{yп} \sin \gamma; \\
K_{yв} &= I_{yв} \omega_{yв} + K_{yп} \cos \gamma + K_{хп} \sin \gamma; \\
K_{zв} &= I_{zв} \omega_{zв} + K_{zп}; \\
K_{хн} &= I_{хн} \omega_{хн} + K_{хв}; \\
K_{yн} &= I_{yн} \omega_{yн} + K_{yв} \cos \beta - K_{zв} \sin \beta; \\
K_{zн} &= I_{zн} \omega_{zн} + K_{zв} \cos \beta + K_{yв} \sin \beta,
\end{aligned} \tag{2}$$

де $K_{хн}, K_{yн}, K_{zн}, I_{хн}, I_{yн}, I_{zн}, \omega_{хн}, \omega_{yн}, \omega_{zн}$ – кінетичні моменти, моменти інерції та кутові швидкості зовнішньої рами карданового підвісу платформи; $K_{хв}, K_{yв}, K_{zв}, I_{хв}, I_{yв}, I_{zв}, \omega_{хв}, \omega_{yв}, \omega_{zв}$ – кінетичні моменти, моменти інерції та кутові швидкості внутрішньої рами карданового підвісу платформи; $K_{хп}, K_{yп}, K_{zп}, I_{хп}, I_{yп}, I_{zп}, \omega_{хп}, \omega_{yп}, \omega_{zп}$ – кінетичні моменти, моменти інерції та кутові швидкості платформи із встановленими на ній гіроскопічними датчиками та акселерометрами.

Підставивши вирази для кінетичних моментів (2) у рівняння (1), можна отримати рівняння руху платформи відносно власної осі, внутрішньої та зовнішньої осей карданового підвісу відповідно:

$$\begin{aligned}
I_{zп} \dot{\omega}_{zп} + (I_{yп} - I_{хп}) \omega_{хп} \omega_{yп} &= M_{zп}; \\
I_{хв} \dot{\omega}_{хв} + (I_{zв} - I_{yв}) \omega_{yв} \omega_{zв} + I_{zп} \omega_{yв} \omega_{zп} + \\
+ (I_{хп} \dot{\omega}_{хп} - I_{yп} \omega_{zв} \omega_{yп}) \cos \gamma - (I_{yп} \dot{\omega}_{yп} + I_{хп} \omega_{zв} \omega_{хп}) \sin \gamma &= M_{хв}; \\
I_{yн} \dot{\omega}_{yн} + I_{yв} \dot{\omega}_{yв} \cos \beta + I_{yп} \dot{\omega}_{yп} \cos \gamma \cos \beta + I_{хп} \dot{\omega}_{хп} \sin \gamma \cos \beta - I_{zв} \dot{\omega}_{zв} \sin \beta - I_{zп} \dot{\omega}_{zп} \sin \beta + \\
+ (I_{хн} - I_{zн}) \omega_{хн} \omega_{zн} + I_{хв} \omega_{хв} \omega_{zн} + I_{хп} \omega_{хп} \omega_{zн} \cos \gamma - I_{yп} \omega_{zн} \omega_{yп} \sin \gamma - I_{zв} \omega_{хн} \omega_{zв} \cos \beta - \\
- I_{zп} \omega_{хн} \omega_{zп} \cos \beta - I_{yв} \omega_{хн} \omega_{yв} \sin \beta - I_{yп} \omega_{yп} \omega_{хн} \cos \gamma \sin \beta - I_{хп} \omega_{хн} \omega_{хп} \sin \gamma \sin \beta &= M_{yн}.
\end{aligned} \tag{3}$$

На підставі рис. 1 вирази для кутових швидкостей платформи можна записати у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
\omega_{хн} &= \omega_{х0} \cos \alpha - \omega_{z0} \sin \alpha; \\
\omega_{yн} &= \dot{\alpha} + \omega_{y0}; \\
\omega_{zн} &= \omega_{z0} \cos \alpha + \omega_{х0} \sin \alpha; \\
\omega_{хв} &= \dot{\beta} + \omega_{хн}; \\
\omega_{yв} &= \omega_{yн} \cos \beta + \omega_{zн} \sin \beta;
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\omega_{zB} = \omega_{zH} \cos \beta - \omega_{yH} \sin \beta ;$$

$$\omega_{xП} = \omega_{xB} \cos \gamma + \omega_{yB} \sin \gamma ;$$

$$\omega_{yП} = \omega_{yB} \cos \gamma - \omega_{xB} \sin \gamma ;$$

$$\omega_{zП} = \dot{\gamma} + \omega_{zB} ,$$

де $\omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}$ – проекції швидкості об'єкта на зв'язані осі; $\omega_{xП}, \omega_{yП}, \omega_{zП}$ – проекції швидкості платформи на її зв'язані осі; $\omega_{xB}, \omega_{yB}, \omega_{zB}$ – проекції платформи на осі системи координат зв'язної із внутрішньою віссю карданового підвісу; $\omega_{xH}, \omega_{yH}, \omega_{zH}$ – проекції платформи на осі системи координат, зв'язаної із зовнішньою віссю карданового підвісу.

Після підстановок у рівняння (3) виразів для кутових швидкостей (4) рівняння кутового руху платформи можуть бути отримані в остаточному вигляді. Через громіздкість перетворень наводимо лише рівняння руху платформи відносно її власної осі. При цьому для спрощення перетворень доцільно розглядати випадок руху об'єкта з постійним курсом за умови кутів α, β, γ . Це рівняння має вигляд:

$$\ddot{\gamma} + \frac{\dot{\alpha}}{I_{zП}} \omega_{x0} + \frac{I_{yП} - I_{xП}}{I_{zП}} [\cos 2\gamma (\dot{\alpha} \omega_{x0} + \dot{\beta} \omega_{z0} + \dot{\beta} \omega_{y0} + \omega_{z0} \omega_{x0} + \omega_{y0} \omega_{x0}) + \\ + 0,5 \sin 2\gamma (2\dot{\alpha} \omega_{y0} + \omega_{y0}^2 - 2\dot{\beta} \omega_{x0} - \omega_{x0}^2 + 2\omega_{x0} \omega_{z0} \alpha + 2\omega_{y0} \omega_{z0} \beta)] = M_{zП}.$$

Проекції кутової швидкості об'єкта можна визначити на підставі співвідношення

$$\omega_0 = \omega'_0 + \omega''_0 ,$$

де ω'_0 – швидкість вихідної системи координат $O\xi\eta\zeta$; ω''_0 – швидкість об'єкта відносно вихідної системи координат. Відповідно до рис.2 вирази для проекцій кутової швидкості ω'_0 набувають вигляду:

$$\omega_{x0} = -\dot{\psi}_0 \cos \vartheta_0 \sin \varphi_0 + \dot{\vartheta}_0 \cos \varphi_0 ;$$

$$\omega_{y0} = \dot{\varphi}_0 + \dot{\psi}_0 \sin \vartheta_0 ;$$

$$\omega_{z0} = \dot{\psi}_0 \cos \vartheta_0 \cos \varphi_0 + \dot{\vartheta}_0 \sin \varphi_0 .$$

Рух об'єкта відносно вихідної системи координат описуємо рівняннями:

$$\omega''_{x0} = -\frac{V_{xП}}{R_1} \sin k - \frac{V_{yП}}{R_2} \cos k - \Omega \cos \varphi \sin k ;$$

$$\omega''_{y0} = \frac{V_{xП}}{R_1} \cos k + \frac{V_{yП}}{R_2} \sin k + \Omega \cos \varphi \cos k ;$$

$$\omega''_{z0} = \frac{V_{xП}}{R_1} \operatorname{tg} \varphi - \dot{k} + \Omega \sin \varphi ,$$

де Ω – швидкість Землі; φ – широта об'єкта; $R_1 = \frac{a \cos \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$ – радіус кривизни

еліпсоїда Землі в площині, перпендикулярній до площини меридіана; $R_2 = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$ –

радіус кривизни еліпсоїда Землі в площині меридіана; a, b – велика та мала півосі еліпсоїда

Землі; $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ – ексцентриситет; k – курс.

Слід зазначити, що складання рівнянь руху платформи на підставі теореми змінювання кінетичного моменту твердого тіла призводить до надзвичайно громіздких співвідношень.

Для отримання спрощених рівнянь можна враховувати лише моменти інерції платформи та відповідно до праці [5] записати:

$$\begin{aligned} J_x \dot{\omega}_{xp} - J_{xy} \dot{\omega}_{yp} - J_{xz} \dot{\omega}_{zp} + (J_z - J_y) \omega_{yp} \omega_{zp} + J_{yz} (\omega_{zp}^2 - \omega_{yp}^2) + J_{xy} \omega_{xp} \omega_{zp} - J_{xz} \omega_{xp} \omega_{yp} &= M_{xp}; \\ J_y \dot{\omega}_{yp} - J_{zy} \dot{\omega}_{zp} - J_{xy} \dot{\omega}_{xp} + (J_x - J_z) \omega_{xp} \omega_{zp} + J_{xz} (\omega_{xp}^2 - \omega_{zp}^2) + J_{yz} \omega_{xp} \omega_{yp} - J_{xy} \omega_{yp} \omega_{zp} &= M_{yp}; \\ J_z \dot{\omega}_{zp} - J_{xz} \dot{\omega}_{xp} - J_{yz} \dot{\omega}_{yp} + (J_y - J_x) \omega_{xp} \omega_{yp} + J_{xy} (\omega_{yp}^2 - \omega_{xp}^2) + J_{xz} \omega_{yp} \omega_{zp} - J_{yz} \omega_{xp} \omega_{zp} &= M_{zp}, \end{aligned}$$

де J_x, J_y, J_z – осьові моменти інерції платформи відносно її власних осей; J_{xy}, J_{xz}, J_{yz} – відцентрові моменти інерції платформи.

Із врахуванням того, що для системи досліджуваного типу відцентровими моментами порівняно з осьовими можна знехтувати, рівняння кутового руху платформи набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{xp} &= [-(J_z - J_y) \omega_{yp} \omega_{zp} - f_x \omega_{xp} - M_{xp}] / J_x; \\ \dot{\omega}_{yp} &= [-(J_x - J_z) \omega_{xp} \omega_{zp} - f_y \omega_{yp} - M_{yp}] / J_y; \\ \dot{\omega}_{zp} &= [-(J_y - J_x) \omega_{xp} \omega_{yp} - f_z \omega_{zp} + M_{zn}] / J_z. \end{aligned} \quad (5)$$

Відповідно до рис. 1 вирази для визначення кутових швидкостей платформи є такими:

$$\begin{aligned} \omega_{xp} &= \dot{\beta} \cos \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma; \\ \omega_{yp} &= \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\beta} \sin \gamma; \\ \omega_{zp} &= \dot{\gamma} - \dot{\alpha} \sin \beta. \end{aligned} \quad (6)$$

На підставі виразів (6) диференціальні рівняння, які характеризують змінювання кутового положення платформи, набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= (\omega_{xp} \sin \gamma + \omega_{yp} \cos \gamma) / \cos \beta; \\ \dot{\beta} &= \omega_{xp} \cos \gamma - \omega_{yp} \sin \gamma; \\ \dot{\gamma} &= \omega_{zp} + \operatorname{tg} \beta (\omega_{xp} \sin \gamma + \omega_{yp} \cos \gamma). \end{aligned} \quad (7)$$

Модель системи визначення курсу в режимі попереднього приведення до горизонту складається з рівнянь руху платформи та рівнянь акселерометрів. Модель системи визначення курсу в режимі точного приведення до горизонту складається з рівнянь руху платформи, рівнянь гіровертикалі і рівнянь акселерометрів.

Якщо як датчики режиму попереднього приведення до горизонту обрати маятникові акселерометри, то їх моделі можна подати у вигляді

$$\dot{\delta}_{xp} = (-\delta_{xp} + k_{x\delta} \beta) / T_A; \quad \dot{\delta}_{yp} = (-\delta_{yp} + k_{y\delta} \alpha) / T_A, \quad (8)$$

де δ_{xp}, δ_{yp} – сигнали акселерометрів; T_A – стала часу акселерометрів; $k_{x\delta}, k_{y\delta}$ – коефіцієнти передачі акселерометрів.

Модель гіровертикалі на основі гіроскопа з динамічним настроюванням має вигляд [6]:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha}_r &= (-d \dot{\alpha}_r + H \dot{\beta}_r + \frac{H}{T_r} \beta_r - c \alpha_r + H_1 \omega_{xp} - M_{x\text{кор}}) / J_r; \\ \ddot{\beta}_r &= (-d \dot{\beta}_r - H \dot{\alpha}_r - \frac{H}{T_r} \alpha_r - c \beta_r - H_1 \omega_{yp} - M_{y\text{кор}}) / J_r; \end{aligned} \quad (9)$$

де J_r – сума екваторіальних моментів ротора і карданової рамки гіроскопа; d – коефіцієнт демпфірування; H – кінетичний момент гіроскопа; T_r – стала часу гіроскопа з динамічним настроюванням; c – залишкова жорсткість карданового підвісу; $H_1 = H(1 - 10^{-3})$.

Отже, залежно від складу навігаційних вимірювачів математична модель системи стабілізації та визначення курсу у режимі попереднього приведення до горизонту описується рівняннями (5), (7), (8), у режимі точного приведення до горизонту – рівняннями (5), (7), (9).

Особливості керування у режимі приведення до горизонту. Відмінності у математичному описі різних режимів залежать від особливостей формування моментів керування. Моменти зовнішніх сил, що діють на систему за осями платформи, розділяються на моменти керування, що прикладаються до осей підвісу двигунами стабілізації; моменти сил в'язкого тертя; моменти опору; моменти корекції гіроскопічних приладів, що прикладаються до датчиків моментів цих приладів, та моменти збурення.

Моменти зовнішніх сил у режимі попереднього приведення до горизонту можна визначити у такий спосіб:

$$\begin{aligned} M_{xp} &= -M_0 \operatorname{sign} \omega_{y0} - f_x \dot{\beta} + M_{xкер} + M_{xzб}; \\ M_{yp} &= -M_0 \operatorname{sign} \omega_{z0} - f_y \dot{\alpha} + M_{yкер} + M_{yzб}; \\ M_{zp} &= -f_z \dot{\gamma} + M_{zб}, \end{aligned} \quad (10)$$

де M_0 – момент опору двигунів стабілізації; ω_{0x}, ω_{0y} – кутові швидкості об'єкта; f_x, f_y, f_z – коефіцієнти в'язкого тертя; $M_{xкер}, M_{yкер}$ – моменти керування; $M_{xzб}, M_{yzб}, M_{zб}$ – моменти збурення,

У свою чергу, моменти керування двигунами стабілізації для режиму попереднього приведення до горизонту за умови незбіжності вимірювальних осей з осями вихідної навігаційної системи координат формуються у такий спосіб:

$$\begin{aligned} M_{xуп} &= k_{x1} (\delta'_{xp} \cos \gamma - \delta'_{yp} \sin \gamma) + k_{x2} \dot{\beta}; \\ M_{yуп} &= k_{y1} (\delta'_{xp} \sin \gamma + \delta'_{yp} \cos \gamma) + k_{y2} \dot{\alpha}; \\ \delta'_{xp} &= \delta_{xp} - |a_{xp}| \operatorname{sign} a_{xp} - |a_{xt}| \operatorname{sign} a_{xt}; \\ \delta'_{yp} &= \delta_{yp} - |a_{yp}| \operatorname{sign} a_{yp} - |a_{yt}| \operatorname{sign} a_{yt}; \\ M_{zкер} &= k_z \gamma, \end{aligned}$$

де δ_{xp}, δ_{yp} – сигнали акселерометрів; a_{xp}, a_{yp} – задані значення дрейфу акселерометрів; a_{xt}, a_{yt} – температурні значення дрейфу акселерометрів; $k_{x1}, k_{x2}, k_{y1}, k_{y2}, k_z$ – коефіцієнти передачі. Кути α, β, γ вимірюються датчиками кутів, які встановлюються в осях карданового підвісу. Керування відносно осі Oz здійснюється для запобігання відходам в азимуті.

Для досягнення високої точності для режиму точного приведення до горизонту доцільно використовувати розподіл функцій керування, коли платформа керується за сигналами гіроскопічного вимірювача (гіровертикалі), а гіровертикаль коригується за рахунок акселерометрів. Другою особливістю цього режиму є використання інтегрального коригування, яке забезпечує незбуреність системи зовнішніми прискореннями.

У цілому моменти зовнішніх сил у режимі точного приведення до горизонту визначаються відповідно до виразу (10). Моменти керування двигунами стабілізації на підставі сигналів гіровертикалі для режиму точного приведення до горизонту формуються у такий спосіб:

$$\begin{aligned} M_{xкер} &= k_{x3} \beta_{\Gamma} + k_{x4} \dot{\beta}_{\Gamma}; \\ M_{yкер} &= k_{y1} \alpha_{\Gamma} + k_{y2} \dot{\alpha}_{\Gamma}, \end{aligned}$$

де $k_{x3}, k_{x4}, k_{y3}, k_{y4}$ – коефіцієнти передачі з урахуванням коефіцієнта передачі датчика кута.

Досягнення високої точності стабілізації неможливо без коригування гіроскопічного вимірювача кутового положення об'єкта. Є декілька способів такої корекції [7].

Для формування моментів інтегрального коригування необхідно визначити вирази для показань акселерометрів, установлюваних на платформі, з урахуванням наявності акселерометра, встановленого по вертикальній осі [8]:

$$a_{xp} = w_{xp} - (w_{zp} + g)\alpha_\Gamma;$$

$$a_{yp} = w_{yp} - (w_{yp} + g)\beta_\Gamma;$$

$$a_{zp} = w_{xp}\alpha_\Gamma + w_{yp}\beta_\Gamma + (w_{yp} - g),$$

де $a_{xp} = \delta_x g$, $a_{yp} = \delta_y g$, $a_{zp} = \delta_z g$ – показання акселерометрів; w_{xp} , w_{yp} , w_{zp} – повні прискорення рухомого об'єкта; g – прискорення вільного падіння; α_Γ , β_Γ – похибки визначення вертикалі. Повні прискорення визначають виразами

$$w_{xp} = \dot{v}_{xp} + \Delta w_{xp}, w_{yp} = \dot{v}_{yp} + \Delta w_{yp}, w_{zp} = \dot{v}_{zp} + \Delta w_{zp},$$

тут v_{xp} , v_{yp} , v_{zp} – відносні швидкості рухомого об'єкта; Δw_{xp} , Δw_{yp} , Δw_{zp} – поправки на вплив переносних та коріолісових прискорень, вертикальної складової повного прискорення та несферичності Землі [8]. Після урахування цих поправок моменти інтегрального коригування можна подати у вигляді:

$$M_{x\text{кор}1} = \mu \int_0^{\Delta t} (\dot{v}_{xp} - g\alpha_\Gamma) dt = \mu \int_0^{\Delta t} (a_{xp} - \Delta w_{xp} - w_{zp}\alpha_\Gamma) dt;$$

$$M_{y\text{кор}1} = \mu \int_0^{\Delta t} (\dot{v}_{yp} - g\beta_\Gamma) dt = \mu \int_0^{\Delta t} (a_{yp} - \Delta w_{yp} - w_{zp}\beta_\Gamma) dt,$$

де $\mu = H_1 / R_2$ – коефіцієнт інтегрального коригування. Отже, для визначення моментів інтегрального коригування необхідно мати вирази для проекцій повного прискорення рухомого об'єкта на осі, пов'язаній з платформою та визначати відповідні поправки.

Коригувальні моменти, що враховують обертання Землі, мають вигляд [8]:

$$M_{x2} = H\omega_3 \cos \varphi \sin k;$$

$$M_{y2} = H\omega_3 \cos \varphi \cos k,$$

де φ – географічна широта об'єкта.

Для досягнення високої точності та якості перехідних процесів у режимі приведення до точного горизонту доцільно компенсувати систематичну складову від дрейфу гіроскопічного вимірювача

$$M_{x\text{кор}3} = k_{\Delta x} \dot{\alpha}_{\Gamma\Delta}; M_{y\text{кор}3} = k_{\Delta y} \dot{\beta}_{\Gamma\Delta},$$

де $k_{\Delta x}$, $k_{\Delta y}$ – коефіцієнти передачі; $\dot{\alpha}_{\Gamma\Delta}$, $\dot{\beta}_{\Gamma\Delta}$ – складові дрейфу, а також демпфірування платформи

$$M_{x\text{кор}4} = k_1 \int_0^t (v_{by} \cos \gamma - v_y \sin \gamma) / R_2 dt;$$

$$M_{y\text{кор}4} = k_2 \int_0^t (v_{bx} \sin \gamma - v_x \cos \gamma) / R_1 dt,$$

де k_1 , k_2 – коефіцієнти передачі; v_{bx} , v_{by} – складові лінійної швидкості об'єкта, визначені за зовнішніми засобами корекції; v_x , v_y – складові лінійної швидкості об'єкта.

Урахування моделей електронних пристроїв та нелінійностей, притаманних реальним системам. Відомо, що найбільш розвинений та ефективний апарат оптимального синтезу сучасних систем керування розроблено для лінійних стаціонарних систем. Але для досягнення найкращого результату необхідно перевірити отримані рекомендації з

використанням повної нелінійної моделі, яка б враховувала електронні пристрої, що входять до сучасних систем, та відповідно всі нелінійності, які обов'язково супроводжують математичний опис, що з максимальною можливістю відповідає реальній системі. Наявність такого математичного опису дозволяє вирішити низку інших важливих проблем, наприклад перевірити вибір дискретності обробки інформації та ін.

Блок-схему математичної моделі системи стабілізації та визначення курсу в режимі точного приведення до горизонту, яка характеризує взаємозв'язок усіх її складових, подано на рис. 3.

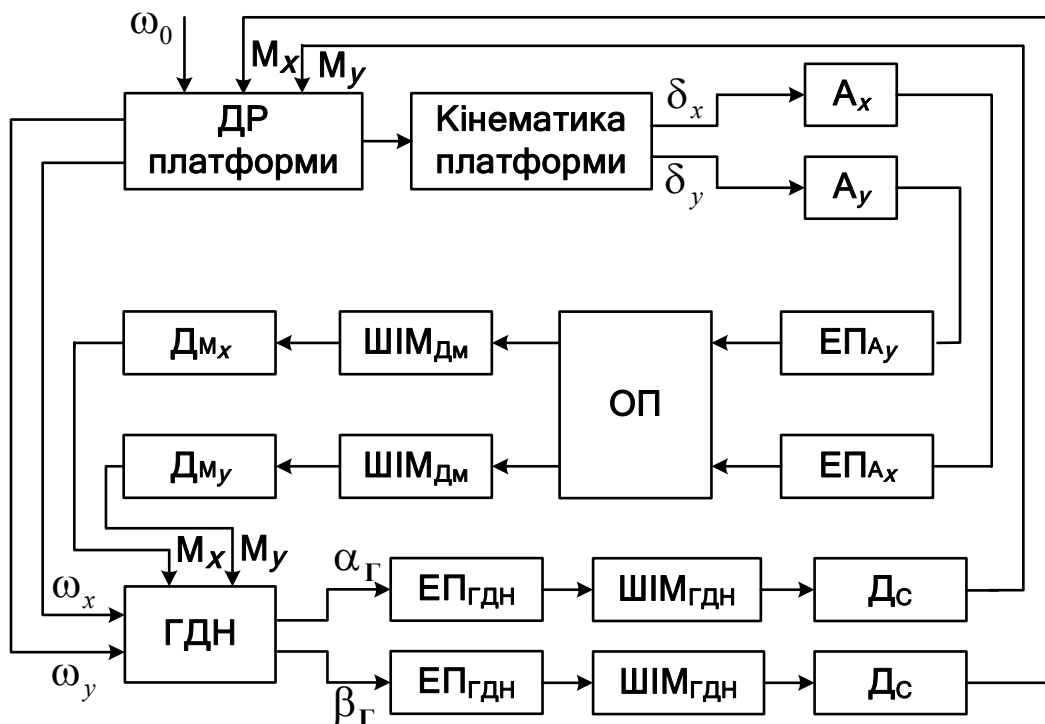


Рис. 3. Блок-схема математичної моделі системи стабілізації та визначення курсу в режимі точного приведення до горизонту: ДР – диференціальні рівняння; А – акселерометр; ЕП – електронні пристрої; ОП – обчислювальний пристрій; ШІМ – широтно-імпульсний модулятор; Дм – датчик моменту, Дс – двигун стабілізації; ГДН – гіроскоп із динамічним настроюванням, який виконує функції гіровертикалі

Що стосується апарату моделювання сучасних систем керування рухомими об'єктами, то видається доцільним використання системи MATLAB. По-перше, ця система дозволяє створювати моделі за допомогою мови програмування MATLAB. По-друге, широкі можливості синтезу та аналізу лінійних стаціонарних систем керування надає розширений пакет Control Tollbox. І, по-третє, пакет Simulink забезпечує створення повних моделей систем керування з урахуванням усіх нелінійностей, притаманних реальним системам. Поєднання усіх зазначених засобів дозволяє провести детальне дослідження системи стабілізації та визначення курсу та визначити основні напрями її створення.

Висновки. Подано повну математичну модель системи стабілізації та визначення курсу в режимі приведення до горизонту з урахуванням особливостей досліджуваної системи, кутового руху платформи, на якій встановлено датчики навігаційної інформації, та особливостей керування системою в режимах попереднього і точного приведення до горизонту. Наявність такої моделі забезпечує виконання процедур оптимального синтезу та відповідно створення високоточної системи стабілізації та визначення курсу.

Список літератури

1. Нестеренко О. И., Аврутов В. В. Математическая модель малогабаритного корректируемого гироскопа с динамически настраиваемым гироскопом / Вестн. КПИ. Приборостроение. – К, 1995. – Вип. 24. – С. 24 – 33.
2. Збруцький О. В., О.І. Нестеренко, А.В. Шевчук Математична модель однієї схеми курсокренопоказчика. / Механіка гіроскопічних систем. – К, 2001–2002. – Вип. 17–18. – С. 154 – 167.
3. Сущенко О. А. Математична модель системи визначення курсу в режимі попереднього горизонтування/ Вісн. НАУ. – 2005.– №1. – С. 37 – 40.
4. Павловский М. А. Теория гироскопов. – К.: Вища шк., 1986. – 304 с
5. Лурье А. И. Аналитическая механика. – М.: Машиностроение, 1956. – 656 с.
6. Брозгуль Л. И. Динамически настраиваемые гироскопы. – М.: Машиностроение, 1989.–232 с.
7. Сущенко О. А. Особливості управління системою визначення курсу в режимі точного приведення до горизонту / Вісн. НАУ. – 2004.– №4.– С. 29 – 32.
8. Ривкин С. С. Теория гироскопических устройств. – Л.: Судостроение, 1964. – Т. II. 548 с.

О. А. Сущенко

Полная математическая модель платформенной системы стабилизации и определения курса в режиме приведения к горизонту

Выполнен анализ особенностей математического описания платформенной системы стабилизации и определения курса в режиме приведения к горизонту. Предложена полная модель системы с учетом углового движения платформы, особенностей управления исследуемого режима и наличия электронных устройств в составе реальных систем.

O. A. Sushchenko

Full model of the gimballed stabilization and course system

Features of mathematical description of the gimballed stabilization and course system for setting to horizon mode are analysed. The full model taking in account platform angular motion and, features of the studied mode control and electronic devices presense is suggested.