

УДК 629.3.025.2(045)

О. А. Сущенко, канд. техн. наук,

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ РОБАСТНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ
ДЛЯ НАВІГАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ МОРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: fsu@nau.edu.ua

Подано математичний опис контуру стабілізації, призначеного для використання у навігаційних комплексах морського призначення. Розв'язано проблему синтезу робастної системи досліджуваного типу методом змішаної чутливості. Ефективність запропонованого підходу підтверджено результатами моделювання.

Ключові слова: система стабілізації, робастна система, метод змішаної чутливості.

Постановка проблеми. Для сучасних навігаційних комплексів, що використовуються на морських рухомих об'єктах, є актуальними питання забезпечення стабілізації вимірювальних пристроїв. Відомо, що всі вимірювальні пристрої можна поділити на дві великі групи: навігаційні датчики та пеленгаційні пристрої широкого класу [1]. Для розв'язання проблеми стабілізації цих пристроїв можливе використання платформних систем інерціальної стабілізації.

Найбільш відомим застосуванням платформних систем інерціальної стабілізації є керування рухом та стабілізація корисного навантаження різного типу, передусім пеленгаційних пристроїв широкого класу. Менш поширеним є застосування платформних систем в інерціальній навігації, що пов'язано зі стрімким розвитком комп'ютерних технологій та появою глобальних систем навігації і визначення положення. Це значно розширило можливості коригування навігаційних систем та зумовило появу безплатформних інерціальних систем, які за своїми точнісними вимогами відповідали платформним системам. Натепер платформна інерціальна стабілізація навігаційних датчиків є актуальною лише для автономних прецизійних навігаційних систем [2]. Слід зазначити, що такий підхід важливий для вітчизняних навігаційних комплексів морського призначення.

Головна відмінність між інерціальним вимірювальним блоком на основі інерціальної стабілізованої платформи та безплатформним інерціальним вимірювальним блоком полягає у наявності такого пристрою, як кардановий підвіс, який забезпечує обертання інерціальної стабілізованої платформи у тривимірному просторі. Можливість такого обертання поліпшує точнісні характеристики системи завдяки створенню більш комфортних умов для навігаційних вимірювань і можливості калібрування гіроскопічних приладів та акселерометрів і виставлення платформи після її встановлення на рухомому об'єкті. При цьому забезпечується автономність навігаційних обчислень, тобто досягнення високої точності без застосування коригувальних засобів.

Інерціальні навігаційні системи морських рухомих об'єктів є багаторежимними. У прецизійних системах зазвичай використовують опосередковане керування, коли гіроскопічні пристрої коригуються акселерометрами, а сама платформа стабілізується від коригованих сигналів і тому дуже точних гіроскопічних пристроїв. Алгоритми коригування є досить складними, тому для таких систем використовують окремі дослідження навігаційних та стабілізаційних контурів. Що стосується стабілізації корисного навантаження різного типу, то тут також є два основні режими: стеження за деяким заданим орієнтиром та стабілізація руху платформи, на якій встановлюється корисне навантаження. Підходи до створення процедур синтезу систем стабілізації обох типів вимірювальних пристроїв не мають суттєвих відмінностей.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблеми синтезу систем стабілізації навігаційних пристроїв висвітлюються у багатьох працях, наприклад, у праці [3]. Новітні досягнення платформної стабілізації навігаційних пристроїв та актуальні галузі їх

застосування наведено у праці [2]. Особливості аналізу і синтезу систем керування за допомогою сучасних засобів оптимального проектування, зокрема Control System Toolbox та Robust System Toolbox, висвітлено у праці [4]. Детальний огляд сучасних алгоритмів проектування робастних систем керування загалом та систем стабілізації зокрема з характеристикою відповідних програмних засобів і прикладами застосування подано у праці [5].

Математична модель системи стабілізації. Досліджувана платформна система стабілізації навігаційних пристроїв для морського рухомого об'єкта за принципом дії являє собою індикаторну або опосередковану систему інерціальної стабілізації. В індикаторних системах стабілізації гіроскопічні пристрої не виконують безпосередню стабілізацію деякого об'єкта, наприклад, платформи, а являють собою пристрої індикаторного типу, які керують слідкувальними приводами, що забезпечують стабілізацію об'єкта [6].

У таких системах збурення, що діють на стабілізовану платформу, компенсуються моментами, що створюються виконавчими механізмами, встановлюваними в осях підвісу платформи. У цьому разі використовуються датчики моменту або двигуни стабілізації. Керування контурами стабілізації здійснюється за сигналами гіроскопічних пристроїв, які, в свою чергу, коригуються за сигналами акселерометрів та додаткових приладів, наприклад, лага на підставі складних законів керування.

Отже, у системі досліджуваного типу контури керування можна поділити на навігаційні та стабілізаційні, що дозволить створювати окремі процедури їх синтезу. При цьому функції розподілено так: двигуни стабілізації забезпечують узгодження положення об'єкта стабілізації із положенням ротора гіроскопа, а датчики моменту реалізують коригування руху ротора від обчислювальних пристроїв на підставі інформації від акселерометрів, лага та даних про швидкість Землі та рух об'єкта.

Якщо вважати кути хитами малими, то можна знехтувати взаємним впливом поворотів рамок підвісу. У цьому випадку можна розглядати стабілізацію навігаційних пристроїв за одним каналом.

У навігаційній платформній системі досліджуваного типу як чутливий елемент використовують гіроскоп з динамічним настроюванням, що має деякий вплив на організацію контуру стабілізації. Гіроскопи цього типу мають суттєві переваги порівняно з електромеханічними гіроскопами. Оскільки застосування пружного підвісу не створює сил сухого тертя, то це дозволяє забезпечити високу точність за малого кінетичного моменту, тобто за малих габаритів гіроскопа. Суттєвими перевагами гіроскопа з динамічним настроюванням також є мала споживана потужність, зумовлена його малими габаритами, незначне нагрівання та виділення тепла, малий час готовності.

Принципова різниця використання як чутливого елемента гіроскопа з динамічним настроюванням порівняно із традиційними електромеханічними гіроскопічними пристроями полягає у тому, що зовнішні моменти збурення діють лише на ротор гіроскопа, у той час, як інші елементи конструкції гіроскопа розміщені на платформі, тобто пов'язані з ними моменти збурення діють на платформу. Оскільки механічний ротор гіроскопа з динамічним настроюванням відділений підвісом від інших елементів конструкції, його центр мас характеризується стабільним положенням. Відповідно моменти збурення, що діють на ротор, є малими та стабільними. У результаті дрейфу платформи, стабілізованої з використанням гіроскопів з динамічним настроюванням, на порядок менші порівняно зі стабілізацією із застосуванням традиційних електромеханічних гіроскопічних пристроїв [3].

У разі використання гіроскопа з динамічним настроюванням як чутливого елемента системи інерціальної стабілізації він працює в індикаторному режимі. У такому режимі не потрібна висока стабільність коефіцієнта передачі, але має велике значення чутливість, тобто необхідна велика крутизна статичної характеристики поблизу нуля, а також низький рівень порога чутливості та висока стабільність нуля, при цьому забезпечуються малі значення

кутів повороту ротора. Ця обставина зумовлює дуже малий робочий діапазон гіроскопа [7]. У зв'язку з цим для підвищення точності стабілізації необхідно використовувати пристрої, які значно підвищують коефіцієнт підсилення контуру. Крім того, з урахуванням принципу дії гіроскопа з динамічним настроюванням потрібно застосовувати селективний фільтр.

Для системи досліджуваного типу вираз для моменту збурення, приведенного до входу платформи, є таким:

$$M_{зб} = M_0 + M_T \text{sign}(\sin \omega t) + M_x \sin \omega t ,$$

де M_0 – сталі моменти збурення, зумовлені дефектами конструкції; M_T – момент сухого тертя; M_x – амплітуда моменту, зумовленого впливом хитавиці; ω – частота хитавиці.

Головним завданням проектування робастних систем стабілізації є синтез закону керування та створення відповідного регулятора, який забезпечує задані вимоги до точності системи в умовах невизначеності. Ця невизначеність може бути зумовлена багатьма факторами: зовнішніми збуреннями, похибками визначення передавальної функції системи, а також немодельованою динамікою. Існує безпосередній підхід до створення робастних систем, заснований на визначенні сингулярних величин передавальної функції системи та мінімізації відповідної норми [8]. Для забезпечення скінченності цієї норми необхідно, щоб відповідні передавальні функції були правильними. Цей підхід до проектування робастних систем керування взагалі та систем стабілізації зокрема можна реалізовувати автоматизованими засобами оптимального проектування, а саме: розширеним пакетом Robust Control Toolbox обчислювальної системи Matlab. Вищезгадану проблему засобами цього пакета можна розв'язувати за допомогою LQG-, H_2 -, H_∞ -синтезу.

Виконання LQG-синтезу ґрунтується на теоремі розділення. H_2 - та H_∞ -синтез є потужними інструментами проектування систем керування із зворотним зв'язком на підставі визначення обмежених частотних характеристик як функції сингулярних чисел. Відповідно до рис. 1 проблему проектування H_2 - та H_∞ -регуляторів можна сформулювати у такий спосіб. Для заданого розширеного об'єкта $\mathbf{P}(s)$ з математичним описом у просторі станів необхідно визначити стабілізуючий регулятор у контурі зворотного зв'язку

$$\mathbf{u}_2(s) = \mathbf{F}(s)\mathbf{y}_2(s) ,$$

який мінімізує норму замкненої передавальної матричної функції [9]

$$\mathbf{T}_{y_1 u_1}(s) = \mathbf{P}_{11}(s) + \mathbf{P}_{12}(s)(\mathbf{I} - \mathbf{F}(s)\mathbf{P}_{22}(s))^{-1}\mathbf{F}(s)\mathbf{P}_{21}(s) .$$

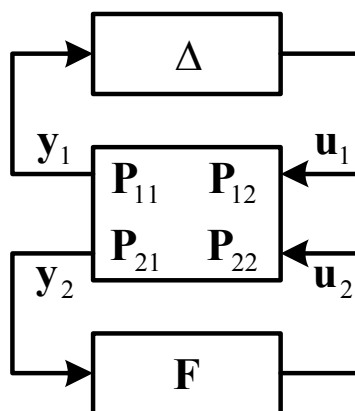


Рис. 1. До постановки задачі синтезу робастної системи

Обчислювальну схему контуру стабілізації, підсилювача та схему задання моменту збурення показано на рис. 2.

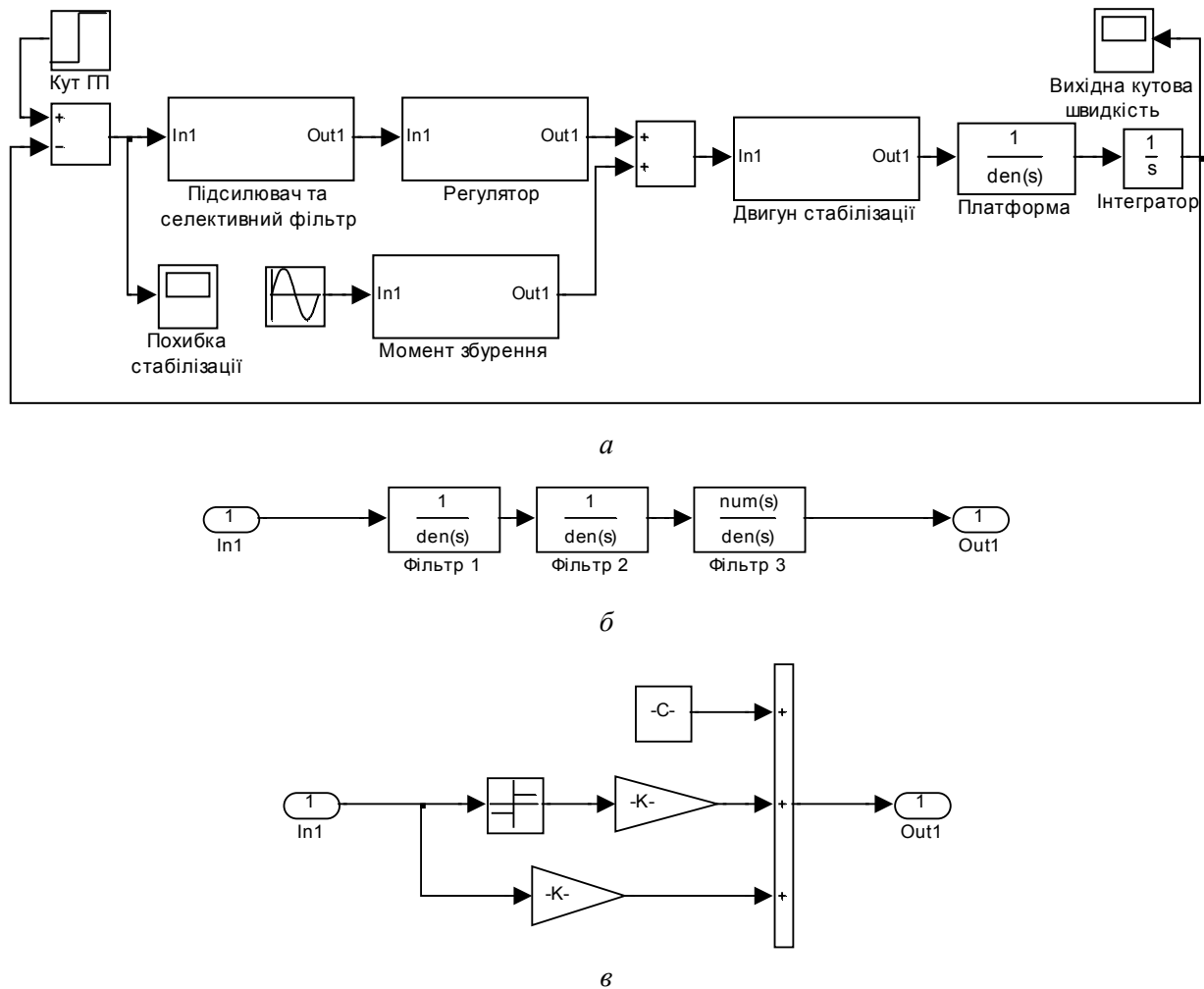


Рис. 2. Обчислювальні схеми: *a* – контуру стабілізації; *б* – підсилювача та селективного фільтра; *в* – задання основного зовнішнього збурення: ГП – гіроскопічний пристрій

Розширений пакет Robust Control Toolbox дозволяє здійснювати:

- 1) H_2 – оптимальний синтез, метою якого є мінімізація норми $\|T_{y_1 u_1}\|_2$;
- 2) H_∞ – оптимальний синтез, метою якого є мінімізація норми $\|T_{y_1 u_1}\|_\infty$;
- 3) H_∞ – стандартний синтез, метою якого є забезпечення співвідношення $\|T_{y_1 u_1}\|_2 < 1$.

Існує підхід для проектування робастних систем, коли достатня умова робастної стійкості формулюється у вигляді норми, обмеженої ваговими часовими функціями. Саме такий підхід застосований в автоматизованих засобах оптимального проектування робастних систем Robust Control Toolbox [8].

У більшості випадків проектування робастних систем можна оцінити лише верхню межу відхилення передавальних функцій або частотних характеристик від номінальних. Можливі різні підходи до визначення обмежувальних вагових частотних характеристик. Одним зі способів отримання таких обмежень є використання результатів експериментальних досліджень, на підставі яких будується реальна частотна характеристика. Але інформації про частотні характеристики реальної системи здебільшого бракує. Найбільш часто для визначення обмежувальних характеристик використовують підхід, який ґрунтується на частотних вимогах до системи.

Для кількісного оцінювання запасів стійкості та частотних характеристик системи можна використовувати сингулярні числа замкнутих передавальних матричних функцій від сигналу керування $\mathbf{r}$ до сигналів похибки та вхідного і вихідного сигналів об'єкта $\mathbf{e}$, $\mathbf{u}$, $\mathbf{y}$ [9]:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(j\omega) &\stackrel{def}{=} (\mathbf{I} + \mathbf{F}(j\omega)\mathbf{P}(j\omega))^{-1}; \\ \mathbf{R}(j\omega) &\stackrel{def}{=} \mathbf{F}(j\omega)(\mathbf{I} + \mathbf{F}(j\omega)\mathbf{P}(j\omega))^{-1}; \\ \mathbf{T}(j\omega) &\stackrel{def}{=} \mathbf{F}(j\omega)\mathbf{P}(j\omega)(\mathbf{I} + \mathbf{F}(j\omega)\mathbf{P}(j\omega))^{-1}. \end{aligned}$$

Матриці $\mathbf{S}(j\omega)$ і $\mathbf{T}(j\omega)$ називаються функціями чутливості та додаткової чутливості. Сингулярні числа функції чутливості визначають ступінь придушення збурень, оскільки вона фактично являє собою передавальну функцію замкненої системи від збурення $\mathbf{w}$ до вихідного сигналу $\mathbf{y}$. Характеристика придушення збурень є такою:

$$\sigma(\mathbf{S}(j\omega)) \leq |\mathbf{W}_1^{-1}(j\omega)|,$$

де $|\mathbf{W}_1^{-1}(j\omega)|$ – бажаний ступінь придушення збурень.

Сингулярні числа функцій $\mathbf{R}(j\omega)$ та $\mathbf{T}(j\omega)$ можна використовувати для оцінювання запасів стійкості системи під дією адитивних та мультиплікативних збурень.

Зазвичай вплив усіх невизначеностей об'єкта оцінюють єдиним мультиплікативним збуренням Δ_M . Тоді вимоги до проектування системи керування визначають таким чином [9]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sigma_i(\mathbf{S}(j\omega))} &\geq |\mathbf{W}_1(j\omega)|, \\ \sigma_i(\mathbf{T}(j\omega)) &\leq |\mathbf{W}_3^{-1}(j\omega)|. \end{aligned}$$

При цьому має виконуватись умова

$$\sigma(\mathbf{W}_1^{-1}(j\omega)) + \sigma(\mathbf{W}_3^{-1}(j\omega)) > 1 \text{ для будь-якого } \forall \omega.$$

Вибір вагових матриць є неоднозначною задачею, яка потребує для свого розв'язання використання евристичних методів, наприклад, методу спроб та помилок, які враховують досвід проектувальника системи.

Після вибору вагових матричних передавальних функцій досліджувана система розширюється за рахунок включення рівнянь цих функцій. Розширена передавальна функція системи описується структурною схемою, показано на рис. 3.

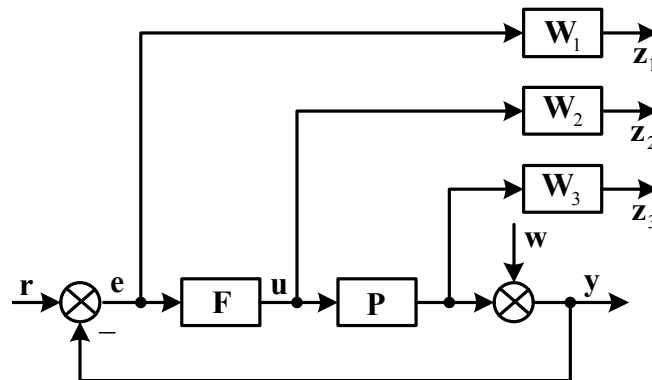


Рис. 3. Розширена передавальна функція системи: $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \mathbf{z}_3$ – додаткові виходи

У разі використання методу змішаної чутливості вимоги до ослаблення збурень та забезпеченню запасу стійкості зводяться до єдиної вимоги [9]

$$\|\mathbf{T}_{y_1 u_1}\|_{\infty} \leq 1, \quad (1)$$

де

$$\mathbf{T}_{y_1 u_1} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \mathbf{S} \\ \mathbf{W}_2 \mathbf{R} \\ \mathbf{W}_3 \mathbf{T} \end{bmatrix},$$

являє собою функцію вартості методу змішаної чутливості.

Є три підходи до розв'язання проблеми мінімізації норми $\|\mathbf{T}_{y_1 u_1}\|$. За першого підходу мінімізується норма $\|\mathbf{T}_{y_1 u_1}\|_2$. У цьому випадку система описується рівняннями

$$\frac{d\mathbf{x}_e}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x}_e + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}_2 + \mathbf{L}(\mathbf{y}_2 - \mathbf{D}_{22} \mathbf{u}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{x}_e), \quad \mathbf{u}_2 = \mathbf{K}\mathbf{x}_e,$$

де $\mathbf{K}$ – матриця зворотних зв'язків; $\mathbf{L}$ – матриця коефіцієнтів, які залежать від розв'язання рівняння Ріккати. Відповідно до другого підходу визначається стабілізуювальний регулятор, який задовольняє умову (1). При цьому застосовується метод двох рівнянь Ріккати та доводиться, що за певних умов

$$\|\mathbf{T}_{y_1 u_1}\|_\infty < \mu$$

Стан та керування оцінюються відповідно до рівнянь

$$\frac{d\mathbf{x}_e}{dt} = (\mathbf{A} + \mu^{-2} \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T \mathbf{P})\mathbf{x}_e + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}_2 + \mathbf{L}(\mathbf{y}_2 - (\mathbf{C}_2 + \mathbf{D}_0)\mathbf{x}_e), \quad \mathbf{u}_2 = \mathbf{K}\mathbf{x}_e,$$

де $\mathbf{K}$, $\mathbf{L}$, $\mathbf{D}_0$ залежать від розв'язання рівнянь Ріккати. За третім підходом для розрахунку оптимального регулятора виконуються γ -ітерації:

$$\left\| \gamma_i \frac{\mathbf{T}_{y_1 u_1}}{\mathbf{T}_{y_1 u_1}} \right\|_\infty < 1,$$

де i – номер ітерації.

Результати синтезу робастної системи методом змішаної чутливості показано на рис. 4, 5.

При цьому використовувались такі вагові передавальні функції: $W_1 = k_1 \sum_{i=1}^2 \frac{T_{in}s + 1}{T_{id} + 1}$, $W_2 k_2$,

$W_3 = k_3 \frac{1}{T_s + 1} \frac{1}{s}$ та $W_1 = k_1 \sum_{i=1}^3 \frac{T_{in}s + 1}{T_{id} + 1}$, $W_2 k_2$, $W_3 = k_3 \frac{1}{s^2}$ для двох варіантів синтезу

відповідно.

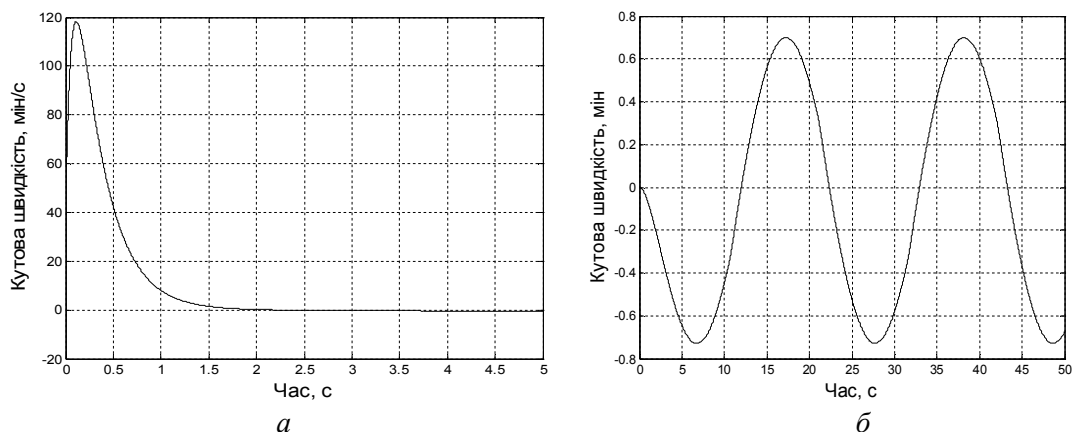


Рис. 4. Результати синтезу робастної системи стабілізації для першого варіанта вагових передавальних функцій: a , b – перехідні процеси за умови дії збурення

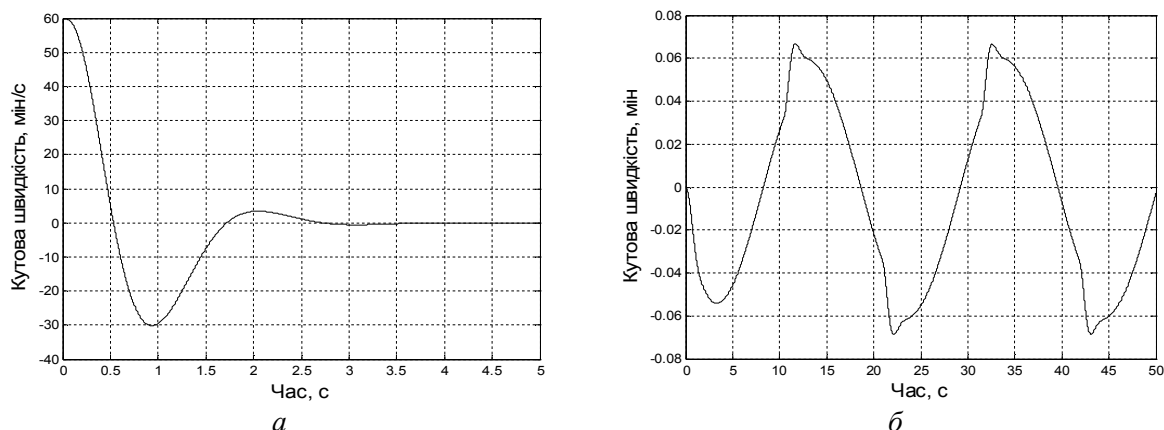


Рис. 5. Результати синтезу робастної системи стабілізації для другого варіанта вагових передавальних функцій: *а*, *б* – динамічна похибка

Висновки. Побудовано математичну модель системи стабілізації для навігаційних комплексів морського призначення. Визначено вагові передавальні функції та виконано процедуру синтезу робастної системи стабілізації методом змішаної чутливості.

Список літератури

1. Ривкин С. С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. – М.: Наука, 1978. – 320 с.
2. Wang H. G., T. C. Williams. Strategic inertial navigation systems/ IEEE Control Systems Magazine / – #1. – Vol. 28. – 2008. – P. 65–85.
3. Рыжков Л. М. О синтезе астатических систем стабилизации / Л. М. Рыжков, С. В. Иванов // Механіка гіроскопічних систем. – 1997. – С. 140 – 147.
4. Перельмутер В. М. Пакеты расширения Matlab Control System и Robust Control Toolbox. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 224 с.
5. Robust Control Toolbox User's guide // The Math Works. – 2001. – 646 p.
6. Индикаторные гироскопические платформы / под ред. А. Д. Александрова. – М.: Наука, 1979. – 239 с.
7. Одинцов А. А. Динамически настраиваемые гироскопы. – К.: УМК ВО, 1992. – 68 с.
8. Zhou K. Robust and Optimal Control / Zhou K., Doyle J., Glover K. – New Jersey.: Prentice-Hall, 1995 – 586 с.
9. Glover K., Doyle J. State Space Formulae for all Stabilizing Controllers that satisfy an H_∞ - norm Bound and Relations to Risk Sensitivity, Systems and Control Letters. – 1988. – № 11. – P. 168 – 172.

О. А. Сущенко

Особенности проектирования робастной системы стабилизации для навигационных комплексов морского назначения

Представлено математическое описание контура стабилизации, предназначенного для использования в навигационных комплексах морского назначения. Решена проблема синтеза робастной системы методом смешанной чувствительности. Эффективность предложенного подхода подтверждена результатами моделирования.

O. A. Sushchenko

Design Features of Robust Stabilizing System for Marine Navigation Complexes

The mathematical description of the stabilizing loop assigned for usage in the marine navigation complexes is represented. The robust system synthesis problem by the mixed sensitivity method is solved. Efficiency of the suggested approach is proved by simulation results.