

Осадчий С.І.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Березюк І.А.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Мельніченко М.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

МАКСИМІЗАЦІЯ ТОЧНОСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ПОСАДОЧНОЇ ПЛАТФОРМИ

Посадка літальних апаратів за складних метеорологічних умов – одна зі складних операцій, а посадка на плавучі динамічні об'єкти у такому разі є справжнім викликом для літальних апаратів і їхніх операторів і пілотів. На сучасному етапі широко поширене використання механізмів із паралельною кінематикою, а саме платформи Стюарта (гексапода) як злітно-посадочного столу. У статті викладені дослідження, спрямовані на створення системи керування кутовим положенням платформи для злету і посадки безпілотного літального апарата та гелікоптерів із поверхонь суден у відкритому морі за хитавиці та складних погодних умов. Аналіз результатів сучасних досліджень у галузі створення систем такого класу дозволив зробити висновок про те, що подолання недоліків наявних систем і досягнення найвищої точності стабілізації кутового положення платформи може бути здійснено з використанням базатовимірних оптимальних систем стохастичної стабілізації. Одна з ефективних методологій створення систем такого класу заснована на використанні моделей динаміки об'єкта керування (гексапода) та діючих збурень і квадратичного критерію якості.

У статті наведено методологію та технологію максимізації точності стабілізації кутового положення посадочної платформи, встановленої на рухомому об'єкті (судні), за рахунок розробки та впровадження нових принципів керування механізмами з паралельною кінематикою типу гексапод. Запропонований у роботі підхід до синтезу системи стабілізації кутового положення платформи відрізняється тим, що вихідними даними є моделі динаміки гексапода та спектральна щільність діючого збурення, отримані на основі експериментальних даних і використання спектрального алгоритму структурної ідентифікації. Базовими етапами методології, що пропонується, є структурна ідентифікація матриці передаточних функцій гексапода як об'єкта керування і спектральної щільності діючого збурення; синтез оптимальної структури системи стохастичної стабілізації кутового положення платформи гексапода; аналіз якості системи запропонованої системи. Теоретичну базу для успішної реалізації зазначених етапів становлять науково обґрунтовані методи й алгоритми оцінювання та ідентифікації складних динамічних об'єктів і збурень за реальних експлуатаційних умов, а також сучасні методи оптимального синтезу. Впровадження цієї системи дозволить отримати максимальну можливу якість і точність керування.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, платформа Стюарта (гексапод), оптимальна система стохастичної стабілізації, квадратичний критерій якості, модель динаміки гексапода, спектральна щільність збурення, структурна ідентифікація, спектральний алгоритм синтезу.*

Постановка проблеми. Нині використанню безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА) на судах приділяється значна увага. Військові морські сили зацікавлені у використанні БПЛА з вертикальним злетом і посадкою, здатних в автоматичному режимі виконувати зліт і посадку на обмеженій за площею території [1]. Широке застосування БПЛА на флоті стримується відсутністю надійних засобів для здійснення безаварійної та безпечної посадки на судна у відкритому морі. Найважливішим фак-

тором, який зумовлює складність посадки на судно, є хитавиця. Для компенсації впливу хитавиці використовують стабілізаційні платформи [1–3].

Особливої уваги в цьому напрямі заслуговує запропонована ідея використання платформи Стюарта (гексапода) як злітно-посадочного столу [1–4; 10; 11]. Загальний вигляд гексапода представлено на рис. 1.

Гексапод складається з рухомої платформи 1 та основи 2, які механічно зв'язані за допомогою



Рис. 1. Гексапод на основі платформи Стюарта:
 1 – рухома платформа; 2 – основа;
 3, 4 – напівштанги

шести ідентичних ланок – ніг (або стійок). Кожна нога виконує функцію лінійного приводу і містить дві напівштанги (3, 4), які з’єднуються за допомогою шарнірів із основою та платформою. Виконавчим приводом кожної ноги формується лінійне переміщення напівштанги 3 відносно напівштанги 4. Цей рух реалізується двигуном (кроковим або вентильним) і механічною передачею типу гвинт – гайка. Рухома платформа переміщується по шести координатам: трьома лінійним і трьома кутовим.

Задача стабілізації кутового положення платформи гексапода полягає в забезпеченні малих кутів її відхилення у площині горизонту за умов дії недетермінованих зовнішніх збурень і факторів, а саме за умов морської хитавиці, за значних коливань сили та напрямку вітру.

Недоліки наявних систем керування положенням платформи гексапода знижують ефективність використання суднової авіації у складній гідрометеорологічній обстановці та можуть призвести до аварій [1–4; 10; 11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати аналізу літературних джерел [1–4; 5; 7; 10] дозволили встановити, що головною стороною якості роботи систем стабілізації кутового положення платформи є точність підтримки на заданому рівні положення платформи при обмеженій потужності сигналів управління в умовах дії випадкових збурень (зокрема, хитавиці та поривів вітру у відкритому морі), а мірою якості може бути [5–7] сума певним чином зважених дисперсій вихідних координат об’єкта управління (гексапод + регулятор) і сигналів управління. У роботах [5–7] доведено, що максимальною якістю володіють лише такі системи управління (стабілізації) структура та параметри яких отримані шляхом забезпечення екстремуму обраного критерію. Числове значення такого критерію при визначених структурі та параметрах оптималь-

ної системи стабілізації визначає максимальний об’єктивний рівень якості, який може бути досягнуто в реальних умовах функціонування досліджуваного об’єкта та відомих динамічних характеристиках усіх його частин [5–7].

Постановка завдання. Таким чином, задача максимізації точності стабілізації кутового положення посадочної платформи формулюється наступним чином: за отриманими внаслідок структурної ідентифікації моделями динаміки системи «гексапод + регулятор» як об’єкта керування та діючих збурень визначити структуру та параметри оптимального регулятора, використання якого гарантує досягнення найвищих рубежів якості процесу стабілізації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розв’язання поставленої задачі реалізується через формулювання та вирішення таких часткових задач, як:

- аналіз особливостей систем стабілізації посадочних платформ, режимів роботи й умов функціонування;

- на основі результатів ідентифікації сигналів у каналах керування положенням платформи, зібраної при експериментальних дослідженнях, скласти моделі динаміки векторів сигналів «вхід – вихід» системи «гексапод + регулятор» як об’єкта стабілізації;

- за отриманими після моделями динаміки векторів сигналів «вхід – вихід» обмеженої довжини на основі спектрального алгоритму структурної ідентифікації визначити матриці передаточних функцій системи «гексапод – регулятор» і спектральної щільності збурення;

- синтез оптимальної структури системи стохастичної стабілізації кутового положення платформи гексапода;

- аналіз якості системи стабілізації кутового положення платформи гексапода;

- створення спеціальних програмних комплексів реалізації процедур технології ідентифікації, методології синтезу й аналізу системи стохастичної стабілізації кутового положення платформи;

- розробка методики реалізації оптимальної системи стохастичної стабілізації кутового положення платформи;

- розробка методики проведення виробничих випробувань системи для оцінки її ефективності.

Етапи побудови системи стабілізації кутового положення платформи подано на рис. 2.

На першому етапі формулюються основні теоретичні засади нової технології побудови системи стабілізації кутового положення платформи.

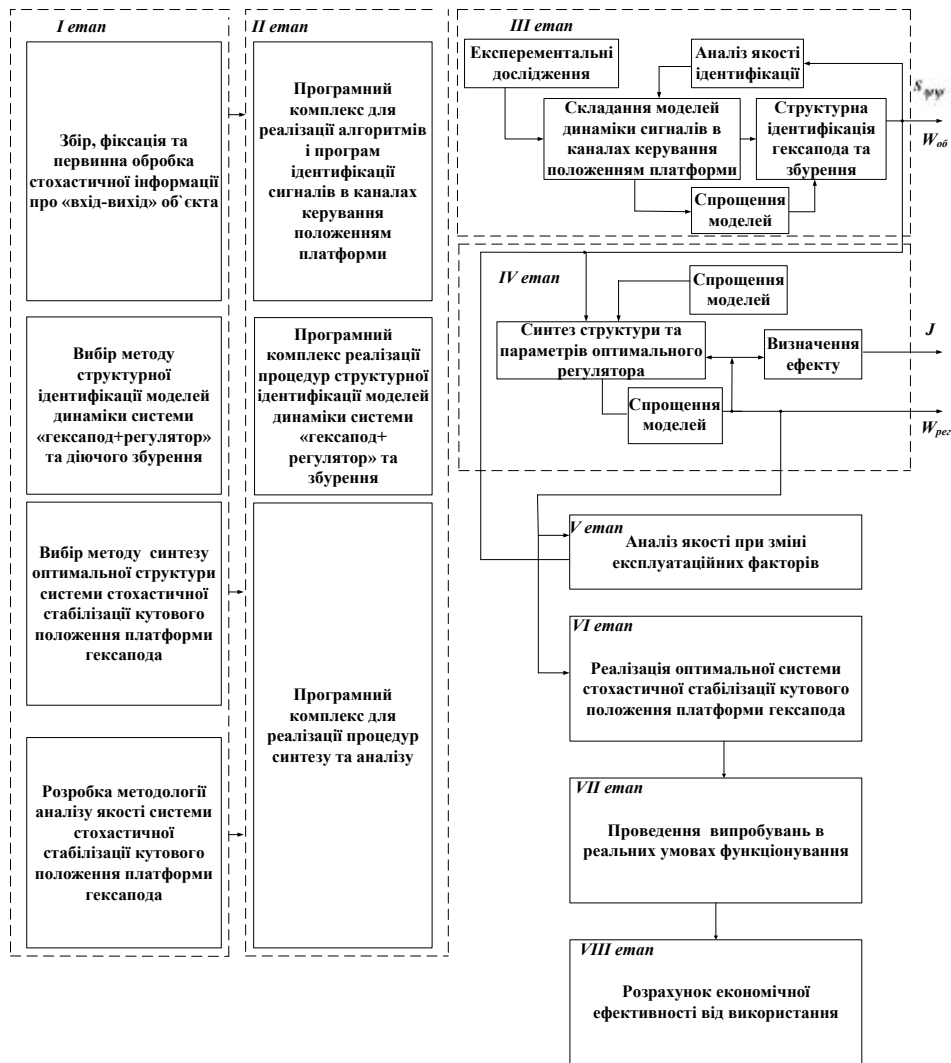


Рис. 2. Етапи побудови системи стабілізації кутového положення платформи

Спочатку необхідно виконати збір, фіксацію стохастичної інформації про «вхід – вихід» об'єкта керування за реальних (або максимально наближених до них) умов його функціонування. Внаслідок обробки за спеціальними алгоритмами з використанням відповідних програмних комплексів будуть отримані оцінки матриць спектральних і взаємних спектральних щільностей векторів сигналів «вхід – вихід» системи «гексапод + регулятор». Після цього – пошук методів та алгоритмів для розв'язання задач ідентифікації системи «гексапод + регулятор» і збурень, синтезу оптимального регулятора, аналізу якості системи, що проектується.

Застосування алгоритмів ідентифікації, синтезу й аналізу потребує виконання значного обсягу математичних операцій, тому на наступному етапі для здійснення таких розрахунків необхідно створити спеціальні програмні комплекси з використанням сучасних систем для математичних обчислень.

Після цього необхідно обрати ефективний метод структурної ідентифікації системи «гексапод + регулятор» і діючого збурення.

Новітні алгоритми структурної ідентифікації динаміки об'єкта і діючого на нього узагальненого збурення мають низку переваг, серед яких слід відзначити: точність; забезпечення побудови моделей динаміки в режимі нормальної експлуатації; зручність, простоту та інформативність; наукову обґрунтованість; можливість використання достатньо простої апаратури, нечутливої до зовнішніх впливів.

Для отримання моделей динаміки системи «гексапод + регулятор» і діючого збурення доцільним є використання методу, який викладено в роботі [5]. Цей метод дає можливість отримати найкращі за мінімумом дисперсії похибки оцінки динамічних характеристик досліджуваного об'єкта за даними вимірювання вхідного та вихідного сигналів за реальних експлуатаційних умов, а також

визначити спектральну щільність неконтрольованого збурення. Для цього використано спеціально створену експериментальну установку, опис якої наведено у [8].

Згідно з обраним методом [5] при вирішенні задачі ідентифікації системи «гексапод + регулятор» прийняті такі припущення: в усталеному режимі система «гексапод – регулятор» має два входи й один вихід (рис. 3). На першому вході діє вектор програмних сигналів r , компонентами якого є задані значення проєкцій прискорень центру мас платформи на вісі x, y , вигляду

$$r = \begin{bmatrix} r_x & r_y \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

де r_x – проєкція прискорення центру мас платформи на вісь x ; r_y – проєкція прискорення центру мас платформи на вісь y ; T – символ транспонування.

В усталеному режимі ці сигнали становлять стаціонарні випадкові процеси та можуть бути зафіксовані в ході експерименту за умов виробництва.

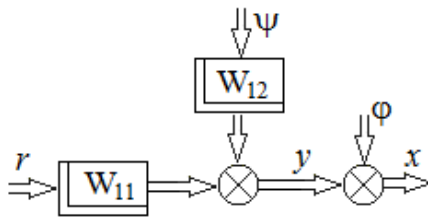


Рис. 3. Структурна схема системи «гексапод + регулятор»

На другому вході діє вектор збурень ψ , які виникають внаслідок дії сил опору вздовж осей тяг гексапода, що також має дві складові частини:

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_x & \psi_y \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

де ψ_x, ψ_y – проєкції збурень на відповідні осі зв'язаної системи координат. Вихід системи представляє вектор x , складений із сигналів на виході акселерометра, які пропорційні проєкціям x_x та x_y фактичного прискорення платформи на вісь чутливості 3d датчика:

$$x = \begin{bmatrix} x_x & x_y \end{bmatrix}^T. \quad (3)$$

Похибки акселерометра характеризує вектор шумів вимірювання ϕ , котрий також має дві компоненти:

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_x & \phi_y \end{bmatrix}^T. \quad (4)$$

Зв'язок між векторами (1), (2), (4) та вектором (3) з урахуванням схеми на рис. 2 за аналогією з монографією [5] характеризує така система звичайних диференціальних рівнянь:

$$Px = Mr + \psi - P\phi, \quad (5)$$

де P і M – поліноміальні матриці розмірності 2×2 від оператора диференціювання $p = d/dt$. Після виконання перетворень Лапласа лівої та правої частини рівняння (5) за нульових початкових умов і після множення лівої та правої частини цього рівняння на зворотну матрицю P^{-1} отримано таке співвідношення:

$$x - \phi = W_{11}r + W_{12}\psi, \quad (6)$$

у якому W_{11} – матриця передаточних функцій системи «гексапод + регулятор», яка пов'язує вектори r і x ; W_{12} – матриця передаточних функцій системи «гексапод + регулятор», що характеризує вплив вектора збурень ψ на вектор сигналів x .

Внаслідок спеціальних експериментальних досліджень повинні бути сформовані та зафіксовані реалізації зміни компонентів векторів r та x як двовимірних центрованих стаціонарних випадкових процесів. Будемо вважати, що характеристики вектора шумів на виході 3d MEMS акселерометра знайдені шляхом динамічної атестації, як показано в роботі [8].

Таким чином, задача ідентифікації полягає в тому, щоб за отриманими внаслідок експериментальних досліджень записами зміни компонентів векторів «вхід – вихід» r_x, r_y, x_x, x_y знайти матриці передаточних функцій W_{11} та W_{12} , а також матрицю спектральних щільностей вектору вимірюваних збурень з умови мінімуму наступного показника якості ідентифікації J_{iden}

$$J_{iden} = \langle \varepsilon^T(t) R \varepsilon(t) \rangle, \quad (7)$$

де $\varepsilon(t)$ – вектор похибок ідентифікації, який дорівнює

$$\varepsilon(t) = x(t) - x_m(t); \quad (8)$$

де $x_m(t)$ – вектор сигналів на виході моделі системи; R – додатно визначена вагова матриця; $\langle * \rangle$ – символ операції пошуку математичного очікування.

Отримані моделі динаміки системи «гексапод + регулятор» і спектральна щільність збурення становлять основу для синтезу оптимального регулятора, використання якого дозволить суттєво підвищити точність стабілізації кутового положення платформи.

Застосування алгоритмів ідентифікації, синтезу й аналізу потребує виконання значного обсягу математичних операцій. Тому на другому етапі для здійснення таких розрахунків необхідно створити спеціальні програмні комплекси з використанням сучасних систем для математичних обчислень.

Метою третього етапу є отримання передаточної функції системи «гексапод + регулятор» ($W_{об}$) та збурюючого впливу S_{ψ} . Вихідними даними для виконання цього етапу є моделі динаміки сигналів, які діють у каналах керування положенням платформи, отримані внаслідок проведення за спеціальною методикою експериментальних випробувань. За результатами проведених досліджень необхідно виконати оцінку статистичних характеристик, визначити спектральні щільності та взаємні спектральні щільності зазначених сигналів. Для проведення подальших розрахунків здійснюється апроксимація графіків спектральних і взаємних спектральних щільностей аналітичними виразами на класі дробово-раціональних функцій. Після цього відповідно до розробленої на попередньому етапі методики виконується структурна ідентифікація системи «гексапод + регулятор» і збурюючого впливу. З метою прийняття рішення про подальше використання отриманих результатів здійснюється аналіз якості ідентифікації згідно з обраним критерієм (8) та за необхідності відбувається спрощення (редукування) математичних моделей.

Процес редукування моделей – це процес вибору між її простотою та відповідністю фізичній картині процесу. З одного боку, за збільшення кількості параметрів, які беруть до уваги, можна покращити точність моделі, але водночас це може призвести до підвищення структурної складності моделі. З іншого – суттєве спрощення моделі може спричинити втрату її фізичного змісту, наслідком чого може бути поява несподіваних результатів при виконанні випробувань за реальних умов функціонування. Таким чином, процедура спрощення (редукування) отриманих математичних моделей є ітераційною та може вимагати повторення етапів експерименту та ідентифікації.

На четвертому етапі на основі обраного методу [5] виконується синтез оптимальної системи стохастичної стабілізації кутового положення платформи, отримання структури та параметрів регулятора $W_{рег}$. Вихідними даними для здійснення синтезу є передаточна функція системи «гексапод + регулятор» $W_{об}$ та збурюючого впливу S_{ψ} . Обраний метод дозволяє визначити матрицю передаточних функцій регулятора $W_{рег}$, підключення якого у коло зворотного зв'язку системи [5] забезпечує стійкість замкненої системи керування (рис. 4) та доставляє мінімум сумі зважених дисперсій компонентів векторів u та x , представлений у вигляді функціоналу J :

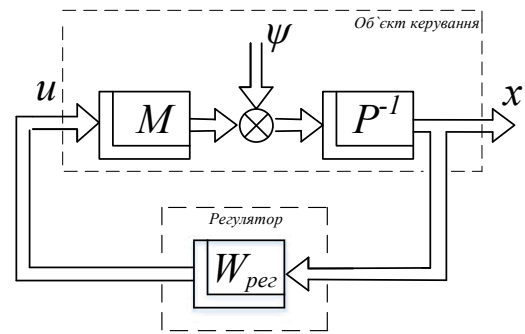


Рис. 4. Структурна схема системи стабілізації

$$J = \langle x' R x \rangle + \langle u' C u \rangle, \quad (9)$$

де x – 2-вимірний вектор вихідних сигналів об'єкта керування; u – 2-вимірний вектор сигналів керування; $'$ – символ операції «транспонування», $\langle \rangle$ – символ математичного сподівання, R – додатно визначена діагональна вагова матриця; C – невід'ємно визначена діагональна вагова матриця.

Після знаходження матриці передаточних функцій регулятора $W_{рег}$ відбувається обчислення обраного показника якості J та його складників.

На п'ятому етапі необхідно кількісно оцінити якість отриманої системи на основі обраного показника якості. Кількісне визначення ефекту від використання системи, що пропонується, має бути здійснене шляхом відповідної постановки та вирішення задачі аналізу якості оптимальної системи стохастичної стабілізації кутового положення платформи за зміни в широких межах параметрів об'єкта керування та збурення.

На шостому етапі виконується розробка методики реалізації оптимальної системи стохастичної стабілізації. На останньому етапі необхідно провести випробування розробленої системи за умов виробництва й оцінити економічний ефект від її впровадження.

Висновки. У роботі представлено основні етапи створення системи стабілізації кутового положення платформи з використанням сучасних наукоємних технологій проектування. Успішна реалізація всіх зазначених етапів забезпечить досягнення максимальної точності стабілізації кутового положення платформи. Результати вирішення задач структурної ідентифікації, синтезу й аналізу якості дозволять прийняти науково обґрунтоване рішення про доцільність використання системи, що пропонується. У разі прийняття позитивного рішення необхідно буде лише реалізувати матрицю оптимального регулятора на сучасній елементній базі.

Список літератури:

1. Посадка беспилотных летательных аппаратов на суда: проблемы и решения / А.А. Александров и др. ; под науч. ред. Г.А. Коржавина. Санкт-Петербург : Судостроение, 2014. 192 с.
2. Stewart D. A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the Institution of mechanical engineers*, 1965. Vol. 180. P. 371–385.
3. Андриевский Б.Р., Шаров С.Н. Определение положения посадочного устройства БПЛА в условиях качки. *Морской вестник*. 2012. № 2 (42). С. 75–77.
4. Ren W., Beard R. W. Trajectory Tracking for Unmanned Air Vehicles With Velocity and Heading Rate Constraints. *IEEE Trans. Control Systems Technol.* 2004. Vol. 12 (5). P. 706–716.
5. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации : монография / В.Н. Азарсков и др., общ. ред. Л.Н. Блохина. Киев : Книжное издательство НАУ, 2006. 440 с.
6. Boyin Ding. A Study of a Gough-Stewart Platformbased Manipulator for Applications in Biomechanical Testing: A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Ph.D. in Mechanical Engineering / School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide. South Australia, Australia, 2014. 237 p.
7. Зозуля, В., Осадчий, С., Беляев Ю.Б. Класифікація завдань і принципів управління механізмом паралельної кінематичної структури для вирішення різних завдань. *Automation of Technological and Business Processes*. 2018. № 10 (2). С. 18–29.
8. Melnychenko M.M., Osadchy S.I., Zozulya V.A. Identification of the Signals in Position Control Circuits of a Hexapod Platform. *Electronics and control systems*. 2016. № 4. P. 51–57.
9. Зозуля В.А., Осадчий С.І. Огляд методів побудови систем керування механізмом паралельної кінематичної структури на основі платформи Стюарта (гексапод). *Automation of Technological and Business Processes*. 2019. № 11 (3). С. 23–31.
10. Alexandre Campos, Jacqueline Quintero, Roque Saltaren, Manuel Ferre and Rafael Aracil. An Active Helideck Testbed for Floating Structures based on a Stewart-Gough Platform: Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Acropolis Convention Center Nice, France, 22–26 Sept, 2008. P. 3705–3710.
11. Campa R., Bernal J., Soto I. Kinematic Modeling and Control of the Hexapod Parallel Robot : Proceeding of American Control Conference (ACC), Boston, MA, USA, 6–8 July, 2016. P. 1203–1208.

Osadchy S.I., Bereziuk I.A., Melnichenko M.M. MAXIMIZING THE STABILIZATION ACCURACY OF ANGULAR POSITION OF THE LANDING PLATFORM

Landing aircraft in difficult weather conditions is one of the most difficult operations, and landing on dynamic floating objects in such conditions is a real challenge for aircraft and their operators and pilots. At the present stage, the use of mechanisms with parallel kinematics, namely the Stewart platform (hexapod) as a takeoff and landing table has become widespread.

The article presents research aimed at creating a control system for the angular position of the platform for takeoff and landing of unmanned aerial vehicles and helicopters from the surfaces of ships on the high seas in wave turbulence and difficult weather conditions. Analysis of the results of modern research in the field of creating systems of this class allowed us to conclude that overcoming the disadvantages of existing systems and achieving the highest accuracy of stabilization of the angular position of the platform can be done using multidimensional optimal systems of stochastic stabilization. One of the effective methodologies for creating systems of this class is based on the use of models of the dynamics of the control object (hexapod) and the existing perturbations and the quadratic quality criterion.

The article presents the methodology and technology of maximizing the accuracy of stabilization of the angular position of the landing platform installed on a moving object (vessel), through the development and implementation of new principles of control mechanisms with parallel kinematics such as hexapods. The proposed approach to the synthesis of the stabilization system of the angular position of the platform differs in that the initial data are models of hexapod dynamics and spectral density of the active perturbation obtained on the basis of experimental data and the use of spectral algorithm of structural identification. The basic stages of the proposed methodology are the structural identification of the matrix of transfer functions of the hexapod as a control object and the spectral density of the active perturbation; synthesis of the optimal structure of the system of stochastic stabilization of the angular position of the hexapod platform; analysis of the quality of the system of the proposed system.

The theoretical basis for the successful implementation of these stages are scientifically based methods and algorithms for estimating and identifying complex dynamic objects and perturbations in real operating conditions, as well as modern methods of optimal synthesis. The implementation of this system will allow to obtain the maximum possible quality and accuracy of management.

Key words: *unmanned aerial vehicle, Stewart platform (hexapod), optimal stochastic stabilization system, hexapod dynamics model, quadratic quality criterion, spectral perturbation density, structural identification, spectral synthesis algorithm.*