

С.І. ОСАДЧИЙ, Б.О. ГАВРИЛЮК, Г.С. ТИМОШЕНКО

Льотна академія Національного авіаційного університету

В.А. ЗОЗУЛЯ

Державний торговельно-економічний університет

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ІМІТАЦІЇ РУХІВ НОСІЯ АВІОНІКИ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

Статтю присвячено розробленню методики створення засобами інструмента Simulink середовища Matlab комп'ютерно-інтегрованої системи для відтворення рухів носія авіоніки в лабораторних умовах за допомогою платформи Стюарта. Розробка та впровадження цієї методики допоможуть подолати суперечності між умовами атестації засобів авіоніки та умовами їх функціонування на реальному об'єкті. Зі свого боку, подолання цієї суперечності дасть змогу суттєво підвищити точність вимірювання параметрів польоту. Об'єктом дослідження є макетний зразок платформи Стюарта. Предмет дослідження полягає у визначенні програмного та апаратного засобів імітації просторового руху автономного підводного безпілотної рухомого об'єкта як носія авіоніки. У статті використано методи синтезу оптимальних багатовимірних фільтрів формування стохастичних процесів, візуального об'єктоорієнтованого програмування та аналітичної механіки пристроїв паралельної кінематики. На основі аналізу літературних джерел показано залежність характеристик похибок безплатформної інерціальної навігаційної системи від характеру рухів її носія. Обґрунтовано методику та представлено її застосування для створення імітатора рухів такого носія на базі макета платформи Стюарта. Ця методика налічує шість елементів: обґрунтування вибору контролера для інтерфейсу зв'язку програмного середовища Matlab із серводвигунами платформи Стюарта; встановлення та налаштування пакету програмної підтримки обраного контролера для інструмента Simulink; синтез структури та параметрів Simulink-моделі підсистеми формування сигналів керування платформою Стюарта; розробка Simulink-моделі підсистеми розв'язання зворотної задачі кінематики; розробка Simulink-моделі підсистеми визначення кутів повороту приводних двигунів; розробка Simulink-моделі підсистеми керування рухом платформи. Розроблена методика дає змогу проектувати та створювати на базі платформи Стюарта імітатори стохастичних рухів носія вимірювача навігаційної інформації в просторі. Завдяки цьому виникає можливість протестувати динамічні характеристики вимірювачів в умовах, що наближені до реальних. Єдиним обмеженням застосування нової методики є вимога відповідності смуги пропускання приводів платформи та практичної ширини спектра програмного сигналу.

Ключові слова: комп'ютерно-інтегрована система, імітація, синтез, фільтр, платформа Стюарта, програмні засоби, серводвигуни, інтерфейс, Matlab, Simulink.

S.I. OSADCHYI, B.O. GAVRILUK, H.S. TYMOSHENKO

Flight Academy of the National Aviation University

V.A. ZOZULYA

State University of Trade and Economics

COMPUTER-INTEGRATED SYSTEM FOR IMITATING THE AVIONICS CARRIER MOTIONS IN LABORATORY CONDITIONS

The article is devoted to developing the methodology for creating the avionics carrier motions computer-integrated reproducing system in laboratory conditions using the Stewart platform with a help of the Simulink tools from the Matlab environment. The development and implementation of this methodology will allow to overcome the contradiction between the conditions of certification of avionics and the conditions of their operation at a real facility. In turn, overcoming this contradiction will significantly increase the accuracy of measuring flight parameters. The studying object is a Stewart platform prototype. The subject of the study is to determine the software and hardware means of simulating the spatial motion of an autonomous underwater unmanned mobile object as an avionics carrier. This article uses the optimal multi-dimensional filters for stochastic processes formation synthesis methods, visual object-oriented programming and analytical mechanics of parallel kinematics devices. Based on the analysis literary sources, the platformless inertial navigation system error characteristics dependence on the its carrier motions nature is shown. The technique is substantiated and its application is presented for creating a motion simulator of such a carrier based on the Stewart platform mock-up. This technique consists of six elements: interface controller choice for the Matlab software environment communication with the Stuart platform servomotors; installation and configuration of the selected controller for the Simulink tool software support package; structure and parameters synthesis of the Simulink model for the Stewart platform control signal generation subsystem; Simulink model for the solving the inverse kinematics problem subsystem development; subsystem for

determining the drive motors rotation angles Simulink model development; platform motion control subsystem Simulink model development. The developed methodology allows designing and creating simulators of navigation information measuring device carrier in space stochastic movements based on the Stewart platform. This makes it possible to perform measuring devices dynamic characteristics certification in conditions close to real ones. The only limitation of the new methodology application is the requirement of matching the platform drives bandwidth and the practical width of the program signal spectrum.

Key words: computer-integrated system, simulation, synthesis, filter, Stewart platform, software, servomotors, interface, Matlab, Simulink.

Постановка проблеми

Завдання підвищення точності автономного отримання навігаційної інформації стає особливо актуальним в умовах широкого використання безпілотних літальних апаратів за наявності активної протидії засобами радіоелектронної боротьби. Основним автономним джерелом навігаційної інформації [15] на борту літального апарату цього класу в таких умовах стає безплатформна інерціальна навігаційна система (БІНС). Її характерною особливістю [5; 15] є накопичення похибки визначення координат місця об'єкта та його орієнтації в просторі. Боротьба із цими похибками відбувається декількома способами, які залежать від алгоритму роботи БІНС та принципів роботи її сенсорів. (рис. 1) [3].

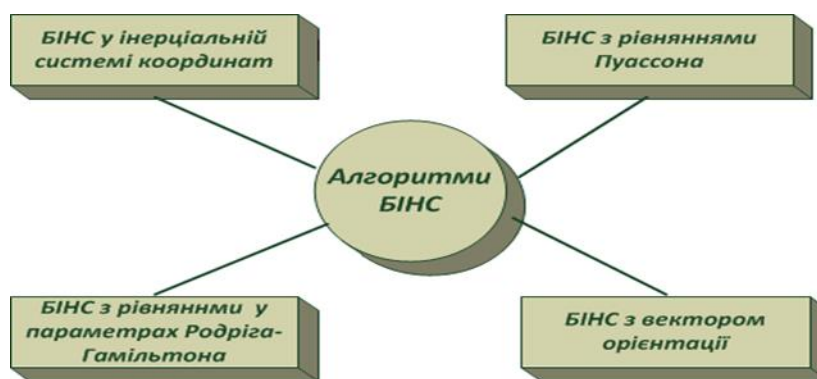


Рис. 1. Види алгоритмів БІНС

До таких способів належать методи фільтрації сигналів від датчиків [9; 10; 14], вейвлет-аналіз та прогнозування [11], застосування модифікованих фільтрів Калмана [19], комплексування навігаційної інформації [20]. Однак успіх у використанні будь-якого із цих методів визначається наявністю інформації про моделі динаміки сенсорів БІНС та їх похибок.

У статті [14] доведено, що властивості похибок сенсорів БІНС суттєво залежать від характеру рухів носія, на борту якого розмішені ці вимірювальні елементи. Так, одна й та сама навігаційна система може змінювати точність роботи при зміні характеру рухів носія [18]. Водночас метрологічна атестація та калібрування вимірювальних пристроїв такого класу здійснюється в штучних умовах, коли характеристики рухів їх корпусу суттєво відрізняються від реальних рухів носія [3]. Отже, є суперечність між реальними умовами роботи БІНС та умовами її роботи при метрологічній атестації. Зазначена суперечність є однією з причин відмінності реальних характеристик похибок вимірювання навігаційних параметрів від характеристик, визначених під час метрологічної атестації.

З огляду на це, проблема дослідження полягає в усуненні визначеної суперечності завдяки наближенню умов роботи БІНС у процесі атестації до реальних умов роботи на борту носія.

Аналіз основних досліджень та публікацій

Таке наближення можливе за рахунок розробки комп'ютерно-інтегрованих систем імітації реальних рухів носія БІНС у лабораторних умовах. Аналіз експериментальних даних про

рухи БПЛА коптерного типу, який проведено в статті [4], показав, що ці рухи мають дві зв'язані між собою випадкові складники. Перший складник – кутовий рух БПЛА навколо центру мас, а другий – тривимірне лінійне переміщення його центру мас. Так, об'єкт, який у лабораторних умовах повинен імітувати рухи БПЛА, повинен мати 6 ступенів свободи: три кутові та три лінійні. Єдиним об'єктом, який відповідає цим умовам та може бути розміщений у лабораторії, є платформа Стюарта (рис. 2).

Усебічний аналіз робіт багатьох дослідників про використання платформи Стюарта, наведений у статті [2], показав, що більшість наявних на сьогодні конструкцій передбачає використання спеціалізованих контролерів, які керують рухами цієї платформи.

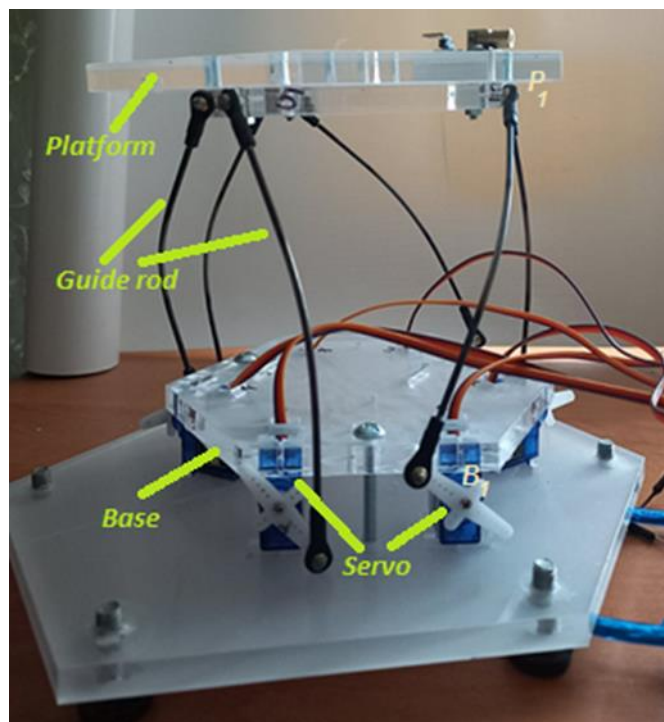


Рис. 2. Макет платформи Стюарта

Однак їх застосування ускладнює лабораторне обладнання завдяки введенню до його складу різноманітних засобів реєстрації, обробки та відображення інформації. Водночас програмне середовище Matlab разом з інструментом Simulink дає змогу створювати [16] комп'ютерно-інтегровані системи, які забезпечують можливість виконання операцій керування рухом багатовимірною об'єкта керування та збору експериментальних даних про його рух у реальному часі.

Попри досить велике коло публікацій щодо використання середовища Matlab для створення додатків реального часу, наприклад статті [16; 25], як правило, всі вони дають змогу здійснити моделювання хоч і в реальному часі, але у віртуальному просторі. Особливість матеріалів, представлених у цій статті, полягає у визначенні набору правил створення кіберфізичної системи, яка поєднує віртуальне середовище інструмента Simulink з платформою Стюарта (рис. 3) для відтворення рухів носія авіоніки в лабораторних умовах.

Якщо обрати функціональну схему кіберфізичної системи у вигляді послідовного з'єднання персонального комп'ютера, контролера передавання даних (інтерфейсу) та платформи Стюарта, то завдання синтезу комп'ютерно-інтегрованої системи імітації реальних рухів носія БІНС у лабораторних умовах формулюється так.

За відомою моделлю динаміки рухів носія БІНС, типом контролера передавання даних (інтерфейсу зв'язку) та типом серводвигунів платформи Стюарта розробити Simulink-модель системи керування рухом платформи в реальному часі.

Мета дослідження

Мета статті – розробити методику створення засобами інструмента Simulink середовища Matlab комп'ютерно-інтегрованої системи для відтворення рухів носія авіоніки в лабораторних умовах за допомогою платформи Стюарта (рис. 2).

Викладення основного матеріалу дослідження

Уважатимемо, що функціональна схема комп'ютерно-інтегрованої системи імітації рухів носія БІНС (рис. 3) містить такі елементи, як носій (ноутбук) віртуальної моделі рухів основи, на якій встановлено БІНС, інтерфейс зв'язку носія моделі із серводвигунами платформи Стюарта (контролер) та платформа Стюарта.

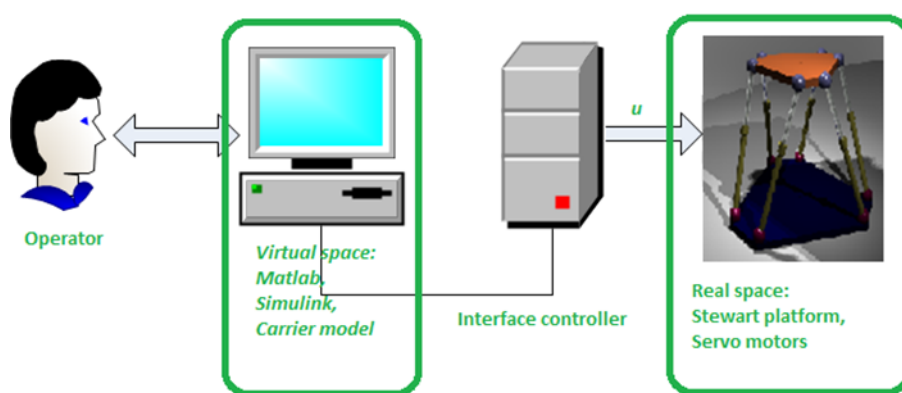


Рис. 3. Архітектура комп'ютерно-інтегрованої системи

У такому разі методологія дослідження містить п'ять частин:

- обґрунтування вибору контролера для інтерфейсу зв'язку програмного середовища Matlab із серводвигунами платформи Стюарта;
- установлення та налаштування пакету програмної підтримки обраного контролера для інструмента Simulink;
- синтез структури та параметрів Simulink-моделі підсистеми формування сигналів керування платформою Стюарта (модель носія);
- розробка Simulink-моделі підсистеми розв'язання зворотного завдання кінематики;
- розробка Simulink-моделі підсистеми визначення кутів повороту приводних двигунів;
- розробка Simulink-моделі підсистеми керування рухом платформи.

Для постановки та розв'язання першої частини завдань розробки комп'ютерно-інтегрованої системи необхідно визначити параметри та характеристики серводвигунів макета платформи Стюарта. Як видно з рис. 2, основа (base) встановлена на корпус шести серводвигунів типу SG90. Технічні характеристики цього сервоприводу відповідно до [23] представлені в таблиці 1, а електрична схема має вигляд рис. 4.

Як видно з таблиці 1 та рис. 4, кожен із сервоприводів побудований на основі триполюсного двигуна постійного струму із широтно-імпульсним керуванням та напругою живлення від 4.2 до 7.2 В. Отже, інтерфейс зв'язку комп'ютера з приводами повинен дозволяти синхронне керування шістьма двигунами за допомогою зміни довжини імпульсів керування від 1000 до 2000 μs , період подання яких становить 20 ms.

Таблиця 1

Характеристики сервоприводу SG90

Modulation:	PWM
Torque:	1.8 kg*sm
Speed:	60°/0.10 sec
Voltage:	4.8–7.2 V
Motor Type:	3-pole
Rotational Range:	180°
Pulse Cycle:	ca. 20 ms
Pulse Width:	1000–2000 μ s



Рис. 4. Схема контактів для під'єднання

Зазначені вимоги виконані за допомогою контролера Arduino Mega 2560 [7]. Під'єднання клем PWM серводвигунів, а також їх контактів живлення Vcc та Ground до відповідних контактів плати контролера наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Таблиця під'єднань серводвигунів

Двигун	Контакти	Контакти Arduino
1	PWM	DIGITAL 4S
1	Vcc	DIGITAL 4V
1	Ground	DIGITAL 4G
2	PWM	DIGITAL 5S
2	Vcc	DIGITAL 5V
2	Ground	DIGITAL 5G
3	PWM	DIGITAL 6S
3	Vcc	DIGITAL 6V
3	Ground	DIGITAL 6G
4	PWM	DIGITAL 7S
4	Vcc	DIGITAL 7V
4	Ground	DIGITAL 7G
5	PWM	DIGITAL 8S
5	Vcc	DIGITAL 8V
5	Ground	DIGITAL 8G
6	PWM	DIGITAL 9S
6	Vcc	DIGITAL 9V
6	Ground	DIGITAL 9G

Отже, перша частина завдань дослідження виконана повністю та визначено, що для здійснення зв'язку комп'ютера з платформою Стюарта буде використано DIGITAL-виходи плати контролера Arduino Mega 2560.

Для успішного використання обраного контролера в комп'ютерно-інтегрованій системі здійснено об'єктоорієнтоване візуальне програмування його роботи за допомогою інструмента Simulink пакету Matlab.

Необхідною умовою для здійснення візуального програмування плати контролера Arduino 2560 за допомогою інструмента Simulink є наявність у бібліотеці цього інструмента пакету програмної

підтримки обраного контролера. Достатньою умовою вищезазначеного програмування є налаштування інструмента Simulink для роботи з обраним мікроконтролером (Arduino Mega 2560).

Виконання цієї необхідної умови здійснене шляхом інсталяції додаткової бібліотеки Simulink Support Package for Arduino Hardware. Інсталяція здійснена в результаті виконання наступного алгоритму, який викладений у ресурсі [13]:

1. Open MATLAB 2022a on my computer.
2. Click on Apps and then click 'Get More Apps'.
3. In the search bar of a new pop-up tab named 'Add-on Explorer' type 'Simulink support package for Arduino Hardware' and press enter.

4. Press install button and see a green mark on your package icon.

Once, installed my computer restarted Matlab.

Достатня умова досягається в результаті виконання алгоритму з джерела [13].

1. Під'єднати плату контролера до USB порту комп'ютера. У результаті в Command Window середовища Matlab з'явиться повідомлення: 'Arduino Mega 2560 detected. This device is ready for use with Simulink Support Package for Arduino Hardware.'

2. У середовищі Matlab запустити інструмент Simulink створити пусту модель (рис. 5) та перейти на вкладку MODELING.

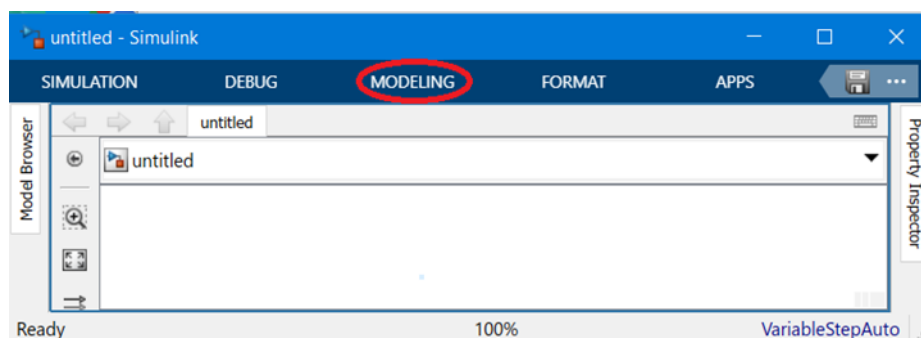


Рис. 5. Нова пуста модель

3. Натиснути кнопку Model Settings та у pop-up tab (рис. 6) обрати пункт Model Sett...

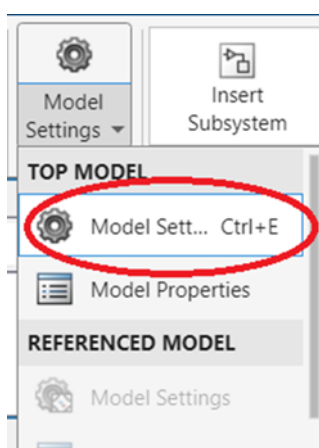


Рис. 6. Результат натискання кнопки Model Settings

У результаті цих дій повинно з'явитися вікно 'Configuration parameters', де необхідно вибрати пункт 'Hardware Implementation' (рис. 7) та натиснути кнопку керування роір-меню 'Hardware board'.

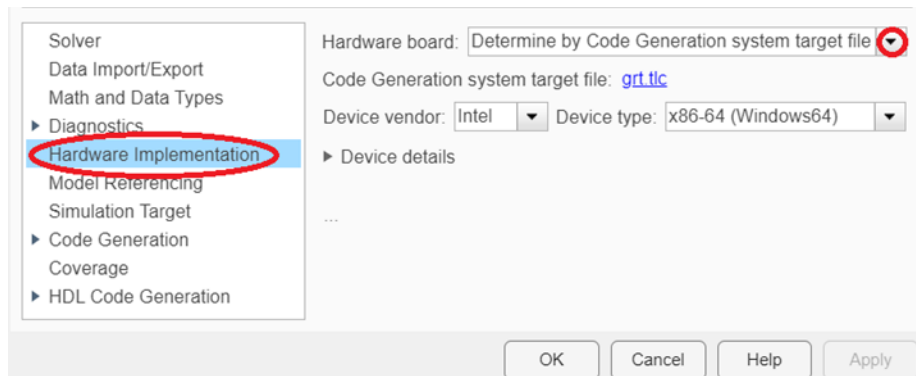


Рис. 7. Вікно конфігурації параметрів

4. У поп-ап-меню (рис. 8) вибрати тип контролера для інтерфейсу, який приєднаний до USB-порту комп'ютера.

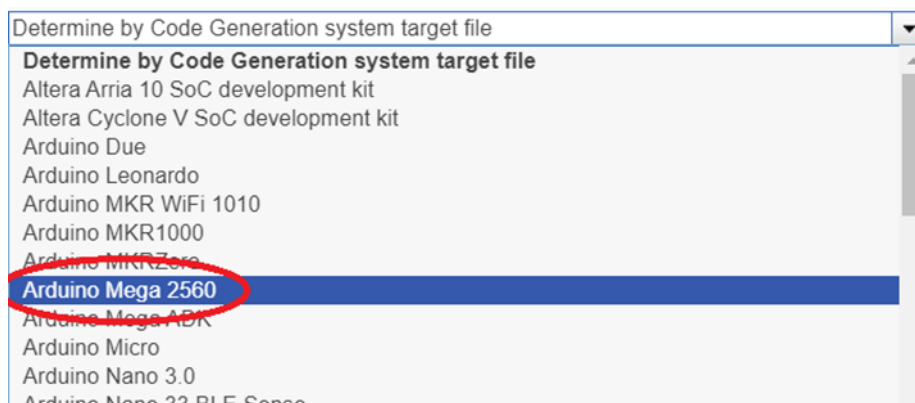


Рис. 8. Меню вибору типу контролера

У результаті інструмент Simulink буде налаштовано для роботи з контролером Arduino Mega 2560, а вікно 'Configuration parameters' набуває вигляду рис. 9.

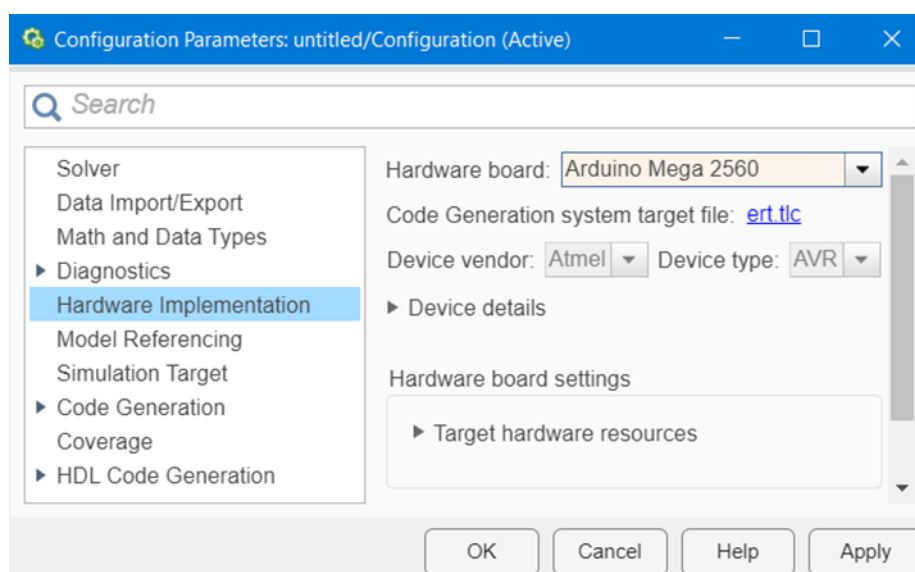


Рис. 9. Результат налаштування Simulink для роботи з Arduino Mega 2560

Отже, визначені алгоритми встановлення та налаштування пакету програмної підтримки контролерів Arduino для інструмента Simulink.

Підсистема формування сигналів керування платформою Стюарта (модель носія) призначена для формування вектора r -сигналів заданого положення платформи (рис. 2). Одним із прикладів вектора сигналів заданого положення платформи є вектор r , який визначено з рівняння

$$r = [\vartheta \quad \gamma \quad \psi]^T, \quad (1)$$

де ϑ, γ, ψ – сигнали заданих значень кутів тангажу, крену та рискання платформи; індекс T – операція транспонування. Завдання синтезу структури та параметрів Simulink-моделі підсистеми формування сигналів керування платформою Стюарта полягає в тому, щоб за відомою моделлю динаміки рухів носія БІНС розробити підсистему Simulink, на виході якої буде формуватися вектор сигналів заданого положення платформи r (рис. 10). Для розв'язання цього завдання використано метод формувального фільтра [1]. Цей метод дає змогу знайти матрицю передавальних функцій формувального фільтра W_f , на входах якого діє вектор δ -корельованих білих шумів, а на виходах – вектор сигналів заданого положення платформи r (рис. 10). Числові характеристики компонентів сформованого вектора r повинні збігатися із числовими характеристиками вектора сигналів на виході носія БІНС.

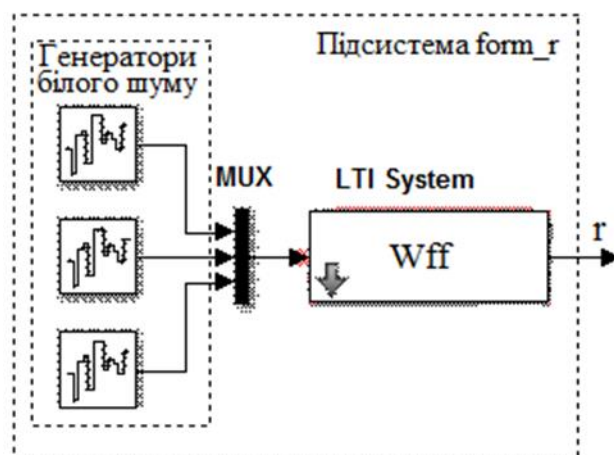


Рис. 10. Підсистема формування програмного сигналу

Відповідно до положень статистичної динаміки систем управління [1], якщо відома матриця спектральних густин вектора r , то матриця передавальних функцій W_f може бути знайдена як результат факторизації [6] такого виразу:

$$W_f W_{f*} = S_{rr}, \quad (2)$$

де S_{rr} – матриця спектральних щільностей вектора сигналів r ; індекс «*» – знак ермітового спряження матриць [8].

Наприклад, за даними з джерела [17], матриця спектральних щільностей кутових рухів автономного підводного безпілотної рухомого об'єкта представляється у вигляді:

$$S_{rr} = \begin{bmatrix} S_{\vartheta\vartheta} & S_{\vartheta\gamma} & S_{\vartheta\psi} \\ S_{\vartheta\gamma} & S_{\gamma\gamma} & S_{\gamma\psi} \\ S_{\vartheta\psi} & S_{\gamma\psi} & S_{\psi\psi} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $S_{\vartheta\vartheta}, S_{\gamma\gamma}, S_{\psi\psi}$ – спектральні щільності зміни кутів тангажу ϑ , крену γ та ристання ψ ; $S_{\vartheta\gamma}, S_{\gamma\psi}, S_{\vartheta\psi}, S_{\psi\vartheta}, S_{\psi\gamma}, S_{\gamma\vartheta}$ – взаємні спектральні щільності між кутами, які зазначені в індексах;

$$S_{\vartheta\vartheta} = \frac{0.0046|(s+316.6)(s^2+1.487s+20.23)|^2}{|(s^2+0.3s+1.97)(s^2+7.98s+82.3)|^2}, \quad S_{\gamma\gamma} = \frac{0.03|s+0.33|^2}{|s^2+0.3s+1.97|^2}, \quad (4)$$

$$S_{\psi\psi} = \frac{0.026|s+0.88|^2}{|s^2+0.3s+1.97|^2}, \quad S_{\vartheta\gamma} = \frac{0.01|s+0.47|^2}{|s^2+0.3s+1.97|^2}, \quad S_{\vartheta\psi} = \frac{0.0077|s+0.88|^2}{|s^2+0.3s+1.97|^2}, \quad (5)$$

$$S_{\gamma\psi} = \frac{0.01|s+0.88|^2}{|s^2+0.3s+1.97|^2}, \quad S_{\gamma\vartheta} = S_{\vartheta\gamma}^*, \quad S_{\psi\vartheta} = S_{\vartheta\psi}^*, \quad S_{\psi\gamma} = S_{\gamma\psi}^*, \quad (6)$$

s – комплексна змінна, що дорівнює добутку $j\omega$ ($j=\sqrt{-1}$).

Факторизація [1] матриці (2) з урахуванням виразів (3)–(6) допомагає визначити матрицю передавальних функцій формувального фільтра у вигляді

$$W_f = \frac{1}{s^2+0.3s+1.97} \begin{bmatrix} \frac{21.5(s^2+1.46s+2)}{s^2+7.98s+82.3} & 0 & 0 \\ 0.048(s+0.052) & 0.16(s+0.052) & 0 \\ 0.048(s+0.88) & 0.064(s+0.88) & 0.16(s+0.88) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для завершення синтезу необхідно виконати дві дії. По-перше, створити об'єкт з ідентифікатором Wf у середовищі Matlab в одному з форматів *ss*, *tf* або *zpk*, який відповідає матриці (7), скориставшись відомим із джерел [21, 24, 27] правилом. По-друге, створити підсистему *form_r* у інструменті Simulink [12], призначену для формування вектора r . Структура цієї підсистеми (рис. 10), створеної за правилами з монографії [12], містить три генератори білого шуму, пристрою формування вектора некорельованих білих шумів MUX та лінійної інваріантної в часі системи LTI System. На виході підсистеми *form_r* при моделюванні буде сформовано тривимірний стаціонарний центрований випадковий процес r . Матриця спектральних щільностей цього процесу відповідає рівнянню (3).

Отже, виконано третю частину методології розробки системи імітації рухів носія. Наступним кроком є розробка Simulink-моделі підсистеми розв'язання зворотного завдання кінематики.

Зворотне завдання кінематики [12] полягає в тому, щоб за визначеним у момент часу t вектором r знайти матрицю L , кожен стовпчик якої є вектором l_k , що поєднує вал двигуна з номером k (точку B_k) та відповідний полюс платформи P_k (рис. 11)

$$L = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5 \quad l_6]. \quad (8)$$

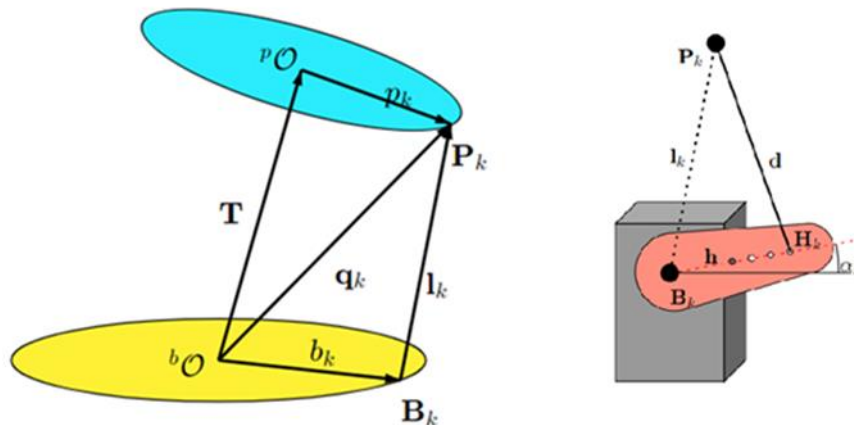


Рис. 11. Кінематична схема платформи Стюарта

Відповідно до [12], кожен з векторів матриці (8) може бути визначений з рівняння:

$$l_k = T + R \times p_k \times \bar{R} - b_k = \begin{bmatrix} l_k^{(x)} \\ l_k^{(y)} \\ l_k^{(z)} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де T , p_k , b_k – вектори, представлені на рис. 11, R – кватерніон повороту платформи відносно основи.

Рівняння (9) дало змогу розробити Simulink-модель (рис. 12). підсистеми розв’язання зворотного завдання кінематики у вигляді підсистеми inv_cp. Як видно, вона містить декілька блоків.

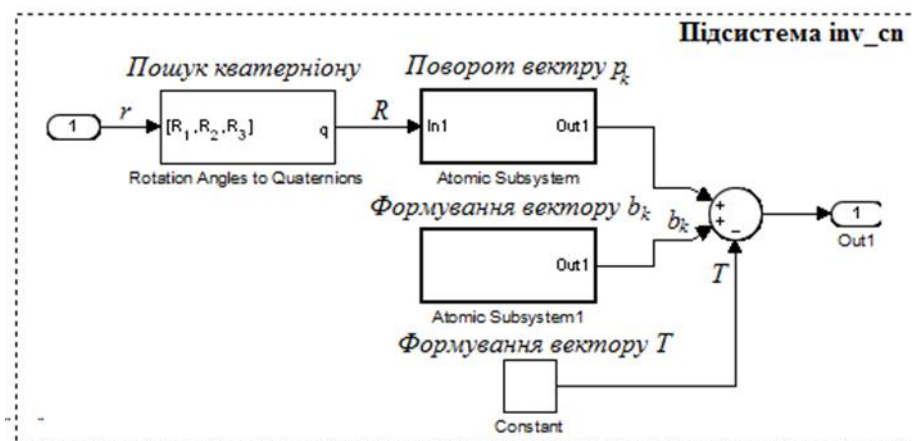


Рис. 12. Підсистема розв’язання зворотного завдання кінематики

Перший блок – Rotation Angles to Quaternions бібліотеки Aerospace Blockset/Utilities/Axes Transformations. Він призначений для формування кватерніону повороту платформи за відомими кутами її обертання та заданою послідовністю поворотів. У розробленій моделі прийнята послідовність поворотів Крилова (перший на кут рихкання навколо Z; другий на крен навколо Y; третій на тангаж навколо X).

Другий блок (Atomic Subsystem) призначено для приведення вектора p_k до системи координат з початком у точці bO (рис. 11). Розв'язок цього завдання засновано на обчисленні добутків

$$R \times p_k \times \bar{R} \quad \forall k = 1, 6$$

для кожного вектора p_k (рис. 11). У блоці Atomic Subsystem (рис. 12) ця операція здійснюється за допомогою функції Quaternion Rotation з бібліотеки SIMULINK.

Блок Atomic Subsystem 1 призначено для формування матриці з векторів b_k , що визначають координати точок B_k (рис. 11) відносно системи координат, зв'язаної з основою платформи Стюарта.

Блок Constant формує матрицю з векторів T , які визначають положення полюсу pO платформи (рис. 11) відносно бази bO .

Отже, розроблена підсистема розв'язання зворотного завдання кінематики. Наступною частиною методології є створення підсистеми обчислення заданого кута повороту важелів серводвигунів.

Підсистема обчислення заданого кута повороту важелів серводвигунів *inv_alfa* має один вхід та один вихід. На вході цієї підсистеми діє матриця (8) векторів l_k , сформована підсистемою *inv_cn* (рис. 12), а на виході формується матриця кутів повороту важелів серводвигунів

$$A = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \alpha_4 \quad \alpha_5 \quad \alpha_6] . \quad (10)$$

В основу алгоритму покладено залежність, яка доведена в джерелі [26] та має такий вигляд:

$$\alpha_k = \arcsin \frac{g_k}{\sqrt{e_k^2 + f_k^2}} + \arctan \frac{f_k}{e_k} , \quad (11)$$

де

$$e_k = 2|h|l_k^{(z)}; \quad f_k = 2|h|(l_k^{(x)} \cos \beta_k + l_k^{(y)} \sin \beta_k); \quad g_k = \sqrt{|l_k|^2 - |d|^2 + |h|^2};$$

$|d|$ – довжина тяги (рис. 11); $|h|$ – відстань між точками B_k та H_k (рис. 11), β_k – кут повороту важеля двигуна з номером k відносно вертикальної осі (рис. 13).

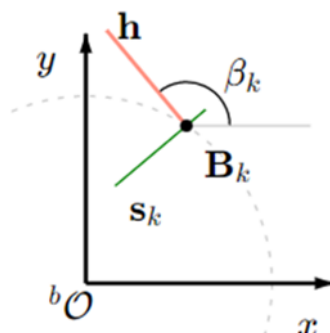


Рис. 13. Кутове положення важеля h у площині основи [27]

Константи d, h, β_k повинні визначатися з конструкції платформи та задаються в підсистемі `inv_alfa`.

Останньою частиною методології є розробка Simulink-моделі підсистеми керування рухом платформи. Ця підсистема (`cntr_pl`) призначена для встановлення важелів серводвигунів у задане положення. Входом підсистеми є матриця заданих значень кутів A , а виходом – поворот важелів серводвигунів. Функціональна схема зазначеної моделі налічує декілька блоків (рис. 14).

По-перше, це блок DEMUX, який виокремлює компоненти з матриці A . По-друге, це шість блоків Arduino standard servo write. Ці блоки змінюють шпаруватість імпульсів на відповідних контактах плати Arduino-mega (Табл. 1) залежно від заданого значення кута повороту α . Зміна шпаруватості імпульсів викликає встановлення важеля серводвигуна в певне положення.

Загальна схема Simulink-моделі є послідовним з'єднанням підсистем `form_r`, `inv_cn`, `inv_alfa` та `cntr_pl`.

Для визначення фактичного положення платформи Стюарта є дві можливості. Перша – за отриманими значеннями кутів повороту важелів обчислити положення платформи в результаті розв'язання прямої задачі кінематики. Друга – виміряти положення платформи за допомогою прямих методів вимірювання.

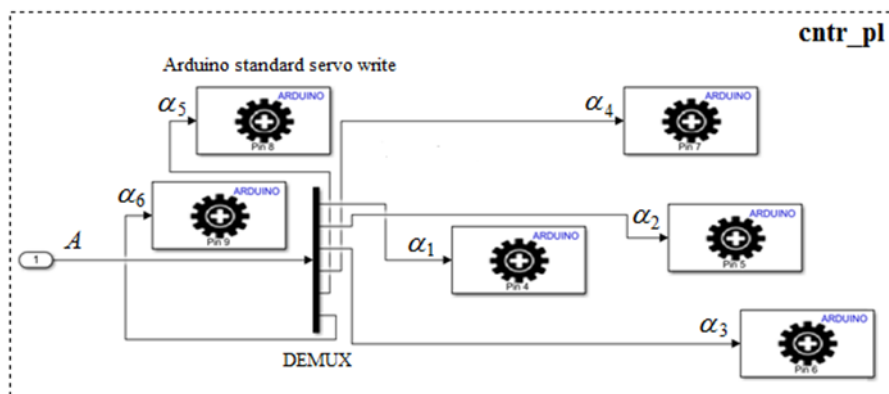


Рис. 14. Підсистема керування рухом платформи

Отже, представлена розроблена методики створення засобами інструмента Simulink середовища Matlab комп'ютерно-інтегрованої системи для відтворення рухів носія авіоніки в лабораторних умовах за допомогою платформи Стюарта.

Проведені дослідження дають змогу дійти певних висновків.

Висновки

Розроблена методика дає змогу розробляти та створювати на базі платформи Стюарта імітатори стохастичних рухів об'єкта в просторі. Завдяки цьому виникає можливість проатестувати динамічні характеристики вимірювачів навігаційної інформації в умовах, що наближені до реальних.

Застосування представленої методики вимагає наявності: бібліотек зв'язку середовища Matlab з певними контролерами, записів рухів носіїв БІНС в реальних умовах експлуатації та дає змогу суттєво підвищити точність автономного використання широкого класу приладів орієнтації та навігації.

Аналіз структури системи керування рухами платформи вказує на те, що ця система належить до класу розімкнених систем програмного керування. Головною вадою таких систем

є відсутність контролю за точністю відтворення заданих рухів. Уважається, що в разі належної роботи всіх її елементів рух платформи відповідає заданій програмі.

Подолання визначеного недоліку вимагає продовження досліджень, спрямованих на розробку замкненої системи стеження за програмою на основі платформи Стюарта.

Список використаної літератури

1. Блохін Л. М., Осадчий С. І., Дідик О. К. та ін. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів : монографія. Кропивницький : Видавець Лисенко. 2023.
2. Зозуля В. А., Осадчий С. І., Мельніченко М. М. Аналіз характеристики точності відтворення еталонної траєкторії платформою Гауфа-Стюарта з системою управління для різних видів завдань. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 2019, вип. 1(32). С. 211–219.
3. Review and selection of commercially available IMU for a short time inertial navigation. Borodacz, Krystian & Szczepanski, Cezary & Popowski, Stanisław. URL: https://www.researchgate.net/publication/353464312_Review_and_selection_of_commercially_available_IMU_for_a_short_time_inertial_navigation. (дата звернення 04.12.2024).
4. Осадчий С. І., Дяченко М. М. Збір та первинна обробка даних з системи ARDUPILOT для ідентифікації моделі динаміки квадрокоптеру. *Науковий журнал «Прикладні питання математичного моделювання»*. 2020. Т. 3. № 2.1. С. 197–205.
5. Ahmed Radi, Sameh Nassar, and Naser El-Sheimy Stochastic Error Modeling of Smartphone Inertial Sensors for Navigation in Varying Dynamic Conditions. *Gyroscopy and Navigation*. 2018. Vol. 9. No. 1. P. 76–95.
6. Aliev F.A., Bordyug V.A., Larin V.B.: Factorisation of polynomial matrices with respect to imaginary axis and unit circle. *Avtomatika*. 1989. No. 4. P. 51–58.
7. Arduino Mega 2560. WEB-сайт. URL: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Mega2560> (дата звернення 7.11.2024).
8. Bellman, R. Introduction to Matrix Analysis. 2nd edn. SIAM, Philadelphia (1997). 412 p.
9. El-Sheimy N., Hou H., Niu X. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2008. vol. 57. no. 1. P. 140–149.
10. Evans J.R. et al., Method for calculating self-noise spectra and operating ranges for seismographic inertial sensors and recorders. *Seismological Research Letters*. 2010. vol. 81. no. 4. P. 640–646.
11. Guerrier S., Skaloud J., Stebler Y., Victoria-Feser M.-P. Wavelet-variance-based estimation for composite stochastic processes. *Journal of the American Statistical Association*. 2013. vol. 108. no. 503. P. 1021–1030.
12. Inverse Kinematics of a Stewart Platform. URL: <https://raw.org/research/inverse-kinematics-of-a-stewart-platform> (дата звернення 07.11.2024).
13. Installing Hardware support packages : Step-by-step procedure to get started. URL: <https://ieee-tems-blogs.medium.com/hardware-support-packages-using-simulink-to-create-arduino-projects-5759be619d9c> (дата звернення 07.11.2024).
14. Li Y., Georgy J., Niu X., Li Q., El-Sheimy. Autonomous calibration of MEMS gyros in consumer portable devices. *IEEE Sensors Journal*. 2015. vol. 15. no. 7. P. 4062–4072.
15. Moir I., Seabridge A., Jukes M. Civil avionics systems: 2nd edition. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2013. 551 p.
16. Mosterman, Pieter Prabhu, Sameer Dowd, Andrew Glass, John Erkkinen, Tom Kluza, John Shenoy, Rohit. Embedded real-time control via MATLAB, Simulink, and xPC Target. 2005. DOI 10.1007/0-8176-4404-0_18.

17. Osadchy S., Prokophyeva I.: Multidimensional autonomous object structural identification on the base of it's disturbed motion. Gyrotechnology, Navigation, Movement Control and Aerospace Technic Engineering: materials of the VI International Conference. Reports Part II. Kyiv, Ukraine. 2007. p. 17–24.
18. Osadchy S.I., Zozulya V.A., Rudiuk G. I. The Dynamics of 3-dimentional micro-mechanic sensor of angle motions of a robot-hexapod. International Conference on. Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2015) : Proceedings of the 8th IEEE. Vol. 2. Warsaw, Poland 2015. pp. 908–912.
19. Rizvi I.H., Udayraj. A modified Kalman filter-based model for core temperature estimation during exercise and recovery with/without personal cooling interventions. *J Therm Biol.* 2022. 109. 103307. doi:10.1016/j.jtherbio.2022.103307
20. Sabatini R. The Future of Avionics Systems. R. Sabatini, 2021 *IEEE Aerospace & ELECTRONICS SYSTEMS SOCIETY, Virtual Distinguished Lecture Webinar Series*. P. 1–63. URL: <https://ieeaeass.org/tech-ops/avionics-systems-panel-asp> (Дата звернення 11.01.2024).
21. State Space. URL: <https://ch.mathworks.com/help/control/ref/ss.html> (дата звернення 1.11.2024).
22. Stewart D. A Platform with Six Degrees of Freedom. *Proc. Instn. Mech. Engrs.* 1965–66, Vol. 180, Pr. 1. No 15. Pp. 371–386.
23. TowerPro SG90 – Micro Servo. URL: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/791970/TowerPro/SG90/1> (last accessed 2024/01/11).
24. Transfer Functions TF. URL: <https://ch.mathworks.com/help/control/ug/transfer-functions.html> (last accessed 2024/01/11)
25. Using Matlab-Simulink RTW to Build Real Time Control Applications in User Space with RTAI-LXRT. URL: https://www.rtai.org/userfiles/documentation/documents/quaranta_mantegazza.pdf (last accessed 2024/01/11).
26. Using Stewart Platform as a tool to understand key robotic concepts. URL: https://github.com/Yeok-c/Stewart_Py/blob/main/01_Stewart_Py_Inverse_Kinema-tics.ipynb (last accessed 2024/11/03).
27. Zero-pole-gain model ZPK. URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/zpk.html>. (last accessed 2024/01/11).

References

1. Blokhin, L.M., Burychenko, M.Iu., Bilak, N.V., Bezkorovainyi, M.O., & Kryvonosenko, O.P. (2014). *Statystychna dynamika system upravlinnia [Statistical dynamics of control systems]*. Kyiv: National Aviation University [in Ukrainian].
2. Zozulia, V.A., Osadchy, S.I., & Melnichenko, M.M. (2019). Analiz kharakterystyky tochnosti vidtvorennia etalonnoi traiektorii platformoiu Haufa-Stiuarta z systemoiu upravlinnia dlia riznykh vydiv zavdan. [Analysis of the characteristics of the accuracy of the trajectory reproduction of the Goof-Stewart platform with system control for various types of tasks]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 1(32), 211–219 [in Ukrainian].
3. Meleshko, V.V., & Nesterenko, O.I. (2011). *Bezplatformni inertsialni navihatsiini systemy [Platform-free inertial navigation systems]*. Kirovohrad: POLIMED – Servis [in Ukrainian].
4. Osadchy, S.I., & Diachenko, M.M. (2020). Zbir ta pervynna obrobka danykh z systemy ARDUPILOT dlia identyfikatsii modeli dynamiky kvadrokopteru [Collection and initial processing of data from the ARDUPILOT system to identify the quadcopter dynamics model]. *Prykladni pytannia matematychnoho mmodeliuvannia*, 3, 2.1, 197–205 [in Ukrainian].
5. Radi*, A., Nassar, S., & El-Sheimy, N. (2018). Stochastic Error Modeling of Smartphone Inertial Sensorsfor Navigation in Varying Dynamic Conditions. *Gyroscopy and Navigation*, 9, 1, 76–95 [in English].

6. Aliev, F.A., Bordyug, V.A., & Larin, V.B. (1989) Factorisation of polynomial matrices with respect to imaginary axis and unit circle. *Avtomatika*, 4, 51–58 [in English].
7. Arduino Mega 2560. (2024). Ofitsiyni sait [Official site]. Retrieved from <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Mega2560> [in Ukrainian].
8. Bellman, R. (1997). *Introduction to Matrix Analysis*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics [in English].
9. El-Sheimy, N., Hou, H., & Niu, X. (2008). Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 57, 1, 140–149 [in English].
10. Evans, J.R., Followill, F., Hutt, C.R., Kromer, R.P., Nigbor, R.L., Ringler, A.T. ... & Wielandt, E. (2010). Method for calculating self-noise spectra and operating ranges for seis-mographic inertial sensors and recorders. *Seismological Research Letters*, 81, 4, 640–646 [in English].
11. Guerrier, S., Skaloud, J., Stebler, Y., & Victoria-Feser, M.-P. (2013). Wavelet-variance-based estimation for composite stochastic processes. *Journal of the American Statistical Association*, 108, 503, 1021–1030 [in English].
12. Inverse Kinematics of a Stewart Platform. (2024). Retrieved from <https://raw.org/research/inverse-kinematics-of-a-stewart-platform/> [in English].
13. Installing Hardware support packages: Step-by-step procedure to get started. (2024). Retrieved from <https://ieee-tems-blogs.medium.com/hardware-support-packages-using-simulink-to-create-arduino-projects-5759be619d9c> [in English].
14. Li, Y., Georgy, J., Niu, X., Li, Q., & El-Sheimy, N. (2015). Autonomous calibration of MEMS gyros in consumer portable devices. *IEEE Sensors Journal*, 15, 7, 4062–4072 [in English].
15. Moir, I., Seabridge, A., & Jukes, M. (2013). *Civil avionics systems*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd [in English].
16. Mosterman, Pieter, Prabhu, Sameer, Dowd, Andrew, Glass, John, Erkkinen, Tom, Kluza, John, & Shenoy, Rohit. (2005). Embedded real-time control via MATLAB, Simulink, and xPC Target. *Handbook of Networked and Embedded Control Systems*, 419–446 [in English].
17. Osadchy, S., & Prokophyeva, I. (2007). Multidimensional autonomous object structural identification on the base of its disturbed motion. *Gyrotechnology, Navigation, Movement Control and Aerospace Technic Engineering: Proceedings of the VI International Conference*, II, 17–24 [in Ukrainian].
18. Osadchy, S.I., Zozulya, V.A., & Rudiuk, G. I. (2015). The Dynamics of 3-dimensional micro-mechanic sensor of angle motions of a robot-hexapod. *International Conference on. Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS2015) : Proceedings of the 8th IEEE*, 2, 908–912 [in English].
19. Rizvi, I.H., & Udayraj. (2022). A modified Kalman filter-based model for core temperature estimation during exercise and recovery with/without personal cooling interventions. *Journal of Thermal Biology*, 109. doi:10.1016/j.jtherbio.2022.103307 [in English].
20. Sabatini, R. (2021). The Future of Avionics Systems. IEEE Aerospace & ELECTRONICS SYSTEMS SOCIETY, Virtual Distinguished Lecture Webinar Series. Retrieved from <https://ieee-aess.org/tech-ops/avionics-systems-panel-asp> [in English].
21. MathWorks. (2024). Official site. Retrieved from <https://ch.mathworks.com/help/control/ref/ss.html> [in English].
22. Stewart, D. (1965). A Platform with Six Degrees of Freedom. *Proc. Instn. Mech. Engrs*, 180(1), 15, 371–386 [in English].
23. TowerPro SG90 – Micro Servo. (2024). Retrieved from <https://datasheetpdf.com/pdf-file/791970/TowerPro/SG90/1> [in English].
24. Transfer Functions TF. (2024). Retrieved from <https://ch.mathworks.com/help/control/ug/transfer-functions.html> [in English].

25. Using Matlab-Simulink RTW to Build Real Time Control Applications in User Space with RTAI-LXRT. (2024). Retrieved from https://www.rtai.org/userfiles/documentation/documents/quaranta_mantegazza.pdf [in English].
26. Using Stewart Platform as a tool to understand key robotic concepts. (2024). Retrieved from https://github.com/Yeok-c/Stewart_Py/blob/main/01_Stewart_Py_Inverse_Kinema-tics.ipynb [in English].
27. Zero-pole-gain model ZPK. (2024). Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/control/ref/zpk.html> [in English].

Осадчий Сергій Іванович – д.т.н., завідувач кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів Льотної академії Національного авіаційного університету. E-mail: srg2005@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1811-3594.

Гаврилук Борис Олександрович – старший викладач кафедри конструкції повітряних суден, авіадвигунів та підтримання льотної придатності Льотної академії Національного авіаційного університету. E-mail: gavrilukas@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4605-6870.

Тимошенко Ганна Сергіївна – старший викладач кафедри аеронавігації, метеорології та організації повітряного руху Льотної академії Національного авіаційного університету. E-mail: jaanti1980@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2411-497X.

Зозуля Валерій Анатолійович – к.т.н., доцент кафедри цифрової економіки та системного аналізу Державного торговельно-економічного університету. E-mail: irish38@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3793-4686.

Osadchy Sergei Ivanovych – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Aircraft Construction, Aircraft Engines, and Airworthiness Maintenance of the Flight Academy of the National Aviation University. E-mail: srg2005@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1811-3594.

Havryliuk Boris Oleksandrovich – Senior Lecturer at the Aircraft Structures, Aviation Engines and Continuing Airworthiness Department of the Flight Academy of the National Aviation University. E-mail: gavrilukas@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4605-6870.

Tymoshenko Hanna Sergiivna – Senior Lecturer at the Department of Aeronautics, Meteorology and Air Traffic Management of the Flight Academy of the National Aviation University. E-mail: jaanti1980@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2411-497X.

Zozulya Valeriy Anatoliiovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Digital Economy and System Analysis of the State University of Trade and Economics. E-mail: irish38@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3793-4686.