



УДК 681.513;62.505;621.9.04

# ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ БАГАТОВИМІРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРИ ДЕТЕРМІНОВАНИХ ВПЛИВАХ

## TECHNOLOGIES FOR QUALITY ANALYSIS OF MULTIDIMENSIONAL CONTROL SYSTEMS UNDER DETERMINISTIC EFFECTS

Зозуля В.А.<sup>1</sup>, Осадчий С.І.<sup>2</sup>  
Zozulia V.A.<sup>1</sup>, Osadchiy S.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державний торговельно-економічний університет, м. Київ, Україна

<sup>2</sup> Льотна академія Національного авіаційного університету, м. Кропивницький, Україна

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-3793-4686>, <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-1811-3594>

E-mail: <sup>1</sup>[irish38@ukr.net](mailto:irish38@ukr.net), <sup>2</sup>[srg2005@ukr.net](mailto:srg2005@ukr.net)

Copyright © 2024 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: 10.15673/atbp.v16i3.2920

**Анотація:** метою даної статті є обґрунтування процедури аналізу якості багатовимірних замкнених систем керування. Показники якості в кожному конкретному випадку можуть бути різними, таких показників існує велика кількість. Це обумовлено різноманіттям систем керування та різними завданнями, які вони виконують. Об'єктом аналізу якості обрана система керування рухом робочої поверхні платформи Стюарта. Платформа Стюарта, має шість ступенів свободи: три поступальні ступені рухливості (зміщення характерної точки вздовж осей нерухої системи координат, пов'язаної з нерухою основою) і три обертальні ступені рухливості (поворот рухомої платформи щодо власних осей рухомої системи координат, пов'язаної з рухою платформою). В межах дослідження динамічного проектування оптимальних багатовимірних систем стохастичної стабілізації виконано постановку та формулювання проблеми максимізації якості відтворення руху робочої поверхні платформи Стюарта. Одна із складових цієї проблеми є визначення принципів вибору та алгоритму розрахунку показників якості системи керування рухом робочої поверхні платформи Стюарта в умовах функціонування - при домінуванні детермінованих складових корисних сигналів, збурень та завад. При визначальному значенні оцінки якості системи керування має детермінована складова, показником якості виступає сума певним чином зв'язаних інтегральних квадратичних показників помилок підтримки положення робочої поверхні платформи Стюарта на програмній траєкторії та значень вектору керування, яка характеризує потужність необхідну для керування.

**Abstract:** the purpose of this paper is to substantiate the procedure for analyzing the quality of multidimensional closed-loop control systems. Quality indicators in each case may be different, and there are many such indicators. This is due to the variety of control systems and the various tasks they perform. The object of quality analysis is the Stewart platform working surface motion control system. The Stewart platform has six degrees of freedom: three translational degrees of mobility (displacement of a characteristic point along the axes of a fixed coordinate system associated with a fixed base) and three rotational degrees of mobility (rotation of the moving platform relative to its axes of the moving coordinate system associated with the moving platform). As part of the study of the dynamic design of optimal multidimensional stochastic stabilization systems, the problem of maximizing the quality of the Stewart platform working surface motion reproduction is formulated. One of the components of this problem is to determine the principles of selection and algorithm for calculating the quality indicators of the Stewart platform working surface motion control system under operating conditions, i.e., when deterministic components of useful signals, disturbances, and interference dominate. When the determining value of the quality assessment of the control system has a deterministic component, the quality indicator is the sum of the weighted integral quadratic indicators of the errors of maintaining the position of the Stewart platform working surface on the program trajectory and the values of the control vector, which characterizes the power required for control.

**Ключові слова:** аналіз якості, система керування, детермінована складова, платформа Стюарта

**Keywords:** quality analysis, control system, deterministic component, Stewart platform



## Вступ

Створення гарантовано конкурентоспроможних систем стабілізації руху складних багатовимірних рухомих об'єктів, які функціонують в умовах дії різних неконтрольованих збурень, з мінімальними витратами на проектування одна із головних вимог досягнення успіху на ринку даного класу пристроїв. Як зазначено в монографії [1], одним із найбільш ефективних та перевірених при створенні різної техніки шляхів виконання такої умови є застосування експериментально-аналітичного підходу до проектування оптимальних систем стохастичної стабілізації.

До таких видів техніки до яких бажано застосовувати такий підхід є просторові механізми паралельної кінематичної структури на прикладі платформи Стюарта, яка має шість однотипних кінематичних ланцюгів (штанг) [2]. Програмно регулюючи довжину штанг платформи Стюарта, можна управляти положенням вихідної ланки (рухомої платформи), переміщати її в вертикальному і горизонтальному напрямках, повертати в трьох площинах. Платформа Стюарта, має шість ступенів свободи: три поступальні ступені рухливості (зміщення характерної точки вздовж осей нерухомої системи координат, пов'язаної з нерухомим основою) і три обертальні ступені рухливості (поворот рухомої платформи щодо власних осей рухомої системи координат, пов'язаної з рухомою платформою).

Для забезпечення гарантованої конкурентоспроможності виробів зазначеного класу необхідно максимізувати якість підтримки положення таких об'єктів на програмній траєкторії в реальних умовах функціонування.

Максимальна якість стабілізації [3] може бути досягнута лише у системах, структура та параметри яких обрані таким чином, щоб забезпечити екстремум деякого обраного критерію. Як правило, це - сума певним чином зважених векторів відхилень вихідних координат об'єкта від заданих значень та зміни сигналів керування. При відомих динамічних характеристиках об'єкта, приводів, вимірювачів, збурень та завад рівень якості керування рухом визначається структурою та параметрами регулятора, які мають бути знайдені так, щоб забезпечити екстремум такого критерію якості. Такий підхід визначає ефективний шлях та необхідні організаційні дії, втілення яких у виробництво забезпечить можливість створення гарантовано конкурентоздатної системи керування (стабілізації) будь-яким складним динамічним об'єктом за даними натурних досліджень його прототипу або дослідного зразка.

## Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Аналіз результатів досліджень [1, 3-6], показав, що найбільш ефективний шлях вирішення проблемних питань, полягає у застосуванні ідеї досягнення найвищих рубежів якості слідування рухомих об'єктів у заданій конфігурації по траєкторії за рахунок впровадження результатів динамічного проектування [1] оптимальних багатовимірних систем стохастичної стабілізації на основі моделей динаміки об'єкта керування і зовнішніх впливів, що встановлені за даними натурних випробувань його прототипу або дослідного зразка.

В той же час, впровадження даної технології вимагає постановки та формулювання проблеми максимізації якості відтворення руху робочої поверхні платформи Стюарта у термінах багатовимірної стохастичної стабілізації рухомих об'єктів (у тому числі нестійких), а також потребує наявності:

- методів та засобів планування, збору і попередньої обробки інформації про натурні випробування об'єкта;
- методів і алгоритмів структурної ідентифікації і синтезу оптимальних багатовимірних систем стохастичної стабілізації рухомих об'єктів з довільністю у динаміці;
- процедур аналізу якості багатовимірних замкнених систем керування.

В роботах [7, 8] обґрунтовані нові методи та алгоритми обробки, пригнічення, фільтрації та оцінювання, які дозволяють відокремити вектор корисних сигналів вимірювача на фоні завад від випадкових електромагнітних наводок з корекцією за шумом та без неї.

В результаті проведених досліджень [9] формалізовано задачу ідентифікації моделі динаміки багатовимірного рухомого об'єкта на прикладі дослідного зразка верстата на основі платформи Стюарта. Результати включають ідентифікацію динамічної моделі платформи Стюарта, її передатної функції та передатної функції формуючого фільтра та верифікація результатів ідентифікації яка підтверджує достатню точність отриманих моделей. Обґрунтований алгоритм ідентифікації дозволяє знаходити порядок та параметри лінеаризованої системи звичайних диференціальних рівнянь багатовимірного об'єкта та матриці спектральних щільностей збурень, які діють на нього в умовах роботи наближених до реального режиму функціонування дослідного зразка об'єкту.

У роботі [10] виконано синтез оптимальної структури та параметрів багатовимірної слідувальної системи керування рухом робочої поверхні (РП) платформи Стюарта з врахуванням багатовимірної моделі динаміки як самого об'єкта, його базових частин, контрольованих і неконтрольованих збурюючих факторів, що діють на нього в умовах експлуатації, наближених до реального режиму роботи. визначено структуру та параметри головного регулятора системи керування рухом РП платформи Стюарта, підключення якого до ланцюга зворотного зв'язку забезпечує стійкість замкнутої системи керування.

## Мета та завдання дослідження

Таким чином, з зазначених вище складових постановки та формулювання проблеми максимізації якості відтворення руху робочої поверхні платформи Стюарта залишається обґрунтування процедури аналізу якості багатовимірних замкнених систем керування, що є метою даної роботи.

### 1. Показники якості системи керування при стохастичних, детермінованих впливах

На підставі проведеного дослідження [10] була запропонована системи керування рухом РП платформи Стюарта. Зазначена система керування повинна забезпечити слідування центру мас робочої поверхні платформи



Стюарта, по заданій траєкторії з мінімальними відхиленнями від бажаних значень  $r_0$  кутових і лінійних координат, що утворюють вектор  $x_l$ .

Ефективність керування рухом РП платформи Стюарта визначається головним чином імовірністю знаходження вектору відхилень (помилки)  $\varepsilon_x$  фактичної траєкторії рухомої робочої поверхні від програмної у полі допусків:

$$\varepsilon_x(t) = r_0(t) - x_1(t).$$

Очевидно, що рух реальної системи відрізняється від руху „ідеальної”, оскільки у сигналах „вхід-вихід” реальної системи присутні завади, а динаміка замкнутої системи „об’єкт-регулятор” є відмінною від бажаної.

Будемо вважати, що вектор помилок системи керування складається з детермінованої помилки

$$\bar{\varepsilon}_x(t) = \langle \varepsilon(t) \rangle$$

де „ $\langle \rangle$ ” – знак математичного очікування. При цьому вектор сигналів керування також має детерміновану складову

$$\bar{u}(t) = \langle u(t) \rangle$$

Коли визначальне значення для оцінки якості системи керування має детермінована складова, то показником якості, виступає сума певним чином зважених інтегральних квадратичних показників [11] виду

$$I = I_\varepsilon + I_u, \tag{1}$$

де  $I_\varepsilon$  – визначеним чином зважена сума інтегральних квадратичних помилок підтримки положення РП платформи Стюарта на програмній траєкторії

$$I_\varepsilon = \int_0^\infty \bar{\varepsilon}_x'(t) R(t) \bar{\varepsilon}_x(t) dt, \tag{2}$$

$I_u$  – визначеним чином зважена сума інтегральних квадратичних значень вектору керування, яка характеризує потужність необхідну для керування

$$I_u = \int_0^\infty \bar{u}'(t) C(t) \bar{u}(t) dt, \tag{3}$$

де „/” – знак транспонування вектора [12];

$R(t)$  – позитивно визначена вагова симетрична матриця;

$C(t)$  – ненегативно визначена вагова симетрична матриця.

Частотний образ критерію якості (1), отриманий у результаті застосування до виразів (2), (3) теореми Парсеваля, представляється у вигляді

$$I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} tr[\bar{\varepsilon}_x(s) \bar{\varepsilon}_x^*(s) R(s) + u(s) u^*(s) C(s)] ds, \tag{4}$$

де  $j$  – комплексна одиниця;

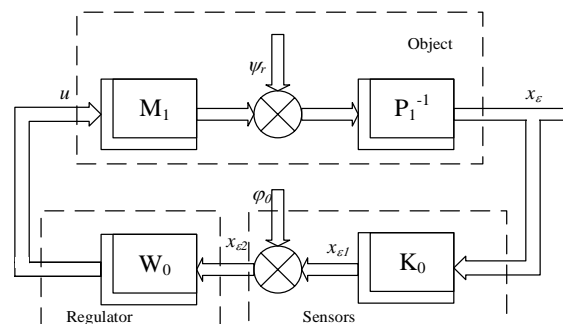
$tr$  – слід матриці [12];

$\varepsilon_x(s)$ ,  $u(s)$ ,  $R(s)$ ,  $C(s)$  – Фур’є – образи відповідних векторів та матриць.

Таким чином, визначені принципи вибору та алгоритми розрахунку показників якості системи керування рухом РП платформи Стюарта в умовах функціонування - при домінуванні детермінованих складових корисних сигналів, збурень та завад.

## 2. Алгоритм аналізу якості стабілізації при детермінованих впливах

Задача аналізу якості системи керування рухом РП платформи Стюарта при детермінованих впливах, структура якої відноситься до множини структур, представлених на рисунках 1, 2 та 3, в конкретних умовах її функціонування полягає у визначенні вихідних реакцій та сигналів керування еквівалентної системи стабілізації



**Рис. 1 – Структурна схема багатовимірної системи стабілізації**  
**Fig. 1 – Structural diagram of the multidimensional stabilization system**

при заданих вхідних корисних сигналах, завадах та шумах, порівнянні отриманих вихідних сигналів з бажаними, обчисленні помилки системи керування і одержанні на її основі показника якості системи.





де  $F_x^\psi$  – матриця передаточних функцій замкнутої системи „об’єкт-регулятор” від вектора збурень до вектора вихідних координат системи, яка має наступний вигляд

$$F_x^\psi = (P_1 - M_1 W_0 K_0)^{-1}, \quad (10)$$

$F_x^\phi$  – дробово-раціональна матриця передаточних функцій еквівалентної системи стабілізації від вектора шумів вимірювання до вектора вихідних координат, яка пов’язана з вихідними даними для аналізу за допомогою наступного виразу

$$F_x^\phi = (P_1 - M_1 W_0 K_0)^{-1} M_1 W_0 = (F_x^\psi P_1 - E_n) K_0^{-1}. \quad (11)$$

Після підстановки виразу (9) до рівняння (6) з урахуванням співвідношень (10), (11) вектор сигналів керування визначається як

$$u = F_u^\psi \psi_r + F_u^\phi \phi_0, \quad (12)$$

де  $F_u^\psi$  – матриця передаточних функцій еквівалентної системи стабілізації від вектору збурень до вектору сигналів керування

$$F_u^\psi = W_0 K_0 (P_1 - M_1 W_0 K_0)^{-1}, \quad (13)$$

$F_u^\phi$  – матриця передаточних функцій системи від вектору шумів вимірювання до вектору сигналів керування

$$F_u^\phi = W_0 K_0 (P_1 - M_1 W_0 K_0)^{-1} M_1 W_0 + W_0 = F_u^\psi P_1 K_0^{-1}. \quad (14)$$

Рівняння (9), (12) визначають реакцію багатовимірної системи на вектори вхідних сигналів  $\psi_r$  та  $\phi_0$ . Якщо вихідна система відноситься до систем стабілізації (рис. 1), то вектор програмних сигналів  $r_0$  дорівнює нулю, а помилка стабілізації  $\varepsilon$  визначається з рівняння

$$\varepsilon_x = x_\varepsilon,$$

тому показник якості стабілізації (4) набуває вигляду

$$I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \left( F_x^\psi \psi_r \psi_r^* F_x^{\psi*} R + F_x^\psi \psi_r \phi_0^* F_x^{\phi*} R + F_x^\phi \phi_0 \psi_r^* F_x^{\psi*} R + F_x^\phi \phi_0 \phi_0^* F_x^{\phi*} R + \right. \\ \left. + F_u^\psi \psi_r \psi_r^* F_u^{\psi*} C + F_u^\psi \psi_r \phi_0^* F_u^{\phi*} C + F_u^\phi \phi_0 \psi_r^* F_u^{\psi*} C + F_u^\phi \phi_0 \phi_0^* F_u^{\phi*} C \right) ds. \quad (15)$$

В разі коли аналізується якість слідкуючої системи (рис. 2), то в алгоритмах (9)-(14) необхідно прийняти, що матриця передаточних функцій  $K_0 = E_{2n}$ . Якщо бажане перетворення програмного сигналу задане матрицею передаточних функцій  $\Phi$ , то вектор помилки слідкуючої системи дорівнює

$$\varepsilon_x = [E_n \quad -\Phi] K_0^{-1} x_{\varepsilon_2}.$$

Отже, показник якості еквівалентної системи стабілізації (4), з урахуванням виразів перетворення (5) та властивостей операції знаходження сліду матриці, перетворюється на наступний

$$I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \left( F_x^\psi \psi_r \psi_r^* F_x^{\psi*} R_1 + F_x^\psi \psi_r \phi_0^* F_x^{\phi*} R_1 + F_x^\phi \phi_0 \psi_r^* F_x^{\psi*} R_1 + F_x^\phi \phi_0 \phi_0^* F_x^{\phi*} R_1 + \right. \\ \left. + F_u^\psi \psi_r \psi_r^* F_u^{\psi*} C + F_u^\psi \psi_r \phi_0^* F_u^{\phi*} C + F_u^\phi \phi_0 \psi_r^* F_u^{\psi*} C + F_u^\phi \phi_0 \phi_0^* F_u^{\phi*} C \right) ds, \quad (16)$$

де вагова матриця  $R_1$  знаходиться за формулою

$$R_1 = (K_0^{-1}) \begin{bmatrix} E_n \\ -\Phi_* \end{bmatrix} R [E_n \quad -\Phi] K_0^{-1}.$$

При аналізі якості двоконтурної системи (рис. 3), яка функціонує в умовах дії детермінованих корисних сигналів, збурень та завад, у алгоритмах (9)-(14) необхідно здійснити заміну матриці передаточних функцій  $K_0$  на одиничну матрицю  $E_{2n}$  ( $n$  – розмір вектора вихідних координат об’єкта керування). Показник якості еквівалентної системи стабілізації, отриманий з рівняння (4) при векторі помилок керування, знайденому за формулою

$$\varepsilon_x = [(E_n \quad O_n) - \Phi(E_n \quad E_n)] K_0^{-1} x_{\varepsilon_2},$$

визначається як

$$I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \left( F_x^\psi \psi_r \psi_r^* F_x^{\psi*} R_{10} + F_x^\psi \psi_r \phi_0^* F_x^{\phi*} R_{10} + F_x^\phi \phi_0 \psi_r^* F_x^{\psi*} R_{10} + F_x^\phi \phi_0 \phi_0^* F_x^{\phi*} R_{10} + \right. \\ \left. + F_u^\psi \psi_r \psi_r^* F_u^{\psi*} C + F_u^\psi \psi_r \phi_0^* F_u^{\phi*} C + F_u^\phi \phi_0 \psi_r^* F_u^{\psi*} C + F_u^\phi \phi_0 \phi_0^* F_u^{\phi*} C \right) ds, \quad (17)$$

де вагова матриця  $R_{10}$  знаходиться за формулою

$$R_{10} = (K_0^{-1}) \left[ \begin{pmatrix} E_n \\ O_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} E_n \\ E_n \end{pmatrix} \Phi_* \right] R [(E_n \quad O_n) - \Phi(E_n \quad E_n)] (K_0^{-1}).$$

**Висновки.** Таким чином, отримані алгоритми вирішення задачі аналізу якості системи керування рухом РП платформи Стюарта для еквівалентної системи стабілізації (15), одноконтурної (16) та двоконтурної



слідкувальної системи керування (17), на основі даних про моделі динаміки усіх елементів, які складають систему керування, та векторів корисних сигналів, збурень та завад, що діють у контурах керування і мають детермінований характер.

#### Перелік використаних джерел

1. Azarskov V.N. Metodolohiya konstruirovaniya optimal'nykh sistem stokhasticheskoy stabilizatsii: Monografiya / V.N. Azarskov, L.N. Blokhin, L.S. Zhitetskiy / Pod red. Blokhina L.N. – K.: Knizhnoe izdatel'stvo NAU, 2006. – 440s. – Bibliohr.: s.416-428
2. Merlet, J.-P., *Parallel Robots*, Springer, 2nd edition, 2006. 394 p. DOI: 10.1007/1-4020-4133-0
3. Александров Є.Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами: Навч. посібник: у 4 т. –Т.2:Автоматичне керування рухом літальних апаратів/ Є.Є. Александров, Е.П. Козлов, Б.І. Кузнецов; за заг.ред. Є.Є.Алаксандрова - Харків: НТУ"ХПІ", 2006.-528с.
4. Статистична динаміка систем управління: підручник / Л.М. Блохін, М.Ю. Буриченко, Н.В. Білак [та ін.]. – К.: НАУ. 2014. – 300с.
5. Kvakernaak H. *Linear optimal control systems*/H.Kvakernaak, R.Sivan.-New York: John Wiley&Son Inc., 1972.-575p.
6. Optimizatsiya lineynykh invariantnykh vo vremeni sistem upravleniya: (monografiya) /F.A. Aliev, V.B. Larin, K.I. Naumenko, V.N. Sunsev; In-t matematiki AN USSR.- K.: Nauk. dumka, 1978.- 327s. – Bibliohr.: s. 320-324.
7. Optimal Filtering of Hexapod Acceleration Data Obtained Under Action of Electromagnetic Interference / Osadchy S. I., Zozulya V. A. // Proceedings of the IEEE 3rd International Conference “Methods and Systems of Navigation and Motion Control” (MSNMC). Kyiv: KHAU. – 2014. – С. 21-23. DOI: 10.1109/MSNMC.2014.6979719
8. Optimal suppression of an electromagnetic interference effect on an acceleration measuring device /S.I. Osadchy, V.A. Zozulya // Electronics and control systems.- №4(42) – Kyiv: NAU, 20014.pp. 25-29. DOI: 10.18372/1990-5548.42.8799
9. Stewart platform dynamics model identification / [V. A. Zozulya, S.I. Osadchy, S. N. Nedilko] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2024. - № 1 P. 242–255. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-1-22
10. Stewart platform multidimensional tracking control system synthesis / [V. A. Zozulya, S.I. Osadchy] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2024. - № 3 P. 1–14.
11. Analiz i upravlenie bol'shimi kosmicheskimi konstruksiyami: (Monografiya) / M.Z. Zhurovskiy, P.I. Bidyuk; NTUU «KPI».- K.: Naukova dumka, 1997.- 451s.
12. Horn R. A. *Matrix Analysis* / R. A. Horn, C. R. Johnson - Cambridge University Press (2nd ed.), 2012. - 643 p. DOI: 10.1017/CBO9781139020411

#### References

- [1].Azarskov V.N., Blokhin L.N., Zhitetskiy L.S. Metodolohiya konstruirovaniya optimal'nykh sistem stokhasticheskoy stabilizatsii: Monografiya. K.: Knizhnoye izdatel'stvo NAU, 2006. – 437s.
- [2].Merlet, J.-P., *Parallel Robots*, Springer, 2nd edition, 2006. 394 p. DOI: 10.1007/1-4020-4133-0
- [3].Aleksandrov YE.YE. Avtomatychne keruvannya rukhomymy ob'yektamy i tekhnolohichnymy protsesamy: Navch. posibnyk: u 4 t. –Т.2:Автоматичне керування рухом літальних апаратів/ YE.YE. Aleksandrov, E.P. Kozlov, B.I. Kuznyetsov; za zah.red. YE.YE.Alaksandrova - Kharkiv: NTU"KHPI", 2006.-528s.
- [4].Statistichna dinamika sistem upravlinnja: pidruchnik / L.M. Blohin, M.Ju. Burichenko, N.V. Bilak [ta in.]. – K.: NAU. 2014. – 300s.
- [5].Kvakernaak H. *Linear optimal control systems* / H. Kvakernaak, R. Sivan. - New York: John Wiley & Son Inc., 1972. - 575 p.
- [6].Optimizacija linejnyh invariantnyh vo vremeni sistem upravlenija: (monografija) /F.A. Aliev, V.B. Larin, K.I. Naumenko, V.N. Sunsev; In-t matematiki AN USSR.- K.: Nauk. dumka, 1978.- 327s.
- [7].Optimal Filtering of Hexapod Acceleration Data Obtained Under Action of Electromagnetic Interference / Osadchy S. I., Zozulya V. A. // Proceedings of the IEEE 3rd International Conference “Methods and Systems of Navigation and Motion Control” (MSNMC). Kyiv: KHAU. – 2014. – С. 21-23. DOI: 10.1109/MSNMC.2014.6979719
- [8].Optimal suppression of an electromagnetic interference effect on an acceleration measuring device /S.I. Osadchy, V.A. Zozulya // Electronics and control systems.- №4(42) – Kyiv:NAU, 20014.pp. 25-29. DOI: 10.18372/1990-5548.42.8799
- [9].Stewart platform dynamics model identification / [V. A. Zozulya, S.I. Osadchy, S. N. Nedilko] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2024. - № 1 P. 242–255. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-1-22
- [10]. Stewart platform multidimensional tracking control system synthesis / [V. A. Zozulya, S.I. Osadchy] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2024. - № 3 P. 1–14.
- [11]. Analiz i upravleniye bol'shimi kosmicheskimi konstruksiyami: (Monografiya) / M.Z. Zgurovskiy, P.I. Bidyuk; NTUU «KPI».- K.: Naukova dumka, 1997.- 451s
- [12]. Horn R. A. *Matrix Analysis* / R. A. Horn, C. R. Johnson - Cambridge University Press (2nd ed.), 2012. - 643 p. DOI: 10.1017/CBO9781139020411

Отримана в редакції 26.07.2024. Прийнята до друку 17.08.2024. Received 26 July 2023. Approved 17 August 2024. Available in Internet 23 October 2024