



УДК 681.513;62.505;621.9.04

# ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ШТАНГИ ПЛАТФОРМИ СТЮАРТА

Зозуля В.А.<sup>1</sup>, Осадчий С.І.<sup>2</sup>, Каліч В.М.<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup>Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна<sup>1</sup>к.т.н., доцент, <sup>2</sup>д.т.н., проф., <sup>3</sup>к.т.н., проф.ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-3793-4686>, <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-1811-3594>, <sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-9907-5496>E-mail: <sup>1</sup>[irish38@ukr.net](mailto:irish38@ukr.net), <sup>2</sup>[srg2005@ukr.net](mailto:srg2005@ukr.net), <sup>3</sup>[vmk041954@gmail.com](mailto:vmk041954@gmail.com)

Copyright © 2021 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.v13i4.2200

**Анотація.** Метою даної статті є розробка зручної інформаційної технології ідентифікації моделі динаміки багатовимірного рухомого об'єкта та збурень, що діють на нього під час функціонування, за даними векторів сигналів керування та сигналів на виході об'єкта, направленої на підвищення надійності отримання результатів обчислення. Для створення інформаційної технології ідентифікації використано прикладне середовище Stateflow Matlab. Відмінною рисою інформаційної технології є підвищена точність та надійність виконання обчислень, які досягнуті за рахунок впровадження нового підходу до процесів факторизації поліноміальних матриць, удосконалення алгоритмів множення поліноміальних, дробово-раціональних матриць відповідно для зменшення втрати вірних значущих цифр за рахунок впорядкування і ранжирування елементарних операндів та для зменшення зростання порядків результатів на основі використання операцій видалення відповідних полюсів праворуч та ліворуч та вводу відповідних нулів праворуч та ліворуч. При виконанні дослідження було створено програмно-технічну систему збору експериментальних даних, для ідентифікації моделі динаміки штанги, що використовуються в платформі Стюарта, на основі LabVIEW з використанням модулів FPGA, SoftMotion та Real-Time. Також, в роботі була проведена ідентифікація моделі динаміки штанги платформи Стюарта та визначена її передаточна функція, а також передаточна функція формуючого фільтра, який при вхідному сигналі у вигляді білого шуму має на виході випадковий процес з заданими статичними характеристиками.

**Abstract.** The purpose of this article is to develop convenient information technology for identifying the model of the dynamics of a multidimensional moving object and disturbances acting on it during operation, according to the vectors of control signals and signals at the output of the object, aimed at increasing the reliability of the calculation results. The Stateflow Matlab application environment was used to create an information technology for identification. A distinctive feature of information technology is the increased accuracy and reliability of computations, which have been achieved through the introduction of a new approach to the processes of factorization of polynomial matrices, improvement of algorithms for multiplication of polynomial, fractional-rational matrices, accordingly, to reduce the loss of significant digits due to ordering and ranking of elementary operands and to reduce the growth of orders of results by using the operations of removing the corresponding poles from the right and left and entering the corresponding zeros on the right and left. During the study, a software and hardware system for collecting experimental data was created to identify the model of the rod dynamics used in the Stewart platform based on LabVIEW using FPGA, SoftMotion, and Real-Time modules. Also in the work, the identification of the model of the dynamics of the rod of the Stewart platform was carried out and its transfer function was determined, as well as the transfer function of the shaping filter, which, with an input signal in the form of white noise, has a random process at the output with specified static characteristics.

**Ключові слова:** системи, керування, об'єкт, ідентифікація, штанга, платформа Стюарта, ІТ**Keywords:** system, control, object, identification, rod, Stewart platform, IT

## Вступ.

Створення гарантовано конкурентоспроможних систем стабілізації руху складних багатовимірних рухомих об'єктів, які функціонують в умовах дії випадкових 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 авіаційної та космічної техніки шляхів виконання такої умови є застосування експериментально-аналітичного підходу до проектування оптимальних систем



стохастичної стабілізації.

Один із факторів успішного застосування такого підходу визначається з одного боку відповідністю алгоритмів ідентифікації структури та параметрів моделі в умовах наближених до реального режиму функціонування дослідного зразка об'єкту, а з іншого - наявністю системи комп'ютерної математики, що дозволяє застосувати алгоритми для автоматизованого проектування оптимальних систем автоматичного керування.

#### Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Сьогодні відоме досить широке коло методів ідентифікації моделей динаміки об'єктів керування, які функціонують в умовах дії неконтрольованих центрованих стаціонарних випадкових впливів [1 - 3], за даними «вхід-вихід». Однак, використання відомих методів структурної ідентифікації в САПР обмежено за рахунок підвищеної обчислювальної складності, яка виникає при виконанні математичних операцій з поліноміальними та дробно-раціональними матрицями комплексного аргументу та проявляється у зменшенні надійності одержання результату [4, 5].

В таких умовах коло методів ідентифікації значно звужується. Наприклад, у статті [6] представлений алгоритми ідентифікації динаміки елементів багатовимірної системи стабілізації, де стверджується, що в умовах, коли сигнали в контурі керування належать до множини центрованих стаціонарних випадкових процесів, а шум датчиків має різні джерела походження зі збуреннями на систему, то можна однозначно визначити матриці дробово-раціональних функцій формувача збурення та знайти систему звичайних диференціальних рівнянь мінімального порядку, яка характеризує динаміку об'єкта керування. У той же час відсутні інформаційні технології ідентифікації для оцінки динаміки об'єктів керування, які б допомогли в вирішенні проблеми складності виконання таких розрахунків.

#### Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розробка зручної інформаційної технології ідентифікації моделі динаміки багатовимірного рухомого об'єкта та збурень, що діють на нього під час функціонування, за даними векторів сигналів керування та сигналів на виході об'єкту, направленої на підвищення надійності отримання результатів обчислення.

Для досягнення цієї мети згідно роботи [1] було поставлено та розв'язане завдання побудови алгоритму підготовки до розв'язання задачі ідентифікації та її інформаційної технології.

У термінах роботи [1], нехай на вході об'єкта керування діють  $m$ -вимірний вектор сигналів керування  $u_0$  та  $p$ -вимірний вектор білого шуму одиночної інтенсивності  $\Delta$ . На виході об'єкта діє  $n$ -вимірний вектор сигналів виходу  $x_1$  (рис.1).

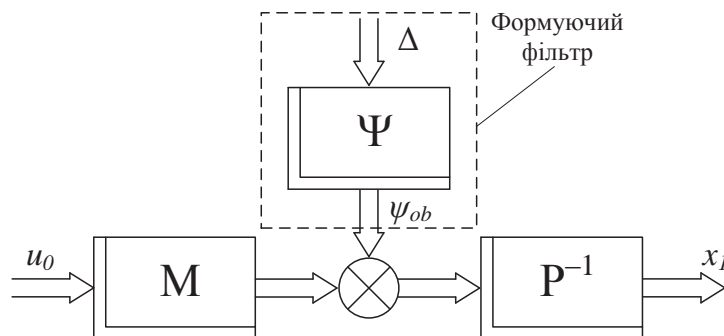


Рис. – Структурна схема об'єкта ідентифікації:

$P, M$  - поліноміальні матриці від оператора диференціювання  $s$  відповідного розміру,  $\psi_{ob}$  – вектор центрованих стаціонарних випадкових збурень

Fig. 1 – Block diagram of the identification object

Вважається, що вектор збурень  $\psi_{ob}$  може бути зображений як:

$$\psi_{ob} = \Psi \Delta,$$

де  $\Psi$  – шукана матриця розмірності  $n \times n$ , елементи якої – оператори функції від  $s$ . Вектор  $\psi_{ob}$  формується з вектора шумів  $\Delta$  лінійним стійким фільтром з матрицею передаточних функцій  $\Psi$ . Також, вектори корисних сигналів і збурень являють собою багатовимірні стаціонарні випадкові процеси з нульовими математичними сподіваннями і дробово-раціональними матрицями спектральних і взаємних спектральних щільностей  $S_{x_1 x_1}, S_{u_0 u_0}, S_{x_1 u_0}, S_{u_0 x_1}$ , які вже отримані за даними випробувань.

Задача отримання динамічних характеристик багатовимірного рухомого об'єкта і вектора збурень, полягає у наступному: за даними вимірюваних вхідного  $u_0$  і вихідного векторів  $x_1$  необхідно вибрати блокову матрицю-рядок передаточних функцій  $\Phi$  так, щоб вона мінімізувала показник якості ідентифікації:

$$J = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr}(S'_{\varepsilon\varepsilon} R) ds,$$

де  $S'_{\varepsilon\varepsilon}$  - транспонована матриця спектральних щільностей вектору похибок ідентифікації  $\varepsilon$ ;  $R$  – симетрична додатково визначена вагова матриця.

**1. Методи та матеріали досліджень**

Алгоритм підготовки до розв'язання задачі ідентифікації моделі динаміки багатовимірного рухомого об'єкта, складається з виконання наступних етапів:

1. Введення системи звичайних диференціальних рівнянь, що характеризує динаміку об'єкта керування:

$$P x_1 = M u_0 + \psi_{0\phi}, \quad (1)$$

2. Введення вектору похибок ідентифікації  $\varepsilon$ , який дорівнює

$$\varepsilon = x_1 - \Phi \zeta; \quad (2)$$

де  $\Phi$  – блочна матриця передаточних функцій об'єкта ідентифікації від розширеного вектору вхідних сигналів  $\zeta = \begin{bmatrix} u_0 \\ \Delta \end{bmatrix}$ .

3. Знаходження зв'язку транспонованої матриці спектральних щільностей похибок ідентифікації  $S'_{\varepsilon\varepsilon}$  з блочною матрицею  $\Phi$ , на основі теореми Вінера-Хінчина у векторній формі [7], застосованої до вектору (2):

$$S'_{\varepsilon\varepsilon} = S'_{x_1x_1} - S'_{\zeta\zeta} \Phi^* - \Phi S'_{x_1\zeta} + \Phi S'_{\zeta\zeta} \Phi^*, \quad (3)$$

де  $S'_{x_1x_1}$  – транспонована матриця спектральних щільностей випадкового процесу  $x_1$ ;  $S'_{\zeta\zeta}$  – транспонована матриця взаємних спектральних щільностей між векторними випадковими процесами  $\zeta$  та  $x_1$ ;

$$S'_{\zeta\zeta} = \begin{bmatrix} S_{u_0u_0} & 0 \\ 0 & S_{\Delta\Delta} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$S'_{\zeta x_1} = (S'_{u_0x_1}, S'_{\Delta x_1}). \quad (5)$$

4. Визначення матриці взаємних спектральних щільностей  $S_{\Delta x_1}$  через вихідні дані. Для цього, враховуючи матриці  $S'_{\zeta x_1}$ ,  $S'_{\zeta\zeta}$  та проводячи деякі перетворення, отримуємо рівняння зв'язку

$$S_{x_1\Delta} S_{\Delta\Delta}^{-1} S_{\Delta x_1} = S_{x_1x_1} - S_{x_1u_0} S_{u_0u_0}^{-1} S_{u_0x_1}.$$

Для відшукування функції  $S_{\Delta x_1}$  необхідно факторизувати матрицю  $S_{x_1\Delta} S_{\Delta\Delta}^{-1} S_{\Delta x_1}$ , урахувавши специфіку вектора  $\Delta$  як вектора одиничних білих шумів [8].

5. Визначення першої варіації функціоналу якості ідентифікації  $\delta J$ , при умові мінімізації на класі стійкої та фізично реалізованої матриці  $\Phi$ ;

$$\delta J = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \left[ R_{0*} \left( -R_0 S'_{\zeta\zeta} D_*^{-1} + R_0 \Phi D \right) D_* \delta \Phi_* + R_0 \left( -S'_{x_1\zeta} R_0 D^{-1} + S'_{\zeta\zeta} \Phi_* R_{0*} D_* \right) \delta \Phi D \right] ds, \quad (6)$$

де  $\delta J$ ,  $\delta \Phi$  – варіації відповідних функцій;  $R_0$  – результат факторизації матриці  $R$ ,  $R = R_0 R_{0*}$ .

6. Визначення комплексної змінної матриці  $D$ , як результат вінеровської факторизації:

$$D D_* = S'_{\zeta\zeta}. \quad (7)$$

7. Розрахунок  $T_0 + T_+$  в результаті сепарації:

$$T = T_0 + T_+ + T_- = S'_{\zeta\zeta} D_*^{-1}. \quad (8)$$

де  $T_0$  – елементи матриці полінома  $s$ ;  $T_+$  – елементи матриці, правильні дроби з полюсами тільки в лівій півплощині.

8. Обчислення блоків матриці  $\Phi$  (оптимальні структури матриць передатних функцій об'єкта ідентифікації  $\Phi_{11}$  і фільтра  $\Psi$ , який формує динамічні характеристики збурення, приведеного до виходу системи -  $\Phi_{12}$ ):

$$\Phi = [\Phi_{11} \quad \Phi_{12}] = R_0^{-1} [T_0 + T_+] D^{-1}. \quad (9)$$

9. Визначення динамічних властивостей матриці  $P$  застосовуючи операцію однобічного видалення полюсів матриць  $\Phi_{11}$  і  $\Phi_{12}$ , після цього знаходиться матриця  $M$ :

$$M = \check{P} \Phi_{11}, \quad (10)$$

10. Обчислення матриці спектральних щільностей збурюючого впливу:

$$S'_{\psi\psi} = \check{P} \Phi_{11} \Phi_{21} \check{P}^*. \quad (11)$$

Обґрунтований вище алгоритм дозволяє запропонувати інформаційну технологію ідентифікації моделі динаміки багатовимірного рухомого об'єкта, до складу якої повинні входити процедури додавання та множення поліноміальних та дробово – раціональних матриць, вінеровської факторизації, вінеровської сепарації дробово – раціональних матриць, знаходження дисперсійних інтегралів.

Для створення інформаційної технології ідентифікації використано прикладне середовище Stateflow Matlab, яка показала високу ефективність [9] при вирішенні задач проектування багатовимірних систем автоматичного керування. Stateflow є інтерактивним інструментом розробки в області моделювання складних, керованих подіями систем, що характеризуються складною поведінкою. Програмний засіб Stateflow є розширенням системи Matlab Simulink та забезпечує можливість формування кінцевих автоматів шляхом побудови ієрархічних моделей у вигляді підсистем.



В системі Stateflow створена відповідна діаграма потоків, що реалізує інтерактивний процес ідентифікації моделі динаміки платформи Стюарта (рис. 2).

Блок Ratchet в Stateflow включено в модель системи Simulink.

Відмінною рисою інформаційної технології виконання етапів ідентифікації моделі динаміки багатовимірного рухомого об'єкта є підвищена точність та надійність виконання обчислень, які досягнуті за

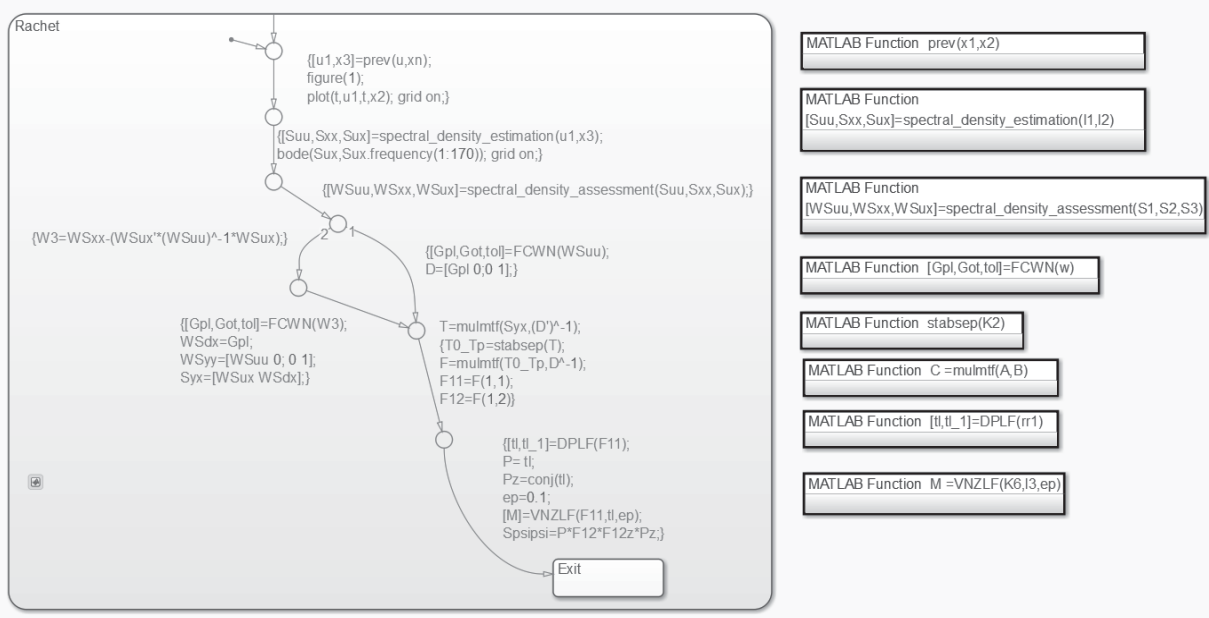


Рис. 2 – Діаграма потоків, яка реалізована в Stateflow

Fig. 2 – Flowchart implemented in Stateflow

рахунок впровадження нового підходу до процесів факторизації поліноміальних матриць (функція FCWN (рис. 2)) та обчислювального алгоритму, побудованого на його основі, удосконалення алгоритмів множення поліноміальних матриць (функція Mulmtf (рис. 2)) з системи розрахунків Stateflow Matlab для зменшення втрати вірних значущих цифр за рахунок відповідного впорядкування і ранжирування елементарних операндів (функція Stabsep (рис. 2)), множення дробово-раціональних матриць (функція Mulmtf (рис. 2)) для зменшення зростання порядків результатів на основі використання операцій видалення відповідних полюсів праворуч та ліворуч (функції DPRT та DPLF (рис. 2)) та вводу відповідних нулів праворуч та ліворуч (функції VNZRT та VNZLF (рис. 2)).

## 2. Динаміка штанги платформи Стюарта за результатами структурної ідентифікації

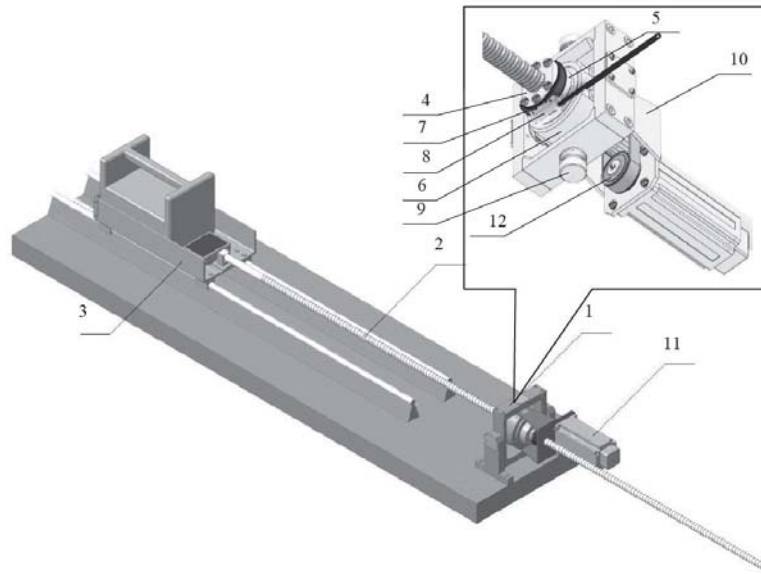
При виконанні дослідження було створено програмно-технічну систему збору експериментальних даних, для ідентифікації моделі динаміки штанги, що використовуються в платформі Стюарта [10].

Штанга платформи Стюарта (рис. 3) прикріплена до столу через карданний підвіс 1 з електродвигуном та кульково-гвинтовою парою (КГП), гвинт 2 якої прикріплено до каретки з навантаженням 3, що встановлена на рейки. Каретка 3 має кулькові передачі, які зменшують тертя ковзання. Гайка 4 КГП жорстко закріплена до порожнистого валу 5, що обертається у підшипниках корпусу 6. На гайку 4 жорстко встановлено магнітне кільце 7 з нанесеними радіально магнітними полюсами довжиною 2 мм, інкрементального магнітного кільцевого енодера LM13 (фірми RLS Merilna Tehnika d.o.o.) [11], в комплекті якого є компактна зчитуюча головка 8. У корпусі 6 запресовані вісі 9, які мають можливість обертатися у голкових підшипниках, розміщених у отворах карданного підвісу 1. Таким чином, карданний підвіс має дві взаємно перпендикулярні осі обертання, які перетинаються у точці, що знаходиться на осі гвинта. До корпусу 6 прикріплений кронштейн 10 з електродвигуном 11, на валу якого закріплений шків 12 зубчато-пасової передачі, яка передає обертання порожнистому валу 5 і гайці 4 гвинтової передачі. В якості електропривода використовується багатофункціональний сервопривод змінного струму серії EP2 з серводвигуном 80ST-M04025 фірми HANGZHOU MIGE ELECTRIC CO., LTD.

Програмно-технічна частина системи збору експериментальних даних була побудована на LabVIEW з використанням модулів FPGA, SoftMotion та Real-Time. В якості апаратної частини було взято персональний комп'ютер з багатофункціональним реконфігурованим пристроєм I/O на базі ПЛІС (FPGA) NI PCI-7833R з Virtex-II 3M Gate FPGA, який приєднується до сервоприводу та енодеру LM13 за допомогою Spring-Screw Terminals - SCB-68.

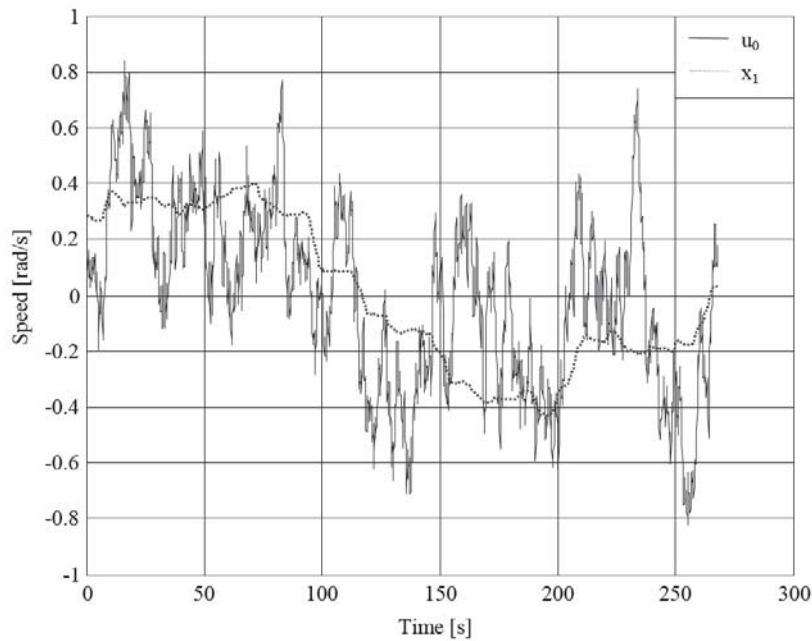
Експеримент був побудований наступним чином, генератор білого шуму з програми в LabVIEW формує вхідний сигнал керування сервоприводу. Діапазон цього сигналу обмежено діапазоном переміщення гвинта КГП.

За допомогою сигналу керування здійснюється рух гвинта КГП з кареткою та навантаженням, а енодер LM13 вимірює обертання гайки КГП (тобто переміщення гвинта КГП) та передає інформацію до програми в LabVIEW. В результаті отримано два масиви точок вхідного сигналу та реакції штанги платформи Стюарта на цей сигнал, які були введені в програму MATLAB. Ці сигнали є вхідними параметрами блоку Ratchet в Stateflow.



**Рис. 3 – Дослідний зразок штанги платформи Стюарта**  
**Fig. 3 – Stewart platform rod prototype**

Після попередньої обробки (функція prev (рис. 2)) сигнали керування та реакції представлені на рисунку 4.



**Рис. 4 – Значення вхідного та вихідних сигналів системи**  
**Fig. 4 – The value of input and output signals of the system**

Далі за допомогою функції spectral\_density\_estimation (рис. 2) було визначено: спектральна щільність вхідного сигналу  $S_{u_0 u_0}$  за:

$$S_{u_0 u_0} = \frac{-0.016231}{(s + 0.2)(s - 0.2)};$$

спектральна щільність вихідного сигналу  $S_{x_1 x_1}$  :

$$S_{x_1 x_1} = \frac{4.7258 \cdot 10^{-8} (s + 0.1)(s - 0.1)}{(s - 0.4)(s + 0.4)(s + 0.2)(s - 0.2)};$$

взаємна спектральна щільність сигналу  $S_{u_0 x_1}$

$$S_{u_0 x_1} = \frac{-2.769 \cdot 10^{-5}}{(s + 0.04)(s + 0.2)(s - 0.2)}$$

яка має вигляд (рис. 5).

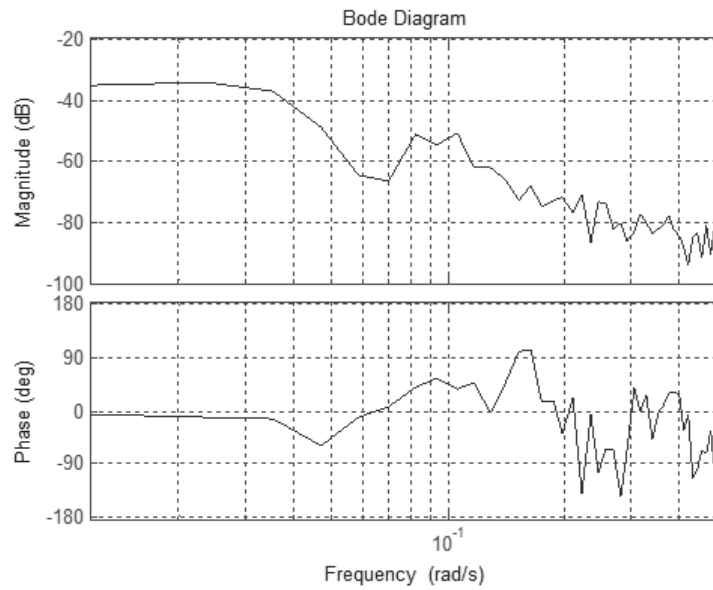


Рис. 5 – Взаємна спектральна щільність сигналу  $S_{u_0x_1}$   
 Fig. 5 – Mutual spectral signal density  $S_{u_0x_1}$

Завдяки процедурі spectral\_density\_assessment (рис. 2) були визначені оцінки цих щільностей.

Згідно 3-го пункту алгоритму ідентифікації (4) та відповідних потоків в блоці Ratchet в Stateflow, з використанням вінеровської факторизації поліноміальних матриць (функція FCWN (рис. 2)) при  $S_{\Delta\Delta} = 1$ , підставивши спектральну щільність вхідного сигналу  $S_{u_0u_0}$  отримуємо:

$$S'_{\xi\xi} = \begin{bmatrix} -0.016231 & 0 \\ (s+0.2)(s-0.2) & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Згідно 4-го пункту алгоритму ідентифікації, провівши факторизацію матриці  $S_{x_1\Delta} S_{\Delta\Delta}^{-1} S_{\Delta x_1}$ , за допомогою функції FCWN (рис. 2), отримали:

$$S'_{\Delta x_1} = \frac{0.00021739s}{(s+0.004)(s+0.02)}$$

Після цього, підставляється  $S'_{\Delta x_1}$  та  $S'_{u_0x_1}$  в (5) та отримується:

$$S'_{\xi x_1} = \begin{bmatrix} -2.769 \cdot 10^{-5} & 0.00021739s \\ (s+0.04)(s+0.2)(s-0.2) & (s+0.02)(s+0.004) \end{bmatrix}$$

Згідно 6-го пункту алгоритму ідентифікації, виконавши факторизацію матриці  $S'_{u_0u_0}$ , за допомогою функції FCWN (рис. 2), отримали:

$$D = \begin{bmatrix} d_u & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad d_u = \frac{0.1274}{(s+0.2)}$$

Далі згідно 7-го пункту алгоритму ідентифікації (8), маючи дробно-раціональні матриці  $S'_{\xi x_1}$  та  $D$ , вони перемножуються за допомогою функції Mulmtf (рис. 2), а після цього виконується вінеровська сепарація (функція Stabsep (рис. 2)), в результаті чого отримується матриця:

$$T_0 + T_+ = \begin{bmatrix} 0.00021739 & 0.00021739s \\ (s+0.2)(s+0.04) & (s+0.02)(s+0.004) \end{bmatrix}$$

Вводячи позначення  $R_0=1$ , відповідно до 8-го пункту алгоритму ідентифікації (9), перемноживши дробно-раціональні матриці  $(T_0 + T_+)$  та  $D^{-1}$  за допомогою функції Mulmtf (рис. 2), одержується матриця  $\Phi$ :

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.0017063 & 0.00021739s \\ (s+0.04) & (s+0.02)(s+0.004) \end{bmatrix}$$

де  $\Phi_{11}$  - оптимальна структура матриці передаточної функції об'єкта ідентифікації:

$$\Phi_{11} = \frac{0.0017063}{(s+0.04)}$$

$\Phi_{12}$  - оптимальна структура матриці передаточної функції фільтра, який формує динамічні характеристики збурення,



приведеного до виходу системи:

$$\Phi_{12} = \frac{0.00021739s}{(s + 0.02)(s + 0.004)}$$

Далі згідно 9-го пункту алгоритму ідентифікації, застосовуючи операцію однобічного видалення полюсів матриць  $\Phi_{11}$  і  $\Phi_{12}$ , за допомогою функції DPLF (рис. 2), одержується поліноміальна матриця  $P$ , яка дорівнює:

$$P = (s + 0.04).$$

Після цього знаходиться матриця  $M$ :

$$M = 0.0017063.$$

Відповідно до 10-го пункту алгоритму ідентифікації (11), застосувавши операцію вводу нулів ліворуч за допомогою функції VNZLF (рис. 2), була отримана матриця спектральних щільностей збурюючого впливу:

$$S'_{\psi\psi} = \frac{4.7258 * 10^{-8} s^2 (s + 0.04)(s - 0.04)}{(s + 0.02)(s - 0.02)(s + 0.004)(s - 0.004)}$$

### Висновки

В роботі була проведена ідентифікація моделі динаміки штанги платформи Стюарта та визначена її передаточна функція, а також передаточна функція формуючого фільтра, який при вхідному сигналі у вигляді білого шуму має на виході випадковий процес з заданими статичними характеристиками.

На основі відомих частотних алгоритмів структурної ідентифікації отримано нову інформаційну технологію, яка дозволяють 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'єкта.

Відмінною рисою інформаційної технології виконання етапів ідентифікації моделі динаміки багатовимірного рухомого об'єкта є підвищена точність та надійність виконання обчислень, які досягнуті за рахунок впровадження нового підходу до процесів факторизації поліноміальних матриць та обчислювального алгоритму, побудованого на його основі, удосконалення алгоритмів множення поліноміальних матриць з системи розрахунків Stateflow Matlab для зменшення втрати вірних значущих цифр за рахунок відповідного впорядкування і ранжирування елементарних операндів, множення дробово-раціональних матриць для зменшення зростання порядків результатів на основі використання операцій видалення відповідних полюсів праворуч та ліворуч та вводу відповідних нулів праворуч та ліворуч.

### Перелік використаних джерел

- [1].Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации: Монография / В.Н. Азарсков та ін.; за заг. ред. Блохина Л.Н. К.: Книжное издательство НАУ, 2006. 440с.
- [2].Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2004.640с.
- [3].Технологи конструирования современных конкурентоспособных комплексов управления стохастическим движением объектов: Монография / Л.Н. Блохин, С.И. Осадчий, А.К. Дидык и др. – Кировоград: издатель-Лисенко В.Ф., 2015. 284с.
- [4].Осадчий С.И. Автоматизация динамического проектирования оптимальных багатовимірних робастних систем стохастичної стабілізації. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кировоград, 2010. ч.1 (№40). С.25-34.
- [5].Осадчий С.И. Нерекурсивный комбинированный алгоритм факторизации полиномиальных матриц. Научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология». 2009. №6(63). С. 54-59.
- [6].Osadchy Sergei I., Zozulia Valerii A. Passive identification of multivariable stabilization system elements' dynamics. Automation of Technological and Business Processes. 2020. Vol. 12, Issue 1. pp. 32 – 40. <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1701>
- [7].Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Пер. с англ. И.Г. Абрамовича и др. М.: Наука, 1977. 831с.
- [8].Алиев Ф.А., Бордюг В.А., Ларин В.Б. Временные и частотные методы синтеза оптимальных регуляторов. Баку: Ин-т физики АН Азербайджанской ССР, 1988. 46с.
- [9].Дэбни Дж., Харман Т.Л. Simulink 4. Секреты мастерства. Пер. с англ. М.Л. Симонова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
- [10].Розробка фізичної моделі верстата на основі механізму паралельної структури з системою керування приводами переміщення робочого органа: Звіт по НДДКР Кировоградський національний технічний університет. № ДР 0109U00210, облік. № 0211U005056. – Кировоград, 2011. 176с.
- [11].Брошюра по бесконтактным энкодерам L-9517-9494-01-A. URL: [http://www.koda.ua/download/Brosura\\_Enkodery\\_Renishaw\\_Azyk\\_-\\_russskiy.pdf](http://www.koda.ua/download/Brosura_Enkodery_Renishaw_Azyk_-_russskiy.pdf) (дата звернення: 11.12.2021)

### References

- [1]. Azarskov V.N., Blokhin L.N., Zhitetskiy L.S. Metodologiya konstruirovaniya optimal'nykh sistem stokhasticheskoy stabilizatsii: Monografiya. K.: Knizhnoye izdatel'stvo NAU, 2006. 437s.



- [2]. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik v 5-i tt.; 2-ye izd., pererab. i dop. T.2: Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya / Pod red. K.A. Pupkova and N.D. Egupova. – M.: Izdatel'stvo MGTU im. Bauman, 2004. 640s.
- [3]. Tekhnologi konstruirovaniya sovremennykh konkurentosposobnykh kompleksov upravleniya stokhasticheskim dvizheniyem ob"yektov: Monografiya / L.N. Blokhin, S.I. Osadchyy, A.K. Didyk i dr. – Kirovograd: izdatel'-Lisenko V.F., 2015. 284s.
- [4]. Osadchyy S.I. Avtomatyzatsiya dynamichnoho proektuvannya optymal'nykh bahatovymirnykh robstnykh system stokhastychnoyi stabilizatsiyi. Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya sil's'kohopodars'kykh mashyn: Zahal'noderzhavnyy mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk, vypusk 40. ch.1 - Kirovohrad, 2010. S.25-34.
- [5]. Osadchyy S.I. Nerekursivnyy kombinirovannyi algoritm faktorizatsii polinomial'nykh matrits. Nauchno-tekhnicheskyy zhurnal «Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya» №6(63). 2009. S. 54-59.
- [6]. Osadchy Sergei I., Zozulia Valerii A. Passive identification of multivariable stabilization system elements' dynamics. Automation of Technological and Business Processes. – 2020. Vol. 12, Issue 1. pp. 32 – 40. <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1701>
- [7]. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov). Per. s angl. I.G. Abramovicha i dr. M.: Nauka, 1977. 831s.
- [8]. Aliyev F.A., Bordyug V.A., Larin V.B. Vremennyye i chastotnyye metody sinteza optimal'nykh regulyatorov. Baku: In-t fiziki AN Azerbaydzhansko SSR, 1988. 46s.
- [9]. Debni Dzh., Kharman T.L. Simulink 4. Sekrety masterstva. Per. s ang. M.L. Simonova. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2003. 403 s.
- [10]. Rozrobka fizychnoyi modeli verstata na osnovi mekhanizmu paralel'noyi struktury z systemoyu keruvannya pryvodamy peremishchennya robochoho orhana: Zvit po NDDKR Kirovohrads'kyy natsional'nyy tekhnichnyy universytet. № DR 0109U00210, oblik. № 0211U005056. Kirovohrad, 2011. 176s.
- [11]. Broshyura po beskontaktnym enkoderam L-9517-9494-01-A. URL: [http://www.koda.ua/download/Brosura\\_Enkodery\\_Renishaw\\_Azyk\\_-\\_russkiy..pdf](http://www.koda.ua/download/Brosura_Enkodery_Renishaw_Azyk_-_russkiy..pdf) (data zvernennya: 11.12.2021)

Отримана в редакції 08.11.2021. Прийнята до друку 29.11.2021. Received 08 November 2021. Approved 29 November 2021. Available in Internet 04 December 2021.

УДК 004.925.4

## MIP MAPPING THE VIRTUAL ENVIRONMENT FOR COMPUTER GAMES

Mykhaylov P.<sup>1</sup>, Chekhmestruk R.Y.<sup>2</sup>, Romanyuk O.N.<sup>3</sup>, Kotlyk S.V.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CEO 3D GNERATION GmbH, Dortmund, Germany, <sup>2</sup>3D GENERATION UA, Vinnytsia, Ukraine, <sup>3</sup>Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, <sup>4</sup>Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine  
ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5861-5970>, <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-5362-8796>, <sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-2245-3364>, <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0001-5365-1200>  
E-mail: <sup>1</sup>[pm@3dgeneration.com](mailto:pm@3dgeneration.com), <sup>2</sup>[Rc.ua@3dgeneration.com](mailto:Rc.ua@3dgeneration.com), <sup>3</sup>[rom8591@gmail.com](mailto:rom8591@gmail.com), <sup>4</sup>[sergknet@gmail.com](mailto:sergknet@gmail.com)

Copyright © 2021 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.v13i4.2220

**Abstract.** The paper describes how MIP-mapping and paging can be used to represent not only terrain imagery, but also terrain elevation. Previously the only things missing to implement Earth coverage were computing power, input/output bandwidth, graphics processing units (GPUs) and techniques to deal with large data sets. The article describes the rendering method that uses the GPU for most of the calculations. Modern graphics accelerators for personal computers allow you to solve problems that require the generation of images of the visual environment of photographic quality in real time. High-quality visualization of large continuous spaces of 3D vegetation is one of the requirements when creating most land transport simulators, as well as many virtual reality applications. Representation of large forest spaces in the form of free-standing tree models that have an acceptable visual quality for close-up display from the observer, it is impossible due to the huge number of primitives required for visualization. The article proposes use parallel calculations in GPU to accelerate rendering. We successfully integrated proposed visualization method into the standard rendering pipeline. For considered tests the