



Обґрунтування використання штучних нейронних мереж для компенсації кінематичних та динамічних похибок верстата паралельної кінематики

В. Б. Струтинський¹⁾, А. С. Дем'яненко²⁾

^{1),2)}Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр-т ім. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

Article info:

Paper received:

30 May 2014

The final version of the paper received:

11 September 2014

Paper accepted online:

07 November 2014

Correspondent Author's Address:

¹⁾ kvm_mmi@mail.ru

²⁾ a.s.demyanenko@gmail.com

Розроблено систему активного контролю просторового положення інструмента верстата паралельної кінематики. Розглянуто метод компенсації кінематичних та динамічних похибок верстата паралельної кінематики за допомогою використання штучних нейронних мереж, що навчаються на базі пропорційно-диференціального регулятора. На основі експериментальних даних перехідного процесу, що виникає при зміні траєкторії руху платформи верстата, проведено апробацію розробленого пропорційно-диференціального регулятора, результат роботи якого використано для навчання штучної нейронної мережі. Обґрунтовано доцільність використання штучних нейронних мереж у системах зворотного зв'язку верстатів паралельної кінематики на основі аналізу дисперсії результатів її навчання.

Ключові слова: верстат паралельної кінематики, система активного контролю, зворотній зв'язок, пропорційно-диференціальний регулятор, штучна нейронна мережа, дисперсія, експериментальні дані.

1. ВСТУП

Верстати паралельної кінематики є прогресивним обладнанням, що забезпечує можливість обробки складнопрофільних поверхонь, має низьку матеріало- та енергоємність [1]. Але при цьому в зв'язку із незадовільними параметрами жорсткості несучої системи, випадковими коливальними процесами у приводах [2], термічними деформаціями [3] точність просторового положення виконавчого органу верстата $\delta = 0,1$ мм, що не відповідає навіть класу точності Н. Підвищення кінематичної та динамічної точності верстатів за рахунок корекції керуючих сигналів у системі зворотного зв'язку між системою активного контролю та приводами, що забезпечують переміщення платформи [4], дає можливість підвищити точність до класу П. Аналіз літературних джерел показав, що не було досвіду розроблення та експериментальних досліджень точності верстатів паралельної кінематики із системою активного контролю, і ця проблема є новою.

На сьогодні одним із перспективних методів корекції законів керування за допомогою зворотного зв'язку є використання штучних нейронних мереж [5]. Нейронні мережі забезпечують адаптацію системи керування до зміни геометричних параметрів верстатів цієї групи та доквілля, що дасть можливість використовувати таке обладнання в різних температурних умовах, забезпечить повноцінну мобільність та можливість використання верстатів паралельної кінематики як мобільних комплексів: встановлювати їх у

різних конфігураціях у різних місцях. Крім того, штучні нейронні мережі використовуються для синтезу адаптивних регуляторів [6], що є дуже актуальним для верстатів паралельної кінематики, в яких перехідні процеси, що спостерігаються при зміні траєкторії руху, описуються функціями аперіодичної ланки другого порядку.

2. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою цієї роботи є розроблення системи активного контролю верстата паралельної кінематики із реалізацією зворотного зв'язку в системі керування для компенсації кінематичних та динамічних похибок під час роботи верстатів цього типу.

Для вирішення цієї мети були поставлені такі завдання:

- розроблення системи активного контролю верстата паралельної кінематики;
- розроблення пропорційно-диференціального регулятора та його апробація для компенсації похибок позиювання, що виникають при зміні траєкторії руху платформи верстата;
- формування та навчання нейронної мережі на базі розробленого пропорційно-диференціального регулятора, аналіз результатів навчання та перспектив її використання у системах зворотного зв'язку верстатів паралельної кінематики.

3. СИСТЕМА АКТИВНОГО КОНТРОЛЮ

Верстат паралельної кінематики із системою активного контролю (рис. 1) містить шість вимірювальних перетворювачів лінійних переміщень 1, які встановлюються над штангами верстата 2 [4]. Перетворювачі шарнірно з'єднані з додатковим несучим поясом 3 та додатковою платформою 4, що жорстко закріплена на рухомій платформі верстата 5. При обробці деталі 6 інструментом 7 сигнал із перетворювачів передається на блок АЦП і далі на персональний комп'ютер, на якому встановлено спеціально розроблене програмне забезпечення в середовищі LabView для зведення отриманих даних до векторної форми, розрахунку та відображення фактичного просторового положення інструмента верстата паралельної

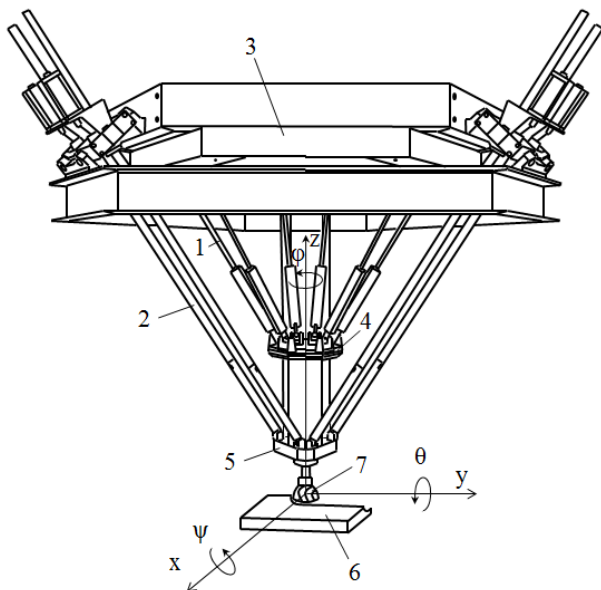


Рис. 1. Конструктивна схема верстата паралельної кінематики з системою активного контролю

Результати експериментальних досліджень, що проводилися при різних характерних траєкторіях руху платформи верстата, показали, що при зміні напрямку руху платформи спостерігається перехідний процес. Було запропоновано проводити корекцію керуючих сигналів для компенсації похибки позиціонування інструмента під час перехідного процесу за допомогою використання цифрового пропорційно-диференціального регулятора [7, 8]. Він формує керуючий сигнал для привода $V(t)$, який є сумою двох складових. Перша складова пропорційна різниці вхідного сигналу та сигналу зворотного зв'язку Δ (розузгодження видовження штанг верстата), друга –

$$y(t) = a_1 \cdot e^{-\left(\frac{t-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 \cdot e^{-\left(\frac{t-b_2}{c_2}\right)^2} + a_3 \cdot e^{-\left(\frac{t-b_3}{c_3}\right)^2}. \quad (1)$$

Апроксимовано перехідний процес, що виникає на початку руху платформи верстата вздовж вертикальної осі координат Z . Закон зміни у часі видовження штанги верстата 2 було порівняно із законом, що задається системою ЧПК. Він являє собою кусково-лінійну функцію 1 (рис. 5).

кінематики за шестивимірним вектором координат – три лінійні координати x, y, z та три відповідні кутові координати ψ, θ, φ .

Як вимірювальні штанги використано потенціометричний перетворювач лінійних переміщень моделі РС-М-200, який шарнірно встановлено між додатковою та рухомою платформами верстата (рис. 2). Шляхом комп'ютерного моделювання руху платформи верстата в середовищі Autodesk Inventor було визначено, що закони зміни довжин штанг верстата L_i та штанг системи активного контролю V_i подібні. Це дало можливість визначати просторове положення рухомої платформи верстата Π на основі значень видовження вимірювальних штанг [4].

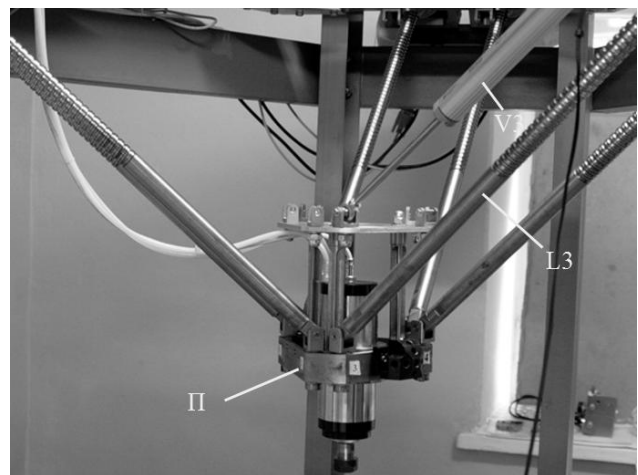


Рис. 2. Реалізація системи активного контролю верстата паралельної кінематики

похідна сигналу розузгодження d/dt (рис. 3).

На основі наведеної блок-схеми було розроблено пропорційно-диференціальний регулятор у середовищі LabView. Апробація запропонованого регулятора проводилася на основі експериментальних даних перехідного процесу, що спостерігається при зміні траєкторії руху платформи верстата. Результати експериментальних даних видовження вимірювальної штанги верстата (рис. 4 а) були апроксимовані (рис. 4 в) у середовищі Matlab та представлені у вигляді графічної залежності (рис. 4 б), що аналітично описується рівнянням:

Сигнал розузгодження, який було розраховано за допомогою пропорційно-диференціального регулятора, подано у вигляді графічної залежності (рис. 6), а відповідні значення видовження штанг зведено в окремий масив даних.

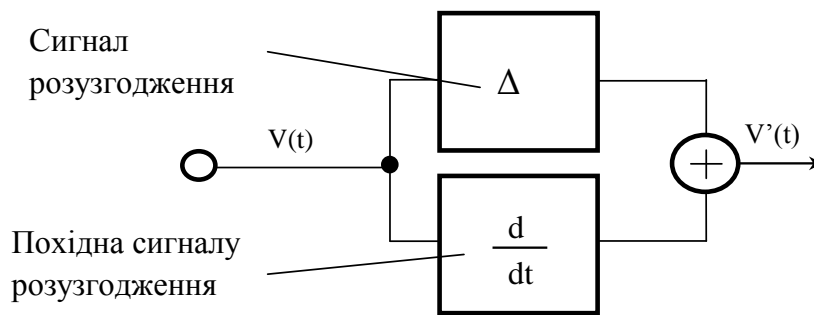


Рис. 3. Блок-схема пропорційно-диференціального регулятора для корекції керуючих сигналів привода верстата паралельної кінематики

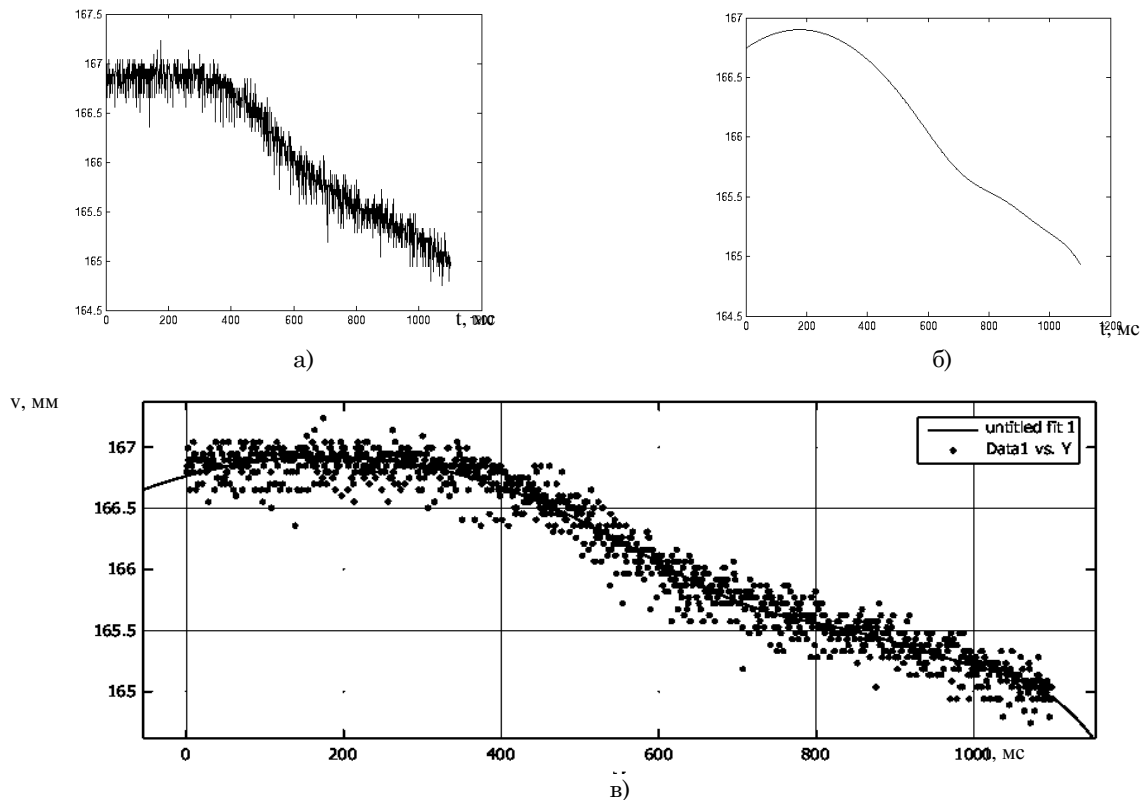


Рис. 4. Графічна залежність перехідного процесу при зміні напрямку руху платформи верстата: а) експериментальні дані з перетворювача; б) результат апроксимації експериментальних даних; в) вікно налаштування параметрів апроксимації експериментальних даних

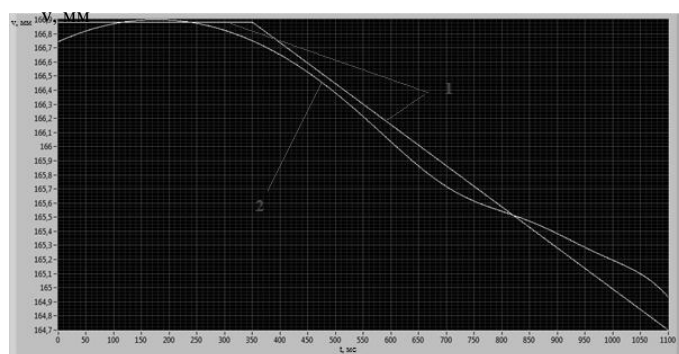


Рис. 5. Теоретичне видовження штанги в системі ЧПК та апроксимовані експериментальні значення

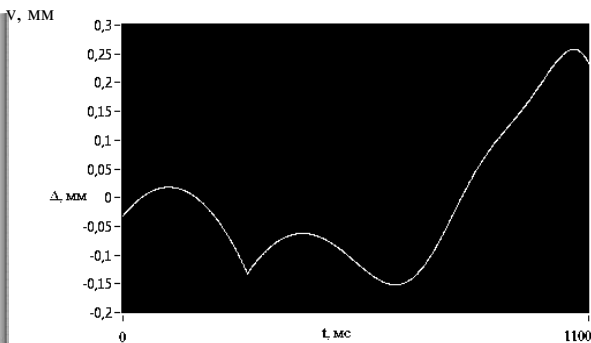


Рис. 6. Розрахований сигнал розузгодження під час перехідного процесу

Після внесення розрахованих кореляційних значень до системи ЧПК верстата було сформовано керуючий сигнал $V'(t)$, що забезпечує видовження

штанг верстата паралельної кінематики з точністю до 0,01 мм.

Нейронна мережа на базі пропорційно-диференціального регулятора.

Використання пропорційно-диференціальних регуляторів забезпечує можливість регулювання видовження штанги верстата, але при проектуванні системи активного контролю, в якій використано 6 вимірювальних перетворювачів, виникає необхідність обробки та корекції великих масивів даних в онлайн-режимі за короткий проміжок часу. У цьому випадку доцільним є використання нейронних мереж для регулювання керуючих сигналів.

Існує декілька варіантів формування штучних нейронних мереж: під час навчання з учителем, без вчителя та з підкріпленням. На початковому етапі було використано навчання з учителем для апроксимації результатів експериментальних даних перехідного процесу, що спостерігається при зміні траєкторії руху платформи.

Модель-клас f , яку було використано, застосовує номерний параметр W для класифікації кожного вхідного вектора x відповідно до очікуваного виходу y та аналітично описується залежністю

$$y = f(x, W). \quad (2)$$

Для тренування та формування вектора вихідних даних штучної нейронної мережі використано Neural Network Fitting Tool у середовищі Matlab. При моделюванні мережі було використано 9 прихованих шарів сигмоїдних нейронів, передаточна функція яких описується залежністю 3:

$$n_1(t) = \frac{1}{(1 + e^{-t})}. \quad (3)$$

Вихідний шар формується із використанням лінійного нейрона 4:

$$n_2(t) = k \cdot t. \quad (4)$$

Загальна архітектура нейронної мережі наведена на рис. 7.

Процес навчання даної штучної нейронної мережі полягав у тому, щоб мінімізувати дисперсію між цілями y та фактичними t результатами. Аналітично проводилась оцінка дисперсії за залежністю

$$\sigma_i = \frac{1}{2}(y_i - t_i)^2. \quad (5)$$

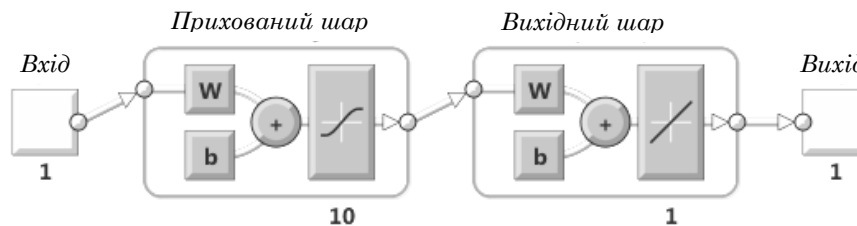


Рис. 7. Схематична структура використаної нейронної мережі

Оцінка дисперсії після завершення тренування змодельованої штучної нейронної мережі показала, що діапазон відхилень функцій похибки видовження штанги верстата σ_i лежить у межах від $15 \cdot 10^{-5}$ до $7,6 \cdot 10^{-5}$ мм, що забезпечує точність позиціонування платформи при зміні напрямку руху в межах припустимих похибок для верстата паралельної кінематики класу точності П.

У результаті тренування нейронної мережі мінімальне відхилення цілей від фактичного результату спостерігається після 78-ї ітерації. При цьому необхідно зазначити, що при повторному моделюванні нейронної мережі результати можуть відрізнитись і знаходяться в діапазоні від 50-ї-ти до 150-ї ітерації.

Результати тренування цієї мережі збережено у вигляді коду для командного рядка Matlab і у

вигляді окремих блоків для пакета Simulink, в якому на основі даної нейронної мережі в подальшому можна формувати модель нейрокерування зі зворотним зв'язком.

У подальших розробках запропоновано використовувати наслідкове нейрокерування на базі пропорційно-диференціального регулятора, який було розроблено в середовищі LabView. У цьому випадку нейроконтролер навчається на характерних прикладах корекції сигналів пропорційно-диференціального контролера. Вибірка навчання формується на основі значень на вході та виході, що записуються при керуванні верстатом із використанням пропорційно-диференціального регулятора (рис. 8).



Рис. 8. Схема наслідкового нейрокерування на базі пропорційно-диференціального регулятора

Після завершення навчання ця нейронна мережа може підключатися замість вихідного контролера для керування верстатом паралельної кінематики.

ВИСНОВКИ

Розроблено систему активного контролю просторового положення інструмента верстата паралельної кінематики та проведено експериментальні дослідження видовження штанг вимірjuвальної системи для характерних траєкторій руху. Для компенсації похибок, що виникають при перехідних процесах, розроблено пропорційно-диференціальний регулятор, визначено сигнал розузгодження та наведено

скоригований сигнал керування приводом верстата паралельної кінематики при зміні траєкторії руху платформи. Змодельовано штучну нейронну мережу, наведено аналіз дисперсії між цілями та фактичним результатами. Запропоновано принципову блок-схему наслідкового нейрокерування, що може бути використана при проектуванні систем зворотного зв'язку верстатів паралельної кінематики із використанням штучних нейронних мереж. У результаті використання запропонованих методів корегування керуючих сигналів значно підвищується точність верстата паралельної кінематики.

The substantiation of using the artificial neural networks to compensate the kinematic and dynamic errors of parallel kinematics machine tool

V. Strutynsky¹⁾, A. Demyanenko²⁾

^{1,2)} National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremogy ave., Kyiv, Ukraine, 03056

A system for active control of the spatial position of the parallel kinematics machine tool was developed. The method of compensation of kinematic and dynamic errors of the parallel kinematics machine tool using the artificial neural networks trained on the base of the proportional-differential controller was considered. The approbation of the developed proportional-differential controller, the output of which is applied to train the artificial neural network based on the experimental data of the transition process that occurs when the trajectory of the platform is changed. The feasibility of using the artificial neural networks in the feedback system of parallel kinematics machine tools was argued based on the analysis of variance of the results after its study.

Key words: parallel kinematics machine tool, active control system, feedback, proportional-differential controller, artificial neural network, variance, experimental data.

Обоснование использования искусственных нейронных сетей для компенсации кинематических и динамических погрешностей станка параллельной кинематики

В. Б. Струтинский¹⁾, А. С. Демьяненко²⁾

^{1, 2)} Национальный технический университет Украины «КПИ», пр-т Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

Разработана система активного контроля пространственного положения инструмента станка параллельной кинематики. Рассмотрен метод компенсации кинематических и динамических погрешностей станка параллельной кинематики с использованием искусственных нейронных сетей, обучающихся на базе пропорционально-дифференциального регулятора. На основе экспериментальных данных переходного процесса, возникающего при изменении траектории движения платформы станка, проведена апробация разработанного пропорционально-дифференциального регулятора, результат работы которого использован для обучения искусственной нейронной сети. Обоснована целесообразность использования искусственных нейронных сетей в системах обратной связи станков параллельной кинематики на основе анализа дисперсии результатов ее обучения.

Ключевые слова: станок параллельной кинематики, система активного контроля, обратная связь, пропорционально-дифференциальный регулятор, искусственная нейронная сеть, дисперсия, экспериментальные данные.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крижанівський В. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: навчальний посібник для ВНЗ / [В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнецов, І. А. Валявський, Р. А. Склярів]; за ред. Ю. М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
2. Струтинський В. Б. Стохастичні коливальні процеси у виконавчому пристрої мехатронної системи верстата паралельної кінематики / В. Б. Струтинський, А. А. Гуржій, А. С. Дем'яненко // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машинобудування та транспорт. – Севастополь, 2013. – Вип. 139/2013.
3. Pandilov Z. Parallel Kinematics Machine Tools: Overview – From History to the Future / Z. Pandilov, V. Dukovski // Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal Of Engineering. – Hunedoara, Romania, 2012.
4. Струтинський В. Б. Наукове обґрунтування та розробка системи моніторингу фактичного просторового положення інструменту верстата паралельної кінематики / В. Б. Струтинський, А. С. Дем'яненко // Науковий журнал «ТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ». – 2013. – № 1(7).
5. Кабалдин Ю. Г. Применение нейросетевых моделей процесса резания в системах адаптивного управления / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, А. М. Шпилев // СТИН. – 2002. – №3. – С. 3–7.
6. Терехов В. А. Синтез адаптивных нейросетевых регуляторов нелинейных динамических объектов / В. А. Терехов, И. Ю. Тюкин // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2005. – №1. – С. 222–256.
7. Болтян А. В. Моделирование системы адаптивного управления токарным станком с ЧПУ с учетом случайного характера внешнего возмущения / А. В. Болтян, М. А. Болтян, А. С. Ермоленко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – Вып. 41.
8. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки / В. Б. Струтинський // Житомир: ЖИТИ, 2001. – 613 с.

REFERENCES

1. Krizhanivskiy V. A., Kuznetsov Y. M., Valyavskiy I. A., Sklyarov R. A. (2004). Tehnologichne obladnannya z paralelnoyu kinematikoyu, Kirovograd, 449 p. [in Ukrainian].
2. Strutinskiy V. B., GurzhIy A. A., Demyanenko A. S. (2013). Visnik SevNTU – Seriya: Mashinobuduvannya ta transport, Vol. 139. [in Ukrainian].
3. Pandilov Z., Dukovski V. (2012). International Journal Of Engineering.
4. Strutinskiy V. B., Demyanenko A. S. (2013). Scientific Journal “Tehnologichni Kompleksi”, Vol. 1(7). [in Ukrainian].
5. Kabaldin Yu. G., Bilenko S. V., Shpilev A. M. (2002). STIN, Vol. 3, pp. 3–7. [in Russian].
6. Terehov V. A., Tyukin I. Yu. (2005). Stohasticheskaya optimizatsiya v informatike, Vol. 1, pp. 222–256. [in Russian].
7. Boltyan A. V., Boltyan M. A., Ermolenko A. S. (2011). Progresivnyie tehnologii i sistemyi mashinostroeniya, Vol. 41. [in Russian].
8. Strutinskiy V. B. (2001). Matematichne modelyuvannya protsesiv ta sistem mehaniki. Zhitomir, ZhITI, 613 p. [in Ukrainian].