

УДК 621.9.04

**В.Б. Струтинський, професор, д-р техн. наук,**

**А.С. Дем'яненко, аспірант**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,*

*пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056*

*kvm\_mmi@mail.ru*

## **РОЗРОБКА ТА АПРОБАЦІЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ АКТИВНОГО КОНТРОЛЮ ДИНАМІЧНОГО ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ІНСТРУМЕНТА ВЕРСТАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ КІНЕМАТИКИ**

*Розроблено та виготовлено мехатронну систему активного контролю динамічного просторового положення інструмента верстата паралельної кінематики. Проведено калібрування електрообладнання та введено необхідну корекцію в розроблене програмне забезпечення. Проведено експериментальні дослідження точності позиціонування рухомої платформи верстата при її русі по різних характерних траєкторіях. Виділено ділянки перехідних процесів, що спостерігаються при зміні траєкторії руху платформи та проведено їх попередній аналіз. Визначено середньоквадратичне відхилення перехідної функції фактичного переміщення платформи від заданого закону руху в системі ЧПК.*

**Ключові слова:** мехатроніка, верстат паралельної кінематики, перетворювач лінійних переміщень, активний контроль, перехідний процес, експеримент.

**Вступ.** Верстат паралельної кінематики є сучасним обладнанням, що забезпечує можливість обробки складно-профільних поверхонь, мають низьку матеріало- та енергоємність і високу мобільність [1]. Однак при цьому обладнання даного типу не забезпечує високих показників точності при обробці [2].

Проблема в загальному вигляді полягає в створенні верстатів паралельної кінематики підвищеної точності шляхом реалізації мехатронної системи активного контролю динамічного просторового положення інструмента. Проблема пов'язана з важливими науковими та практичними завданнями розвитку верстатобудування.

В літературних джерелах приведена значна кількість робіт, спрямованих на конструктивне вдосконалення [3] та вибір оптимальних геометричних параметрів конструкцій верстатів паралельної кінематики [4]. Певні роботи спрямовані на дослідження показників їх статичної та динамічної точності [5, 6], вібраційний аналіз [7].

Одним з перспективних напрямків є підвищення точності верстатів даної групи шляхом вдосконалення приводів та компенсації випадкових похибок в статичних і динамічних режимах [8, 9]. Наведено ряд теоретичних досліджень, спрямованих на реалізацію системи моніторингу фактичного просторового положення інструмента верстата, що базується на використанні додаткового механізму паралельної кінематики [10].

Всі наведені розробки не забезпечують в повній мірі реалізації системи активного контролю динамічного просторового положення інструмента верстата паралельної кінематики.

До не вирішених раніше частин загальної проблеми відноситься реалізація мехатронної системи активного контролю динамічного просторового положення інструмента верстата паралельної кінематики.

**Метою дослідження** є розробка методу та реалізація системи активного контролю динамічного просторового положення інструмента верстата паралельної кінематики.

Задачами дослідження є конструктивна реалізація системи активного контролю динамічного просторового положення інструмента верстата паралельної кінематики, калібрування системи та попередній аналіз експериментальних даних.

### **Виклад основного матеріалу досліджень.**

Розроблений верстат паралельної кінематики з мехатронною системою активного контролю динамічного просторового положення інструмента має шість виконавчих пристроїв на основі електропривода (рисунок 1).

Кожен виконавчий пристрій має електродвигун 1, який зубчатою пасовою передачею 2 з'єднаний із поворотною гайкою 3, яка переміщує гвинт 4. Виконавчий пристрій встановлено на рамці 5, що встановлена в карданному шарнірі з підшипниками 6 і 7 та може повертатись відносно нерухомої основи верстата. Зміна довжин гвинтів 4 приводить до переміщення платформи верстата 8, на якій розміщено мотор-шпindel. Мехатронна система активного контролю складається з додаткової платформи 10, що встановлена на стійках 9, які зафіксовані на рухомій платформі верстата. Контроль положення інструмента реалізується перетворювачами лінійних переміщень 11, які встановлені між додатковою платформою та додатковим несучим поясом 12.

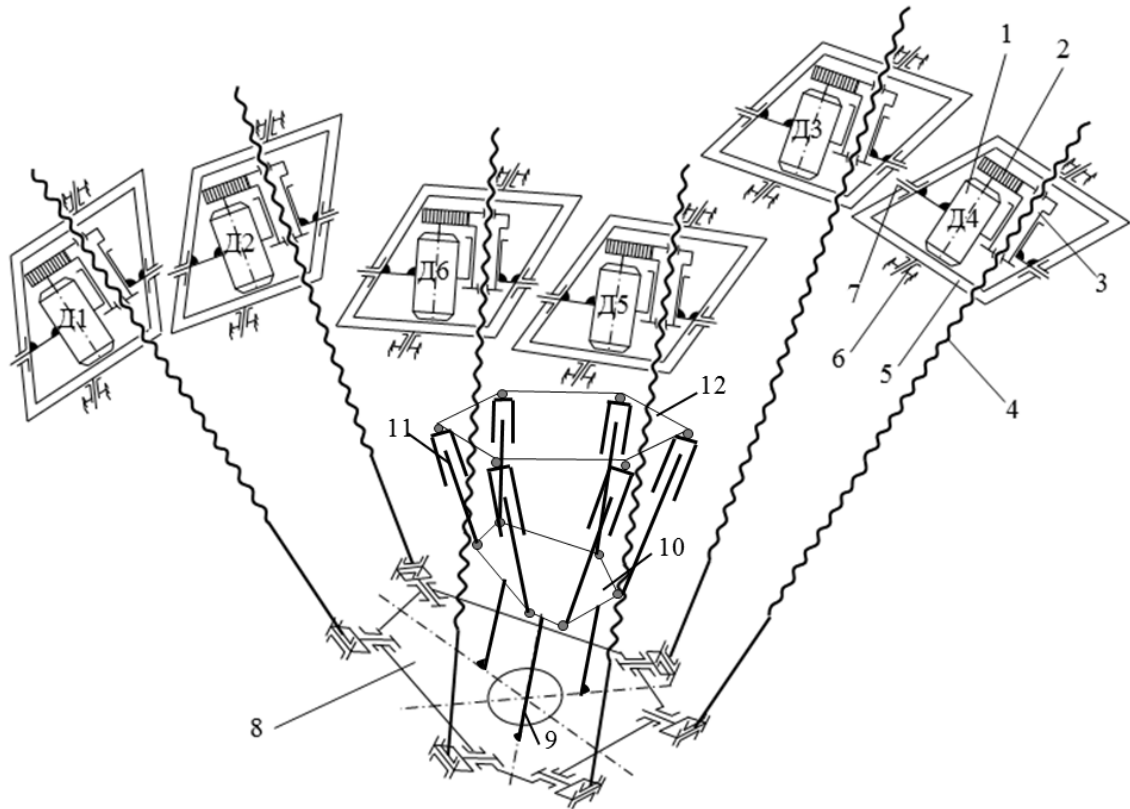


Рисунок 1 – Кінематична схема верстата паралельної кінематики з мехатронною системою активного контролю динамічного просторового положення інструмента

Контроль просторового положення інструмента верстата паралельної кінематики реалізується на базі визначення шестивимірному вектору координат ( $x, y, z$  та три кути:  $\psi, \theta, \phi$ ), що забезпечує підвищення точності відпрацювання траєкторії обробки шляхом корекції законів керування, що вводиться в систему ЧПК у відповідності до приведеної блок-схеми (рисунок 2). Керуючий сигнал подається від системи числового програмного керування 1, проходить крізь суматор 2 до системи активного контролю 3 та на вихід 4. При цьому має місце зворотній зв'язок 5 між виходом 4 та суматором 2, завдяки чому на основі даних зі встановлених перетворювачів лінійних переміщень реалізується корекція керуючого сигналу в онлайн-режимі з використанням спеціально розробленого програмного забезпечення.

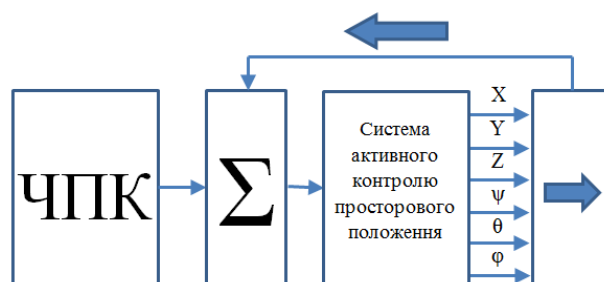


Рисунок 2 – Блок-схема системи керування верстата паралельної кінематики з мехатронною системою активного контролю динамічного просторового положення інструмента верстата

Для реалізації запропонованого методу було встановлено додатковий механізм паралельної кінематики, в якому в якості штанг змінної довжини використано не менше шести перетворювачів лінійних переміщень.

У відповідності до розробленої твердотільної моделі та креслень було виготовлено основні вузли мехатронної системи активного контролю (рисунок 3): додаткова платформа 1, що встановлюється на рухомій платформі верстата на трьох стійках 2, які фіксуються гайками 3. Перетворювач встановлюється

на вісі 4, яка закріплена в кронштейні 5. Встановлення перетворювача на несучій системі забезпечується подібними кронштейнами, що зафіксовані на додатковому несучому поясі 6. Для полегшення конструкції та відповідної мінімізації інерційності системи, платформа виготовлена з дюралюмінію, а стійки полегшено за рахунок фрезерованих повздовжніх пазів.

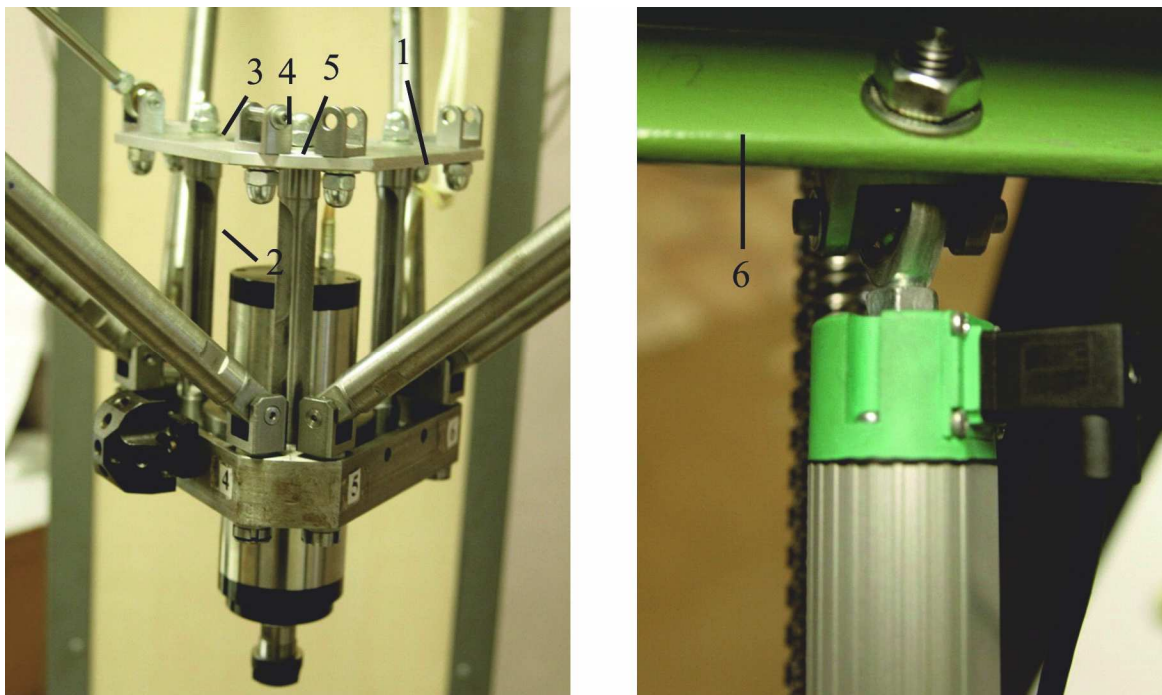


Рисунок 3 – Монтаж перетворювача лінійних переміщень на верстат паралельної кінематики

В якості вимірювальних штанг мехатронної системи активного контролю використано аналоговий перетворювач лінійних переміщень потенціометричного типу моделі РС-М-200. Даний перетворювач забезпечує вимірювальну відстань до 200 мм, максимальну швидкість руху до 5 м/с. Фіксація перетворювача реалізується двома сферичними шарнірами, що забезпечують максимальні кутові переміщення до  $\pm 30^\circ$ .

Для відцифрування отриманого сигналу використано аналогово-цифровий перетворювач (далі - АЦП) М-DAQ 14, що дає можливість проводити виміри з частотою дискретизації від 65 Гц до 100 кГц. Крім того, даний АЦП має вбудований підсилювач сигналу, що дозволяє працювати в чотирьох діапазонах вимірів напруги: від 1,25 до 10 В.

Розробка мехатронної системи активного контролю вимагає використання прогресивного, сучасного програмного забезпечення, що дає можливість он-лайн фільтрації сигналу, виключення шумів, перетворення, апроксимації та лінеаризації отриманих значень, зведення отриманих даних у окремі масиви даних, виділення характерних ділянок, їх аналіз та обробка в он-лайн режимі, введення отриманих даних в систему ЧПК.

Після аналізу сучасного стану програмних продуктів та мов програмування було визначено, що найбільш перспективним для даних задач є використання середовища LabView, в якому було розроблено віртуальний пристрій для роботи мехатронної системою активного контролю.

У вікні Waveform Graph 1 (рисунок 4, а) відображається зміна напруги отриманого сигналу на проміжку часу 0,08 с. На основі даних значень можна контролювати рівень шумів та допустиму точність проведення вимірів. У вікнах Waveform Chart 2, 3 представлено отримані з перетворювача значення напруги та лінійні переміщення відповідно. В таблиці 4 виводяться цифрові значення видовження штока перетворювача. У вікні 5 можна регулювати діапазон вимірювань ( $\pm 1,25$  В;  $\pm 2,5$  В;  $\pm 5$  В;  $\pm 10$  В), встановлювати режим проведення вимірів та канали АЦП, з яких знімаються значення напруги. У вікні 6 встановлюється об'єм даних, що обробляються АЦП. Частота дискретизації аналогового сигналу 7 може встановлюватись в діапазоні до 100000 Гц. При натисненні кнопки «Stop» 8 програма завершує відображення та записує отримані дані в форматі .xls або .txt.

В розробленій блок діаграмі (рисунок 4, б) використано цикл «While-Loop» 1, що забезпечує збір даних з перетворювача, поки не буде натиснута кнопка «Stop»; функції «Build table» 2, 3, що на основі отриманого сигналу формують таблицю значень амплітуди. Формуються дві таблиці – у вигляді вхідного сигналу напруги у вольтах та та вже переведені у міліметри значення з перетворювача 4. Значення

видовження штока перетворювача відображаються після завершення роботи циклу за допомогою індикатору у вигляді таблиці 5.

Для запису отриманих даних використовується підпрограма Write to Spreadsheet File.vi 6. Відображення сигналу з датчика у режимі реального часу реалізується у вікнах Waveform Graph 7, що забезпечує візуальний контроль рівня шумів сигналу, Waveform Chart 8 та Waveform Chart 9, на яких відображаються значення напруги та відповідного видовження штока перетворювача.

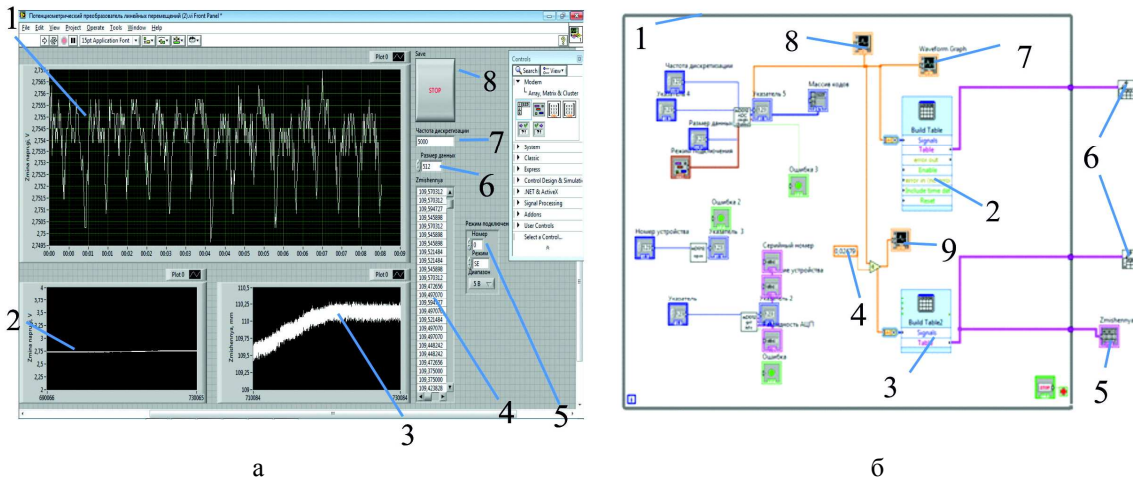


Рисунок 4 – Інтерфейс (а) та блок-діаграма (б) розробленого в середовищі LabView програмного забезпечення мехатронної системи активного контролю

Було проведено аналіз вихідного сигналу перетворювача лінійних переміщень в статичному положенні платформи верстата, яких показав, що роздільна здатність перетворювача складає 0,01 В, що відповідає його паспортним даним (рисунок 5).

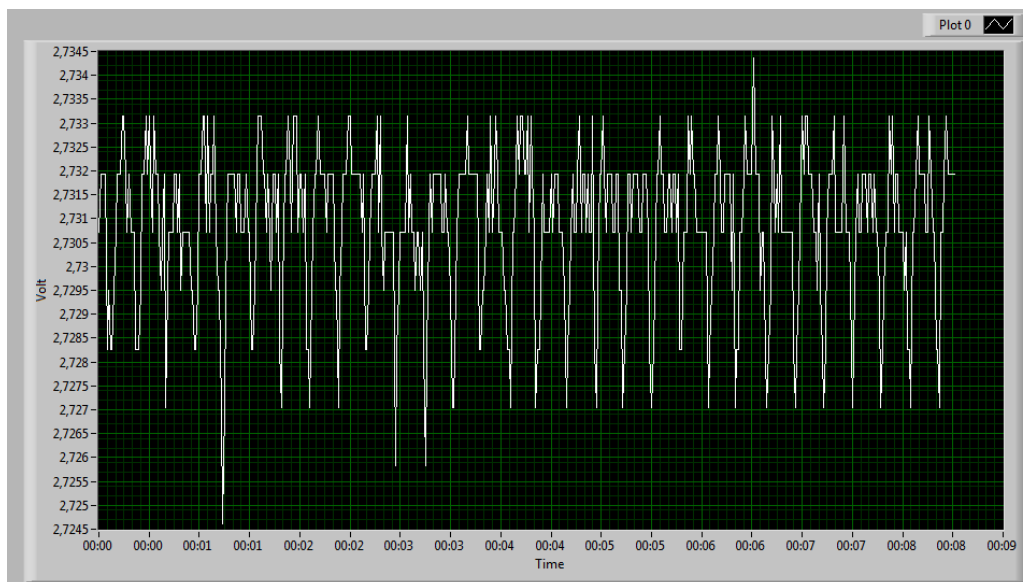


Рисунок 5 – Вихідний сигнал перетворювача в статичному положенні платформи верстата

Для уточнення вимірювального діапазону в залежності від фактичної напруги на клеммах перетворювача використовувалась наступна залежність:

$$I_{\max \text{ вимір.}} \leq \frac{U_{\text{АЦП}} \cdot I_{\max \text{ теоретична}}}{U_{\text{живлення}}}$$

В результаті, вимірювальний діапазон звужився до  $I_{\max \text{ вимір.}} \approx 196 \text{ мм}$ .

Визначений аналітично коефіцієнт корекції було введено в програму та проведено остаточну перевірку за допомогою індикаторів годинникового типу (рисунок 6).

Перетворювач лінійних переміщень було встановлено в горизонтальній площині XY, індикатори – в двох взаємоперпендикулярних площинах таким чином, щоб точка контакту індикаторів з ВО знаходилась на циліндричній установчій поверхні шпинделя. Мікропереміщення ВО в межах до 2 мм надавались в площині XY. Результати остаточної перевірки підтвердили результати попереднього калібрування перетворювача.



Рисунок 6 – Перевірка попереднього калібрування перетворювача лінійних переміщень за допомогою індикаторів годинникового типу

Експериментальні дослідження проводились для різних характерних траєкторій руху інструмента верстата. На рисунках 7, а, б приведено сигнал з перетворювача при русі вгору та по дузі  $r = 50$  мм в площині XY з кутом нахилу платформи верстата  $\psi = 20^\circ$  відповідно.

На отриманих результатах виділено 3 основних ділянки: А – початок руху; Б – встановлений рух платформи по заданій траєкторії; В – зміна траєкторії руху або зупинка рухомої платформи верстата паралельної кінематики. Як видно з отриманих залежностей, при зміні траєкторії руху А, В спостерігається перехідний процес.

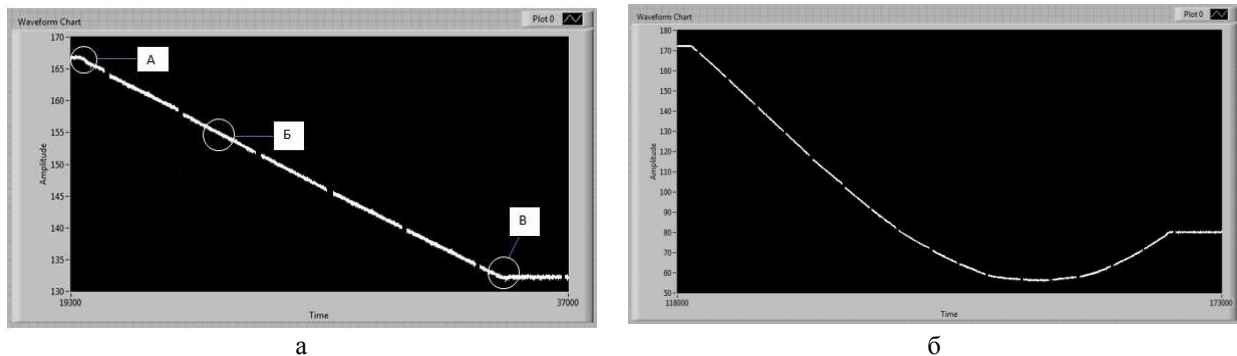


Рисунок 7 – Експериментальні дані з перетворювача при русі платформи вгору  $\Delta Z = 50$  мм (а) та при русі вгору  $\Delta Z = 50$  мм по дузі  $r = 50$  мм в площині XY з кутом нахилу  $\psi = 20^\circ$  (б)

Обробка результатів експериментальних даних на характерних ділянках перехідного процесу проводилась в середовищі LabView (рисунок 8). Для проведення аналізу отриманих результатів використано підпрограму Curve Fitting.vi 1. Вихідні дані зчитуються з файлу xls, в якому було записано результати вимірів 2.

Для симуляції частоти вимірів, використано цикл For Loop 3, що генерує послідовність відліків від 1 до n-вимірів. Кількість вимірів задається користувачем в залежності від частоти дискретизації АЦП та ділянки, що розглядається. В даному випадку, проаналізовано результати експериментальних даних, що знімалися на протязі 0,11 секунди. Відповідно, кількість відліків по вісі X становить 1100. При проведенні вимірів дані записувались у вигляді двовимірної масиви, що дозволяє легко імітувати сигнал за допомогою індикатора Waveform Chart. Але для апроксимації та визначення середньоквадратичної похибки вимірів записані дані необхідно перетворити в одновимірний масив. Для цього використовувалась функція Reshape Array 4.

Перетворений в одномірний масив експериментальних даних та номера відліків з циклу For Loop об'єднано за допомогою функції Bundle 5. Результат представлено у вікні графічного індикатора XY Graph 6.

Експериментальні дані (рисунок 9, а) було апроксимовані поліномом 5-го ступеню (рисунок 9, б) наступного виду

$$v(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4 + a_5 \cdot t^5.$$

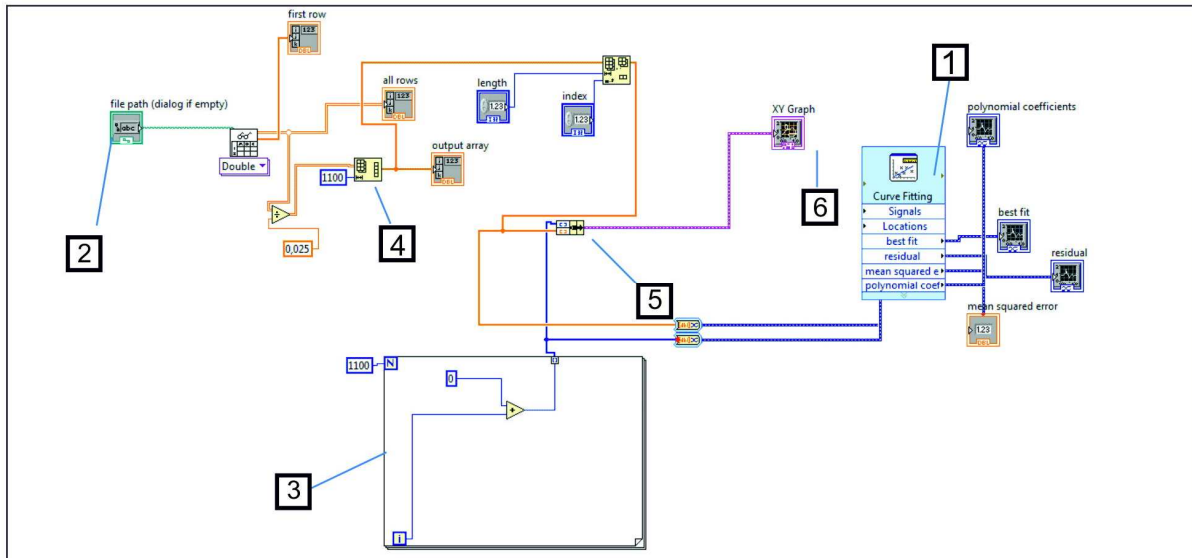
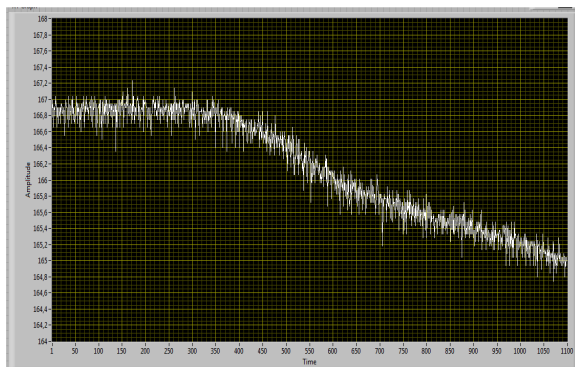
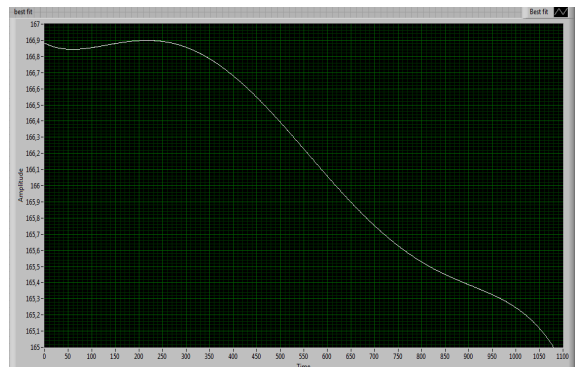


Рисунок 8 – Блок-схема програми для обробки експериментальних даних



а



б

Рисунок 9 – Сигнал з перетворювача при зміні траєкторії руху платформи верстата (а) та його апроксимація (б)

Для визначення відповідних фіксованих коефіцієнтів та побудови даної залежності було використано підпрограму CurveFitting.vi (рисунок 10).

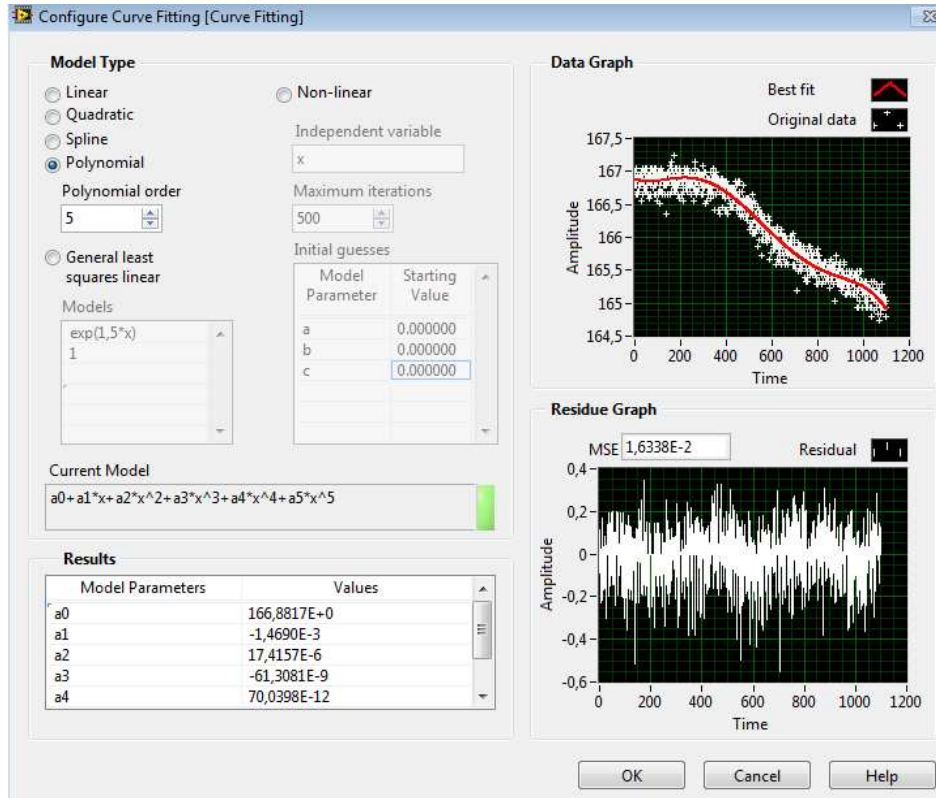


Рисунок 10 – Визначення коефіцієнтів полінома та різниці між номінальним та апроксимованим значенням результатів вимірів

Закон руху, що задається в системі ЧПК, та сформовану на основі експериментальних даних функцію перехідного процесу приведені на рисунку 11, а.

На основі отриманих залежностей визначено коефіцієнти регулювання перехідного процесу:

$$PO_i = \frac{v_i - \bar{v}_i}{v_i} \cdot 100\%$$

та середньоквадратичне відхилення перехідної функції від прийнятої лінійної (рисунок 11, б):

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v}_i)^2} = 0,04 \text{ мм.}$$

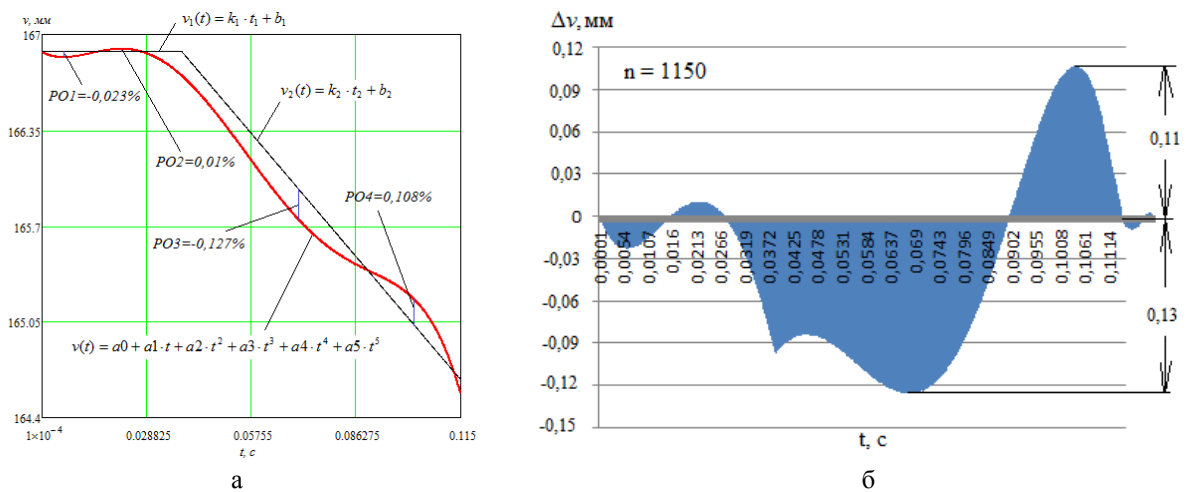


Рисунок 11 – Апроксимована поліномом і лінійна функції зміни довжини вимірювальної штанги (а) та графічне зображення відхилення перехідної функції від лінійної залежності, що задається в системі ЧПК (б)

**Висновки**

1. Розроблено та реалізовано мехатронну систему активного контролю динамічного просторового положення інструмента верстата паралельної кінематики, для чого виготовлено та встановлено основні вузли системи, обрано вимірвальне цифрове обладнання, проведено його калібрування.

2. Розроблено програмне забезпечення в середовищі LabView для он-лайн контролю видовження вимірвальних штанг мехатронної системи активного контролю верстата паралельної кінематики та подальшого аналізу експериментальних даних.

3. Проведено експериментальні дослідження видовження штанги мехатронної системи активного контролю при русі платформи верстата по характерних траекторіях, встановлено наявність перехідного процесу при зміні траєкторії руху платформи та визначено коефіцієнти перерегулювання і середньоквадратичне відхилення перехідної функції від траєкторії, що була задана в системі ЧПК.

Як напрямок перспективних досліджень планується вивчення впливу параметрів режиму обробки на точність верстата паралельної кінематики.

**Бібліографічний список використаної літератури**

1. Кузнєцов Ю.М. Компонівка верстатів з механізмами паралельної структури / Ю.М.Кузнєцов, Д.О.Дмитрієв, Г.Ю.Диневич; під. ред. Кузнєцова Ю.М.— Херсон: ПП Вишнемирський, 2009.— 456 с.
2. Кириченко А.М. Особливі положення плоских механізмів паралельної структури / А.М.Кириченко, С.М.Заїка, А.М.Федот'єв // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського: зб. наук. праць. — Кременчук, 2010. — №5 — С. 94–99.
3. Poppeova V. The development of hexapod kinematic machine / V.Poppeova, V.Bule, J.Uricek, M.Rupiková // Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, 2012. — Vol. 16, No. 1. — P. 39–42.
4. Muruganandam S. Selection of optimal machining parameters for hexapod machine tool / S.Muruganandam, S.Pugazhenthii // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — January 2010. — Volume 46, Issue 5–8. — P. 801–810.
5. Струтинський С.В. Схемна реалізація просторової системи приводів для маніпулювання об'єктами машинобудування / С.В. Струтинський // Науковий журнал «Технологічні Комплекси». — Луцьк: ЛНТУ, 2012. — № 1, 2 (5, 6). — С. 97–103.
6. Валявський І.А. Математичне моделювання положення вихідного органу  $\ell$ -координатного механізму / І.А. Валявський, В.А. Крижанівський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць. — Кіровоград: КДТУ, 2003. — Вип. 12. — С. 223–229.
7. Pedrammehr S. Forced vibration analysis of milling machine's hexapod table under machining forces / S.Pedrammehr, M. Mahboubkhah, M. Reza, Ch. Qazani, A. Rahmani, S. Pakzad. // Strojníški vestnik. — Journal of Mechanical Engineering. — 60 (2014) 3. — P. 158–171.
8. Дименберг Ф.М. Теория пространственных шарнирных механизмов / Ф.М. Дименберг. — М.: Наука, 1982. — 336 с.
9. 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. Сер. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. праць. — Севастополь, 2013. — Вип. 139. — С. 204–210.
10. 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». — Луцьк: ЛНТУ, 2013. — № 1 (7). — С. 117–125.

*Надійшла до редакції 13.01.2014 р.*



**Струтинский В.Б., Демьяненко А.С. Разработка и апробация мехатронной системы активного контроля динамического пространственного положения инструмента станка параллельной кинематики**

Разработана и изготовлена мехатронная система активного контроля динамического пространственного положения инструмента станка параллельной кинематики. Проведена калибровка электрооборудования и введена необходимая коррекция в разработанное программное обеспечение. Проведены экспериментальные исследования точности позиционирования подвижной платформы станка при ее движении по разным характерным траекториям. Выделены участки переходных процессов, наблюдаемых при изменении траектории движения платформы, и проведен их предварительный анализ. Определено среднеквадратическое отклонение переходной функции фактического перемещения платформы от заданного закона движения в системе ЧПУ.

**Ключевые слова:** мехатроника, станок параллельной кинематики, преобразователь линейных перемещений, активный контроль, переходный процесс, эксперимент.

**Strutinskiy V.B., Demianenko A.S. Development and testing of mechatronic systems to actively control the dynamic spatial position of the machine tool parallel kinematics**

The mechatronic active control system of dynamic spatial position of tool of parallel kinematics machine tool was developed and manufactured. The calibration of electrical equipment and the necessary correction were done and implemented in the developed software. The experimental research of the platform movement by the different specific trajectories was held. The areas of the transitional process that occur when changing the trajectory of the platform were identified and their preliminary analysis was done. The mean squared deviation of the actual transitional function of the platform movement compared with the stated in the CNC was found.

**Keywords:** mechatronics, parallel kinematics machine tool, linear movement converter, active control, the transitional process, experiment.