

elements that limit the reliability of metallurgical machines and to outline measures aimed at eliminating the shortcomings of existing and designed equipment. The failure criterion is the condition of the parts of the rotary saw, which makes it impossible to continue its operation in a given technological process.

The criterion of the limiting state is the failure of the parts of the saw, for the replacement or restoration of which it is necessary to completely dismantle all the saw components and repair or replace them with new ones. The most susceptible to wear element of the saw is the cassette, which consists of two drums and a tension roller, their bearings, belts on the drums and the housing.

Keywords: strength, reliability, eccentricity, saws, cutting disc.

Стаття надійшла 11.04.2025 р.

УДК 004.056.53:519.17

doi.org/10.31498/2522-9990292025330270

Лещенко О. І.

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКУ СИСТЕМНИХ ПОПРАВОК

Можливості сучасних CNC систем керування верстатами дають змогу перейти до побудови програм з елементами динамічного програмування, за якого КП являє собою п-кроковий процес ухвалення рішень залежно від прогнозованої зміни умов оброблення. У цьому разі можна сказати, що на вихідні параметри системи керування верстатом з ЧПК впливатимуть, окрім координат точок поверхні деталі ще змінні керування, значення яких залежать від стану системи на даному інтервалі траєкторії переміщення. Класичним прикладом такого способу нівелювання збурювальних впливів процесу обробки є адаптивні системи, проте вартість таких проектів, з урахуванням їхнього технічного супроводу в процесі експлуатації, зростає на порядок. Тому залишаються актуальними завданням створення алгоритмів управління, що базуються на результатах попереднього моніторингу динамічних процесів обробки на різних ділянках траєкторії формоутворення. Такий підхід дає змогу за мінімальних витрат автоматично отримувати необхідні параметри поверхонь деталей, без індивідуального налаштування на обробку кожної з них.

На основі досліджень, проведених на кафедрі «Технології машинобудування» у 2019 р. впроваджено у виробництво на металургійному комбінаті «Азовсталь» технологічний процес остаточної обробки валків сортового прокату типу «на попередньо налаштованих верстатах». Це стало можливим завдяки науково обґрунтованій методиці, що дає змогу прогнозувати і враховувати у вигляді системних поправок ймовірне значення похибки позиціонування верстата в кожній точці координатної площини. У перспективі, за відповідних досліджень можна отримати поправки для корекції програмної траєкторії, як реактори на збурювальну дію вектору сил різання, що змінюється за величиною і напрямком.

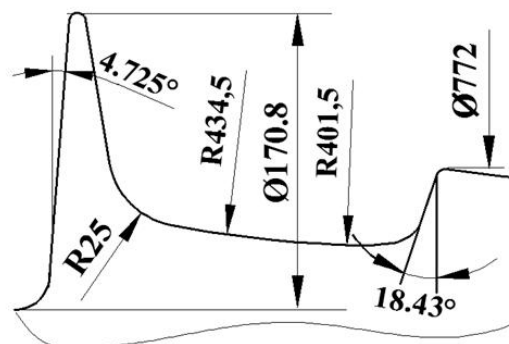
Включення в модель системи формоутворення розрахункових значень поправок шляхом їх підстановки в заголовки технологічних підпрограм для верстата з пристроєм ЧПК класу CNC і таким чином керувати вихідною точністю обробки деталі.

Ключові слова: верстати з ЧПК, параметричні функції, корекція, похибки формоутворення, керуюча програма (КП), валки рейкового прокату, норми оцінки точності позиціонування верстата з ЧПК, функції екстраполяції за даними вимірювань.

Постановка проблеми. Ґрунтуючись на статистичних даних минулого десятиліття можна сказати, що в експортному потенціалі України продукція металургійного комплексу займала основне місце. Якщо експорт листового прокату залишається експортом сировини, то профільний - сортовий прокат, це вже готова продукція. Найвищі вимоги висуваються до параметрів валків рейкового прокату (рис. 1, а), що має високий попит, як на території України, так і за її межами. Для виготовлення прокату цього типу застосовують валки з струмками складної форми (рис. 1, б), виготовлення яких виконують на вальцетокарних верстатах із жорсткою конструкцією станини, що дає змогу обробляти деталі великої ваги (до 10 т.) за великих зусиль у процесі різання. Водночас, за відмінних технологічних властивостей спеціалізованих верстатів вальцетокарного оброблення вони мають високу вартість. Наприклад, вальцетокарний верстат SKQ8485 (Anyang Xinheng Machine Tool Co., Ltd., Китай) - забезпечує отримання крутного моменту на шпинделі до 18000 Нм, оснащений спеціальним двопозиційним гідравлічним різцетримачем, дає змогу виконувати на ньому як чорнове, так і чистове оброблення, з ЧПК SINUMERIK 828D - має вартість до 110000\$. На сьогодні такі вкладення в основні фонди перевищують можливості вітчизняних підприємств.



а)



б)

Рисунок 1 – Валок рейкового прокату з базуванням в центрах на вальцетокарному верстаті, що закріплено у планшайбами передньої бабки (а); формоутворювальний струмок валка (б)

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Точність металорізального верстата записана в паспорті на обладнання та обумовлює можливість отримання розмірів певного квалітету точності які задані в кресленні деталі. Якщо регулярно проводилося технічне обслуговування верстата: змащування, чищення повітряних фільтрів електрошаф, експлуатація при зазначеному інтервалі температур, то ресурс обладнання відповідатиме паспортним даним. Однак найбільш навантажені частини важких верстатів – наприклад напрямні, часто вимагають ремонту в пріоритетному порядку.

Існує широкий спектр методів ремонту напрямних - шліфування, стругання та фрезерування, після наплавлення або по поверхнях напрямних заводу-виготовлювача, що є найбільш досконалим та продуктивним способом відновлення. Коли знос напрямних невеликий, то можливе їх шабрування силами ремонтних служб заводу.

Ефективним методом відновлення точності напрямних є їхнє оброблення переносними верстатами, встановленими безпосередньо на станину верстата, що ремонтується. Цей метод економічно вигідний, оскільки обробку напрямних виконують без зняття верстату з фундаменту, внаслідок чого відпадають витрати на демонтаж і повторний монтаж станини, з повторним вивірянням її установки. Недолік цього способу - обробку проводять на знижених режимах різання, оскільки присутність у процесі різання низькочастотних вібрацій може позначитися на мікрогеометрії поверхні напрямних.

Ремонт та відновлення деталей машин

Найефективніший метод, коли верстату можна повернути початкові характеристики точності - виконати капітальний ремонт верстата, з транспортуванням на базові верстатобудівні заводи, наприклад КЗТС (м. Краматорськ). Нині це вельми проблематично, виконувати ремонт такого рівня з урахуванням дефіциту комплектуючих і розриву технологічних і логістичних зв'язків.

Одним з основних показників точності токарних верстатів з ЧПК є точність позиціонування, під якою розуміють усереднене відхилення дійсного положення супорта верстата від заданого програмою, за умови його багаторазового виходу на позицію в різних точках координатної системи верстата (СКВ), з позитивного й негативного напрямків координатних осей.

ДСТУ 27843-88 встановлюють такі норми точності позиціонування:

- точність одностороннього позиціонування;
- повторюваність одностороннього позиціонування;
- точність двостороннього позиціонування;
- повторюваність двостороннього позиціонування;
- максимальна ширина зони нечутливості.

Розроблено велику кількість методичних рекомендацій з оцінки точності позиціонування верстата з ЧПК. Федеральне об'єднання німецьких інженерів (VDI Verein Deutscher Ingenieur [1]) пропонує метод статистичного оцінювання точності позиціонування за результатами низки вимірів, із визначенням їхніх статистичних характеристик:

- середнього арифметичного значення похибки позиціонування $\overline{\Delta Z}_{Ncp}^p$, $\overline{\Delta Z}_{Ncp}^m$, і $\overline{\Delta X}_{Ncp}^p$, $\overline{\Delta X}_{Ncp}^m$ по, кожній осі токарного верстата Z і X;
- середньоквадратичного відхилення σ_Z^p , σ_Z^m і σ_X^p , σ_X^m від програмно заданих значень під час переміщень у позитивному (σ^p) і негативному (σ^m) напрямках.

Обчислення середньоквадратичного відхилення зумовлене тим, що під час переміщення робочого органу, окрім систематичних помилок доводиться враховувати й випадкові величини, причому для технологічної системи, придатної для експлуатації, випадкові відхилення мають бути менше ніж систематичні.

Мета дослідження. Дослідити точність позиціонування вальцетокарного верстата з ЧПК і розробити теоретично обґрунтований метод зниження його похибки, шляхом введення поправок у системну область ОЗП пристрою ЧПК. Розробити методику, що дає змогу прогнозувати і враховувати у вигляді системних поправок імовірне значення похибки позиціонування верстата в окремій точці координатної площини верстата.

Основний матеріал дослідження. Для кожної осі верстата X і Z необхідно розрахувати середньоквадратичне п'яти відхилень від середнього арифметичного значення в кожній точці вимірювання, під час руху в «плюс (p)» і в «мінус (m)» за формулами:

- для осі X:

$$\sigma_{Xp} = \sqrt{\frac{\sum_{N=1}^5 (\Delta X_{p_Ncp})^2}{4}}, \quad \sigma_{Xm} = \sqrt{\frac{\sum_{N=1}^5 (\Delta X_{m_Ncp})^2}{4}}; \quad (1.1)$$

- повторюваність одностороннього позиціонування в точці по осі X:

$$6 \cdot \sigma_{Xp}, \quad 6 \cdot \sigma_{Xm}; \quad (1.2)$$

- для осі Z:

Ремонт та відновлення деталей машин

$$\sigma Z_p = \sqrt{\frac{\sum_{N=1}^5 (\Delta Z_p - N_{cp})^2}{4}}, \quad \sigma Z_p = \sqrt{\frac{\sum_{N=1}^5 (\Delta Z_p - N_{cp})^2}{4}}. \quad (1.3)$$

- повторюваність одностороннього позиціонування в точці по осі Z:

$$6 \cdot \sigma Z_p, 6 \cdot \sigma Z_m. \quad (1.4)$$

Нестабільність процесу позиціонування залежить не тільки від систематичних, а й від випадкових факторів технологічного процесу. Величина найімовірнішого розсіювання відхилень від систематичних похибок, коли їхнє поле розсіювання підпорядковане закону нормального розподілу (припущення знаходить підтвердження в роботах низки авторів [1] [2]), приймається рівною 3σ , а ширина всього поля розсіювання, що охоплює 99% усіх можливих відхилень $\pm 3\sigma$.

Максимальні (max) і мінімальні (min) значення похибки позиціонування в кожній точці вимірювання, з урахуванням середньоквадратичних відхилень можна визначити за наступними формулами:

за віссю X, max, під час переміщення в плюс (p) і мінус (m) відповідно:

$$X_{p_max} = \Delta X_{p_Ncp} + 3 \cdot \sigma X_p, \quad X_{m_max} = \Delta X_{m_Ncp} + 3 \cdot \sigma X_m; \quad (1.5)$$

за віссю X, min, під час переміщення в плюс (p) і мінус (m) відповідно:

$$X_{p_min} = \Delta X_{p_Ncp} - 3 \cdot \sigma X_p, \quad X_{m_min} = \Delta X_{m_Ncp} - 3 \cdot \sigma X_m; \quad (1.6)$$

за віссю Z, max, під час переміщення в плюс (p) і мінус (m) відповідно:

$$Z_{p_max} = \Delta Z_{p_Ncp} + 3 \cdot \sigma Z_p, \quad Z_{m_max} = \Delta Z_{m_Ncp} + 3 \cdot \sigma Z_m; \quad (1.7)$$

за віссю Z, min, під час переміщення в плюс (p) і мінус (m) відповідно:

$$Z_{m_max} = \Delta Z_{m_Ncp} - 3 \cdot \sigma Z_m, \quad Z_{p_min} = \Delta Z_{p_Ncp} - 3 \cdot \sigma Z_p. \quad (1.8)$$

У розрахунку точності позиціонування має бути врахована зона нечутливості b, що має місце під час реверсу переміщення супорта верстата. ДСТУ 27843-88 визначає зону нечутливості як різницю односторонніх відхилень від заданого положення в разі протилежних напрямків переміщення за цією координатною віссю:

$$X_b = \Delta X_{p_Ncp} - \Delta X_{m_Ncp}, \quad Z_b = \Delta Z_{p_Ncp} - \Delta Z_{m_Ncp}; \quad (1.9)$$

Тоді повторюваність двостороннього позиціонування в задане положення визначається:

$$\begin{aligned} & \text{- за віссю X: } X_w = |3 \cdot \sigma X_p + 3 \cdot \sigma X_m + |X_b||; \\ & \text{- за віссю Z: } Z_w = |3 \cdot \sigma Z_p + 3 \cdot \sigma Z_m + |Z_b||; \end{aligned} \quad (1.10)$$

Розглянемо експериментальне дослідження точності позиціонування вальцетокарного верстата з урахуванням поправок програмних переміщень.

Роботи проводилися на верстаті моделі DXW1250/3 з ЧПУ CNC-645, включеному до технологічної лінії чистового оброблення валків рейкобалкового виробництва, після виконання на ньому всього стандартного комплексу робіт із регулювання електромеханічного

Ремонт та відновлення деталей машин

слідкувального приводу верстата, який пройшов перевірку на відповідність нормам технологічної точності. Статистичні дані вимірювань точності позиціонування супорта верстата (рис. 2) вимірювали в координатній системі верстата (СКВ) $Z_{CT}X_{CT}$ за індикацією дисплея під час руху в «плюс» (р) і «мінус» (m) у діапазонах:

- за віссю X – (0÷500) мм, з дискретністю 50 мм; $\Delta\bar{X}_1^m \dots \Delta\bar{X}_N^m$, $\Delta\bar{X}_1^p \dots \Delta\bar{X}_N^p$;
- за віссю Z – (0÷1500) мм, з дискретністю 100 мм, $\Delta\bar{Z}_1^m \dots \Delta\bar{Z}_N^m$, $\Delta\bar{Z}_1^p \dots \Delta\bar{Z}_N^p$.

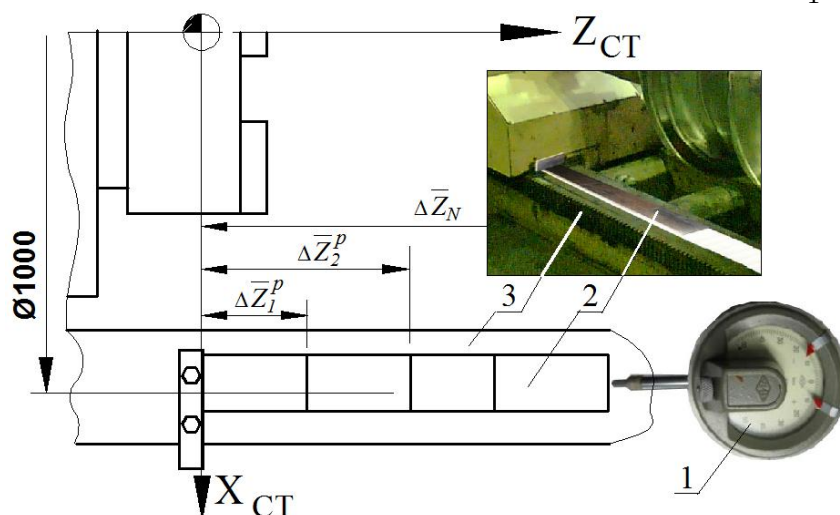


Рисунок 2 – Напрямна верстата 3 зі встановленими на ній плитками 2 кінцевих мір КМД №9 для вимірювання мікатором 1 моделі 13301 (ІПМ-1) похибки позиціонування верстата.

Вимірювання проводили пружинною вимірювальною голівкою 1 - мікатором моделі 13301 (ІПМ-1), (ціна поділки 0.001мм) і плоскпаралельними кінцевими мірами 2 довжини (КМД №9 кл. 1 Арт. 910-110), покладеними на напрямні верстата 3 через термоізолювальний папір. Згідно з нормами точності (ДСТУ 27843-88) вимірювання точності позиціонування проводили тричі, у різних умовах. Розглянемо їх по порядку.

1. Точність позиціонування верстата без корекції програмних переміщень

Заповнюємо таблицю 1 даних вимірювань і розрахункових даних, похибки позиціонування супорта за віссю X - інтервал вимірювань 0÷500 мм,

Таблиця 1 – Позиціонування по осі X, без корекції системних параметрів

Позиціонування в «плюс» (р), мкм											
X_N	X_{N2}^p	X_{N3}^p	X_{N3}^p	X_{N4}^p	X_{N5}^p	ΔX_{p_Ncp}	σX_p	X_{p_max}	X_{p_min}	X_b	X_w
50	4	11	11	12	7	9	3,39	19,17	-1,17	17,8	33,3
.....											
500	12	11	11	10	9	10,6	1,14	14,02	7,18	16,8	39,1
Позиціонування в «мінус» (m), мкм											
X_N	X_{N2}^m	X_{N3}^m	X_{N3}^m	X_{N4}^m	X_{N5}^m	ΔX_{p_Ncp}	σX_p	X_{p_max}	X_{p_min}		
50	-9	-10	-11	-7	-7	-8,8	1,79	-3,43	-14,17		
.....											
500	-17	-15	-19	-23	-18	-18,4	2,97	-9,50	-27,30		

у якій:

X_N - осьові координати точок позиціонування, де N - кількість вимірювань за віссю;

$X_{N1}^p \dots X_{N5}^p, X_{N1}^m \dots X_{N5}^m$ - для даної точки позиціонування, п'ять відхилень від заданого положення під час переміщення в «плюс» (p) і «мінус» (m) відповідно;

$\Delta X_p_Ncp, \Delta X_m_Ncp$, - середнє арифметичне з п'яти вимірів, відхилення від заданого положення під час переміщення в «плюс» (p) і «мінус» (m) відповідно;

$\sigma X_p, \sigma X_m$ - середнє квадратичне відхилення від заданого положення під час переміщення в «плюс» (p) і «мінус» (m) відповідно (1.10);

$Xp_max = \Delta Xp_Ncp + 3 \cdot \sigma Xp, Xp_min = \Delta Xp_Ncp - 3 \cdot \sigma Xp$ - граничні значення поля розсіювання розмірів від заданого положення під час переміщення в «плюс» (p) (1.10, 1.11);

Xb - розрахункове значення ширини зони нечутливості (1.9);

Xw - повторюваність двостороннього позиціонування (1.10).

Заповнюємо таблицю аналогічну за структурою табл. 1 для осі $Z \dots \dots$

Розрахунок норм точності позиціонування проводимо за формулами (1.1....1.10). Аналізуючи дані та графіки середнього відхилення позиціонування, ширини зони нечутливості та повторюваності виходу на позицію, бачимо, що поле розсіювання розмірів більше 0.05 мм. Розрахункові значення параметрів точності позиціонування вказують на недостатню реальну точність верстата для оброблення формотворчих поверхонь валків.

2. Точність позиціонування верстата з введенням у системну область пам'яті пристрою ЧПУ поправок, отриманих методом вимірювань на попередньому досліді.

Компенсуємо похибку позиціонування апаратно - програмним шляхом, записавши за допомогою спеціальної програми (адресація є в паспорті верстата) у відведений для цієї мети адресний простір ОЗП ЧПУ числові похибки у фіксованих точках кожної осі. Алгоритм роботи приводів верстата побудований так, що з координатами точок переміщення супорта, заданими в програмі оброблення деталі алгебраїчно складаються раніше записані в ОЗП ЧПУ односторонні відхилення від заданого положення (поправки) $\Delta Xp_Ncp, \Delta Zp_Ncp$ і $\Delta X_m_Ncp, \Delta Z_m_Ncp$ за кожною віссю при русі в позитивному та негативному напрямках.

За встановлених значень поправок, отриманих на попередньому досліді, проводимо вимірювання похибки позиціонування супорта за осями X, Z , тобто вдруге виконаємо вимірювання точності позиціонування супорта верстата в серединних точках інтервалів попередніх вимірів і заповнюємо таблицю, даними вимірювань за типом таблиці 1. За формулами (1.1....1.10) проводимо розрахунки норм точності. Аналізуючи дані та графіки середнього відхилення позиціонування, ширини зони нечутливості та повторюваності виходу на позицію, бачимо, що точність позиціонування верстата підвищилася.

3. Точність позиціонування верстата, із записом в пристрій ЧПУ верстата поправок, розрахованих на основі функції екстраполяції, побудованої за даними вимірювань

Сучасні пристрої ЧПУ мають значний обсяг області системної пам'яті. Це дає можливість зменшувати інтервали вимірювань похибки позиціонування з метою запису їхніх значень у пам'ять пристрою ЧПУ верстата. Водночас це потребуватиме проведення більшої кількості вимірювань, що є досить трудомістким процесом, та у якому зростає ймовірність накопиченої похибки самих вимірювань.

Прогнозувати значення похибки позиціонування в точках координатної площини верстата можна за допомогою функцій, отриманих методом кубічної сплайн-інтерполяції $dX_N^p(x), dX_N^m(x), dZ_N^p(z), dZ_N^m(z)$ побудованих на основі дискретного ряду вимірювань. Процес інтерполяції полягає в тому, що в проміжках між точками, отриманими під час вимірювань, значення функції апроксимує кубічна парабола $A(t)=a \cdot t^3+b \cdot t^2+c \cdot t+d$, де коефіцієнти

a, b, c, d розраховуються виходячи зі значень координат граничних точок проміжку інтерполяції.

За даними дискретного ряду вимірювань ΔX_p_Ncp і ΔX_m_Ncp , ΔZ_p_Ncp і ΔZ_m_Ncp , засобами пакету Mathcad будуємо функції $A_m(z)$ і $A_p(z)$, які дають змогу екстраполювати ймовірну похибку позиціонування в будь-якій точці координатної площини.

Після введення поправок в ОЗП ЧПУ, отриманих на основі екстраполяції, проведені повторні вимірювання похибки позиціонування, що показали (табл. 2) підвищення параметрів точності програмних переміщень.

Таблиця 2 – Данні погрішності позиціонування супорта по осях X и Z

Параметри точності позиціонування	Позиціонування без корекції мкм		Позиціонування з корекцією методом екстраполяції, мкм	
	Під час руху в «плюс» (p)	Під час руху в «мінус» (m)	Під час руху в «плюс» (p)	Під час руху в «мінус» (m)
Центр угруповання, як середнє арифмет. на 10 інтервалах ΔX_Ncp	20,04	-19,76	8,82	-8,88
MAX(ΔX_Ncp)	27,8	-8,2	9,8	-5,4
MIN(ΔX_Ncp)	9	-30,6	6,6	-10,6
MAX(ΔX_Ncp) - MIN(ΔX_Ncp)	18,8	-22,4	3,2	-5,2
Центр угруповання, як середнє арифмет. на 10 інтервалах ΔZ_Ncp	20,0	-20,0	9,5	-8,6
MAX(ΔZ_Ncp)	28	-2	11	-2,8
MIN(ΔZ_Ncp)	9,6	-31,8	7	-10,4
MAX(ΔZ_Ncp) - MIN(ΔZ_Ncp)	18,4	-29,8	4	-7,6

Після проведених досліджень і введення поправок на координатні переміщення в ОЗП ЧПК результати вимірювань помилки позиціонування показали відносно підвищення параметрів точності на 50% ÷ 80%. Побудована гістограма (рис. 3) дає можливість візуально порівняти параметри точності верстата під час роботи без корекції та з корекцією програмних переміщень на основі розробленого методу.

Ремонт та відновлення деталей машин

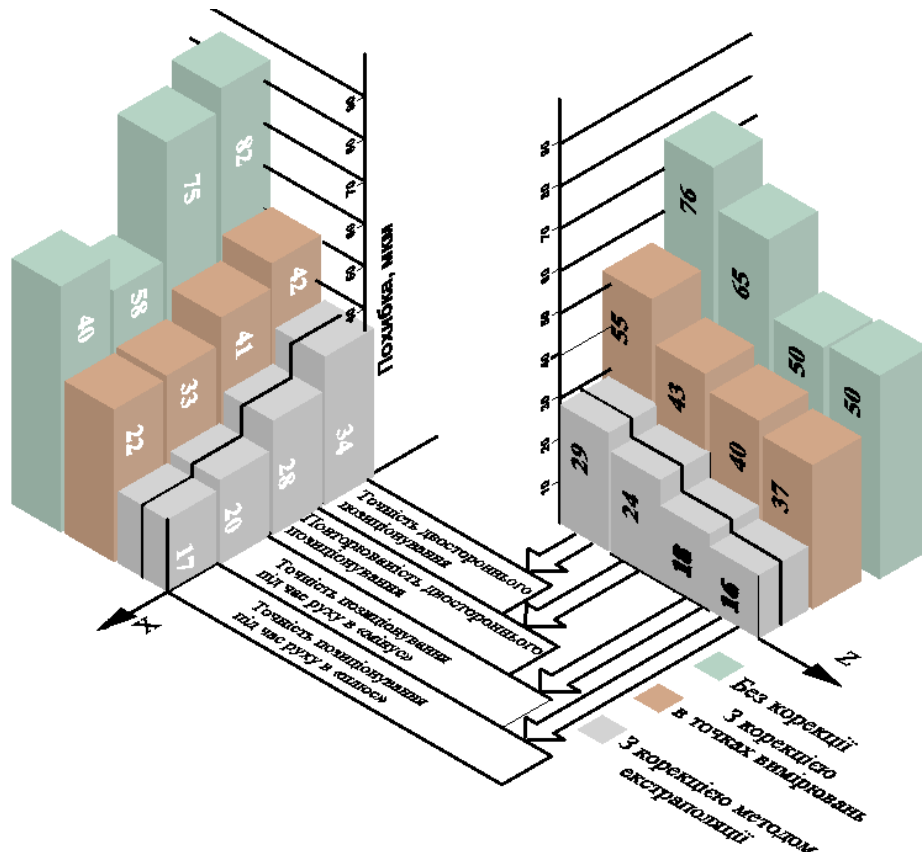


Рисунок 3 – Гістограма нормованих параметрів точності верстата з ЧПК:

- без корекції;
- з корекцією в точках вимірювань;
- з корекцією методом екстраполяції даних.

ВИСНОВКИ

Під час проведення цих досліджень, отримані інтерполяційні функції дають змогу визначити і записати в ОЗП ЧПУ похибки позиціонування для кожної з координатних осей, під час руху супорта в напрямі «плюс» або «мінус», Фактично похибки позиціонування від дискретно заданого аргументу у вигляді точок вимірювання подані функціями безперервного аргументу, що дають змогу отримати ймовірне значення кінематичної похибки супорта в кожній точці координатної площини.

Список використаних джерел

1. Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням: Навч. посіб. / Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. –[Електронний ресурс] / - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 158с.
2. Курс теорії ймовірностей : підручник / Б. В. Гнеденко – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2010. – 464 с.

METHODS OF INCREASING THE POSITIONING ACCURACY OF CNC MACHINE TOOLS BASED ON THE CALCULATION OF SYSTEM PARAMETERS

The capabilities of modern CNC machine tool control systems allow us to move to the construction of programs with elements of dynamic programming, in which the control represents an n -step process of decision making depending on the predicted changes in machining conditions. In this case, we can say that the output parameters of the machine control system will be influenced by the control variables characterizing the state of the system at a given interval of the trajectory, in addition to the coordinates of the workpiece surface points. Adaptive systems are a classic example of such a way of leveling the disturbing effects of the machining process, but the cost of such projects, taking into account their technical support during operation, increases by an order of magnitude. Therefore, the tasks of creating control algorithms based on the results of preliminary monitoring of dynamic machining processes at different parts of the forming trajectory remain relevant. This approach allows us to automatically obtain the required parameters of parts surfaces at minimum costs, without individual adjustment for machining of each of them.

On the basis of research conducted at the Department of "Machine Building Technology" in 2019 introduced into production at the metallurgical plant "Azovstal" technological process of final machining of rolls of long products on "pre-adjusted machines". This became possible thanks to a scientifically based methodology that allows you to predict and take into account in the form of system corrections, the probable value of the error of machine positioning at each point of the coordinate plane.

Keywords: CNC machines, parametric functions, correction, forming errors, control program (CP), rail rolling rolls, standards for assessing the positioning accuracy of a CNC machine, extrapolation functions based on measurement data.

Стаття надійшла 30.04.2025р.