

DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-15-29>
УДК 621.9.01

АНАЛІЗ ТОПОЛОГІЇ ТА ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТОЧНОСТІ РУХІВ ПЛОСКОШЛІФУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ ПРИ ТРЬОХОСЬОВІЙ ОБРОБЦІ В АВТОМАТИЧНОМУ ЦИКЛІ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

© Бринюк М.С., Кондратюк О.Л., Марков В.О., Скоркін А.О.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Бринюк Максим Сергійович (Bryniuk Maksym): ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-2974-8818>; e-mail: Maksimysimi@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Кондратюк Олег Леонідович (Kondratyuk Oleh): ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3263-0483>; e-mail: kondratyuk.mot@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, кандидат технічних наук, доцент; доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Марков Владлен Олегович (Markov Vladlen): ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0625-6934>; e-mail: marik.markov.1997@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Скоркін Антон Олегович (Skorkin Anton): ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3032-83414>; e-mail: Antonskorkin20@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, кандидат технічних наук, доцент, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Щоб підвищити надійність обробки на триосьовому плоскошліфувальному верстаті з ЧПК, відповідно до ключового питання точності обробки, у цій статті запропоновано аналіз геометричної точності та метод проектування верстатів даного типу. Створено геометричну модель розповсюдження похибки на основі теорії багатотільних систем і методу однорідного перетворення координат. Експериментально підтверджено, що модель має ідеальну точність передбачення. Ключові геометричні похибки були проаналізовані за допомогою ортогонального дизайну та перевірки параметрів методів Design of Experiments (DoE). Методи DoE - це спосіб визначення оптимальних налаштувань процесу, що супроводжується мінімальними витратами на дослідження та максимальною швидкістю отримання результату. Налагоджуючи процес, технолог може діяти методом спроб і похибок. Після аналізу витрат і відстеження похибок була створена модель витрат і якості для ключових геометричних змінних похибок на основі надійної теорії проектування. Нарешті допуски ключових геометричних змінних похибок були розподілені відповідно до цієї моделі. Результати показують, що метод може реалізувати розумний та оптимальний розподіл геометричної точності, а потім покращити точність обробки шліфуванням та, зрештою, підвищити надійність обробки на шліфувальних верстатах в цілому.

Ключові слова: плоскошліфувальний верстат, багатокорпусна система, рухи, геометрична похибка, модель поширення похибки, міцна конструкція, точність обробки.

Bryniuk M., Kondratyuk O., Markov V., Skorkin A. “Analysis of the topology and geometric accuracy of motions of a grinding machine during three-axis machining in an automatic cycle at the design stage”

In order to increase the reliability of processing on a three-axis CNC flat grinding machine, in accordance with the key issue of processing accuracy, this article proposes an analysis of geometric accuracy and a design method for machines of this type. A geometric model of error propagation was created based on the theory of multibody systems and the method of uniform coordinate transformation. It is experimentally confirmed that the model has perfect prediction

accuracy. Key geometric errors were analyzed using an orthogonal design and Design of Experiments (DOE) parameter validation. DOE methods serve as a means to determine optimal process settings with minimal research costs and maximum speed in obtaining results. During process setup, technicians can proceed through trial and error. After cost analysis and error tracking, a cost and quality model was established for key geometric error variables based on robust design theory. Subsequently, the error tolerances of the key geometric variables were allocated according to this model. The results indicate that the method enables a reasonable and optimal distribution of geometric accuracy, thereby enhancing the accuracy of grinding processing and overall processing reliability on grinding machines.

Keywords: surface grinding machine, multi-body system, movements, geometric error, error propagation model, robust design, processing accuracy.

Вступ

У процесі проектування та виготовлення верстатів точність є ключовим фактором для забезпечення їх надійності. Крім того, серед усіх видів похибок, що впливають на точність обробки, геометричні похибки деталей конструкцій верстатів є основними джерелами похибок, які становлять від 25% до 35% [5-7]. Тому, щоб підвищити надійність обробки та забезпечити необхідну якість заготовки, необхідно аналізувати геометричну точність верстатів на стадії їх проектування. У традиційному точному проектуванні інженери розподіляють допуски параметрів залежно від свого досвіду. Оскільки кожна похибка по-різному впливає на точність обробки, і складність контролю точності також різна, ці традиційні методи не можуть задовольнити вимоги високої точності [4]. Таким чином, необхідно створити модель поширення геометричної похибки та ідентифікувати ключові геометричні похибки. Після завершення моделювання похибок та визначення основної геометричної похибки розподіл геометричної точності може бути застосований на практиці при проектуванні та виготовленні верстатного обладнання.

Створення точної моделі поширення геометричної похибки є першим кроком для проектування геометричної точності. В даний час в моделюванні похибок широко використовуються теорія багатотільних систем і метод однорідного перетворення координат [12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведено аналіз різних наукових робіт, присвячених задачі розрахунку точності технологічної оброблювальної системи, як одній із актуальних при вирішенні проблеми керування точністю, оцінки точності верстата на стадії проектування, встановлення окремих параметрів, що визнають точність обробки та ін., в яких використані різні наукові підходи. В результаті аналізу встановлено, що значна частина наукових результатів належить науковим школам професорів: В.Е. Пуша, А.С. Пронікова, В.Т. Портмана, Б.М. Базрова, М.Г. Косова. Закладені ними наукові основи геометричної точності верстатів є фундаментом сучасних напрямків досліджень. Особливу увагу приділено роботам В.Т. Портмана [5-7], в яких запропоновано варіаційний метод розрахунку точності машин, який дозволяє побудувати баланс точності верстата з врахуванням багаточисельних джерел похибок. Використання в ньому фундаментальної властивості похибок – їх дуже малої величини у порівнянні із номінальним розміром – дозволяє отримати аналітичні вирази, які пов'язують в явному вигляді вхідні і вихідні характеристики точності верстата.

У сфері аналізу та ідентифікації ключових геометричних похибок Волошиним В.Н., Луцівим В.В. розглянуто формоутворюючу структуру п'ятикоординатного фрезерного верстата з ЧПК [1, 3, 4].

Авторами приведена структура моделі вихідної точності верстата, яка включає взаємопов'язані блоки: 1 – координатний код формоутворюючої системи; 2 – джерела похибок; 3 – функція формоутворення; 4 – похибка положення ланок формоутворюючої

системи; похибки схеми формоутворення; 5 – задана (номінальна) оброблювана поверхня; 6 – баланс точності верстата; 7 – реальна оброблювана поверхня; 8 – базова поверхня; 9 – похибки форми і розташування; 10 – похибка форми. Приведено основні положення варіаційного методу розрахунку точності металорізальних верстатів. Створено математичну модель для аналізу чутливості до похибок матричним диференціальним методом та ідентифіковано ключові джерела геометричних похибок через коефіцієнт чутливості обчислення та аналізу похибок. Автори проаналізували чутливість об'ємної похибки щодо 37 компонентів похибки відповідно та використали результати аналізу при точному проектуванні та виготовленні п'ятикоординатного фрезерного верстата з ЧПК [1].

У сфері розподілу точності Решетов Д.Н. і Портман В.Т. запропонували оптимальний метод розподілу точності відповідно до інтегрованої точності та вартості шліфувальних верстатів [5]. Також було встановлено параметри надійності приблизної моделі за методологією поверхні відгуку та проаналізували надійність точності обробки різних робочих положень і чутливість для мінімальної надійності, що відповідає робочим положенням вузлів шліфувального верстата. На основі цього аналізу оптимізовано розподіл допусків змінних похибок, дотримуючись принципу пропорційності точності. Однак ці дослідження не поєднували ідентифікацію ключової геометричної похибки з розподілом точності для застосування до остаточного проектування верстатів.

Метою роботи є аналіз геометричної точності та створення нового способу проектування шліфувальних верстатів. Запропонувати геометричну модель поширення похибки на основі теорії багатотільних систем та методу однорідного перетворення координат.

Виклад основного матеріалу

1. Аналіз топології та геометричної похибки для тривісного плоскошліфувального верстата з ЧПК

1.1 Аналіз топології шліфувального верстата

Тривісний плоскошліфувальний верстат з ЧПК включає такі функціональні компоненти: передня та задня станина, робочий стіл, колона, шпиндельна коробка, шпиндель і шліфувальний круг (див. рис. 1).

Робочий стіл переміщується поперечно вздовж напрямної по осі X, який знаходиться на передній станині верстата, колона рухається поздовжньо вздовж напрямної осі Y і знаходиться на задній станині, а коробка шпинделя рухається вертикально вздовж напрямної по осі Z, яка зібрана на колоні. Шпиндель і шліфувальний круг встановлені на шпиндельній коробці. Топологічний аналіз використовується для опису зв'язків кожного типового типу тіло

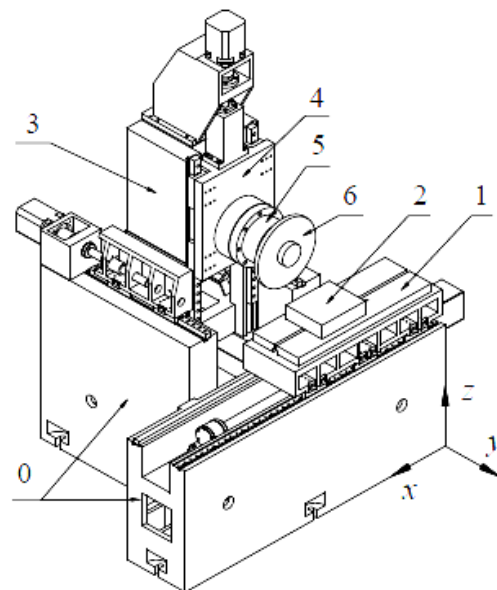


Рис. 1 - Триосьовий плоскошліфувальний верстат з ЧПК (0-передня-задня станина верстата, 1-робочий стіл, 2-заготовка, 3-колона, 4-шпиндельна коробка, 5-шпиндель, 6-шліфувальний круг)

багатотільної системи. Щоб зручно встановити модель похибки, необхідно проаналізувати топологію тривісного плоскошліфувального верстата з ЧПК, який сам є багатотілоподібною системою.

Топологія шліфувального верстата показана на рис. 2, як масив примітивних тіл $L^0(K)$ (див. табл.1).

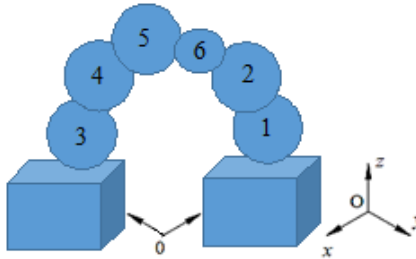


Рис. 2 - Топологія шліфувального верстата

Таблиця 1 - Масив примітивних тіл

K	1	2	3	4	5	6
$L^0(K)$	1	2	3	4	5	6
$L^1(K)$	0	1	0	3	4	5
$L^2(K)$	0	0	0	0	3	4
$L^3(K)$	0	0	0	0	0	3
$L^4(K)$	0	0	0	0	0	0

1.2 Аналіз геометричної похибки шліфувального верстата.

Геометричні похибки – це комбінація тих похибок, які впливають на геометрію машини та компоненти, які є в структурному циклі машини [7-10]. У механіці тверде тіло — це ідеалізація твердого тіла, що має шість ступенів свободи, тоді як положення або рух у тривимірному просторі має лінійну та кутову складові похибки. Візьмемо як приклад вал подачі X, коли робочий стіл рухається вздовж напрямної X-напрямку як призматичний шарнір, компоненти лінійної похибки є трьома трансформаціями вздовж осі як одне позионування та дві похибки прямолінійності, тобто похибки горизонтальної та вертикальної прямолінійності, тоді як компоненти кутової похибки становлять одну похибку крену та дві похибки нахилу, які називаються кутом та поворотом (див. рис.3). У символах похибок перший нижній індекс вказує напрямок похибки, а другий нижній індекс вказує напрямок руху.

Геометричні похибки валу подачі Y та валу подачі Z подібні до валу подачі X. Крім того, існує три похибки прямокутності між цими трьома валами подачі, як показано на рис.3. всебічно, є 21 геометрична похибка, як зазначено в табл.2.

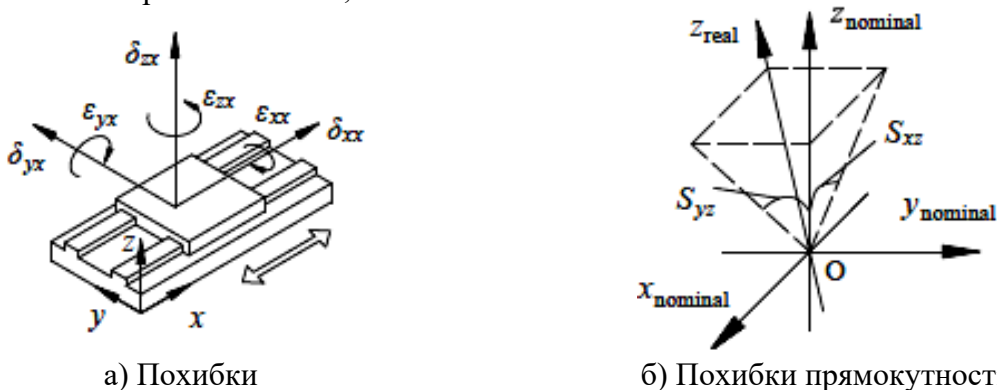


Рис. 3 - Похибки суміжних типових тіл

Таблиця 2 - Геометричні похибки шліфувального верстата

Напрямок руху	Лінійні похибки			Кутові похибки			Похибки прямокутності
	x	y	z	x	y	z	
x	δ_{xx}	δ_{yx}	δ_{zx}	ϵ_{xx}	ϵ_{yx}	ϵ_{zx}	S_{xy}
y	δ_{xy}	δ_{yy}	δ_{zy}	ϵ_{xy}	ϵ_{yy}	ϵ_{zy}	S_{yz}
z	δ_{xz}	δ_{yz}	δ_{zz}	ϵ_{xz}	ϵ_{yz}	ϵ_{zz}	S_{xz}

2. Створення математичної моделі та експериментальне підтвердження поширення геометричної похибки

2.1 Система координат поверхонь тривісного шліфувального верстата з ЧПК.

Базова система координат на станині верстата та локальна система координат на кожному компоненті будуються таким чином:

(1) Базова система координат $O_o x_o y_o z_o$ побудована на станині верстата, напрямки x , y , z в ідеалі збігаються з напрямками руху валу подачі X , Y , Z ;

(2) Локальні системи координат $O_i x_i y_i z_i$ ($i = 1 \sim 6$) побудовані для кожного компонента, показаного на рисунку 1, і кожен напрямок цих систем координат відповідно паралельний. Для зручності моделювання похибок передбачається, що це системи координат збігаються друг з одним.

2.2 Аналіз руху та опис тривісного плоскошліфувального верстата з ЧПК

Як згадувалося раніше, шліфувальний верстат є системою з кількома тілами, коли два сусідніх типових тіла в системі здійснюють відносний рух, цей рух можна розділити на два етапи: відносний нерухомий на початку та відносний рух після цього. Виходячи з цієї гіпотези, перетворення положення та орієнтації між двома сусідніми типовими тілами є множенням наступних чотирьох матриць, як показано у формулі (1): матриця перетворення ідеального положення та орієнтації та матриця похибок, коли тіла є відносно статичними, перетворення ідеального положення та орієнтації матриця та матриця похибок, коли тіла відносно рухаються. [3-4].

$$T_{ij} = T_{ijp} T_{ijpe} T_{ijs} T_{ijse} \quad (1)$$

Таким чином, можна запропонувати матриці перетворення положення та орієнтації між кожним компонентом шліфувального верстата.

2.2.1 Матриці перетворення положення та орієнтації, коли типові тіла є відносно статичними

Як показано на рис.1, заготовка закріплена на робочому столі, шпindel ь і шліфувальний круг встановлені на шпindel ьній коробці. Крім того, коли враховуються лише похибки прямокутності типові тіла є відносно статичними. Таким чином, матриці перетворення положення та орієнтації виводяться, як показано в наступних формулах. Усі матриці, які не згадуються, є одиничними.

$$T_{03pe} = \begin{pmatrix} 1 & -S_{xy} & 0 & 0 \\ S_{xy} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad T_{34pe} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & S_{xz} & 0 \\ 0 & 1 & -S_{yz} & 0 \\ -S_{xz} & S_{yz} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2.2.2 Матриці перетворення положення та орієнтації, коли типові тіла відносно рухаються

Заготовка фіксується на робочому столі, шпindel ь і шліфувальний круг встановлені на шпindel ьній коробці. Отже, всі матриці перетворення між ними є одиничними.

Коли робочий стіл рухається вздовж станини верстата на відстань x , матриці перетворення є наступними за матрицями, показаними у формулах.

$$T_{01s} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad T_{01se} = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} & \delta_{xx} \\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \delta_{yx} \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Таким же чином матриці можуть бути виведені, коли колона рухається вздовж станини верстата на відстань Y і коли шпindel ь рухається вздовж колони на відстань Z .

2.3 Геометрична модель поширення похибки шліфувального верстата

Припустимо, що однорідна координата формуючої точки на шліфувальному колі знаходиться в локальній системі координат $(O_6 x_6 y_6 z_6)$ та записана наступною формулою:

$P_t = (P_{tx} P_{ty} P_{tz} 1)^T$, то однорідна координата цієї утворюючої точки в базовій системі координат $(O_0 x_0 y_0 z_0)$ повинна бути врахована в наступній формулі (2). $L^m(t)$ і $L^{m-1}(t)$ – усі оператори показані в табл.1.

$$P_{0t} = \left(\prod_{m=r, L^r(t)=0}^{m=1} T_{L^m(t)L^{m-1}(t)} \right) P_t \quad (2)$$

Припустимо, що однорідна координата формування точки на заготовці в локальній системі координат $(O_2 x_2 y_2 z_2)$ показана в наступній формулі: $P_w = (P_{wx} P_{wy} P_{wz} 1)^T$, Тоді однорідна координата цієї твірної точки в координатній системі координати $O_0 x_0 y_0 z_0$ повинна бути такою, як зазначено у наступній формулі:

$$P_{0w} = \left(\prod_{n=r, L^n(w)=0}^{n=1} T_{L^n(w)L^{n-1}(w)} \right) P_w$$

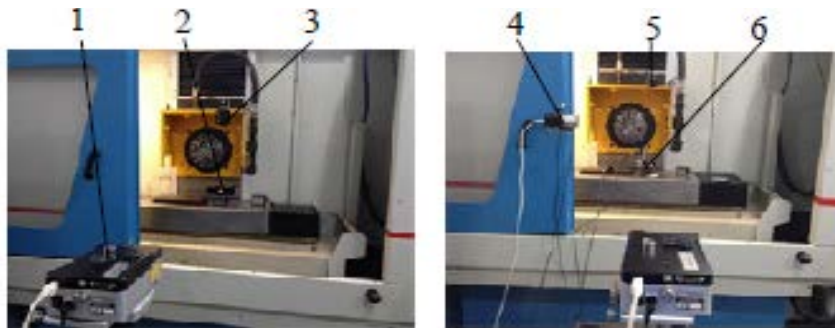
В ідеальній ситуації P_{0t} і P_{0w} повинні збігатися в робочому просторі в процесі обробки, однак на практиці P_{0t} і P_{0w} неминуче будуть відхилятися один від одного через різного роду похибки. Відхилення між ними є саме похибкою обробки, тобто формулою (3). У формулі E_x , E_y і E_z є тривимірними (x, y, z) компоненти похибки обробки.

$$E = (E_x E_y E_z 1)^T = P_{0t} - P_{0w}, \quad (3)$$

Формула (3) являє собою модель поширення геометричної похибки в триосьовому плоскошліфованому верстаті з ЧПК і складається з 21 змінної.

2.4 Експериментальна перевірка ефективності моделі поширення геометричної похибки

Похибки вимірюються за допомогою системи лазерного інтерферометра Lasertex LS10, лінійним методом Конкретний експеримент полягає в наступному. По-перше, робочий стіл і колона будуть нерухомі під час експерименту; по-друге, 19 точок вимірювання встановлюються в межах робочого діапазону в напрямку z; нарешті, тривимірні (x, y, z) похибки зміщення точки формування на шліфувальному колі та 21 геометрична похибка вимірюються в 19 точках. Схема вимірювання похибок показані на рис.4.



(а) вимірювання похибок прямолінійності б) вимірювання похибок позиціонування

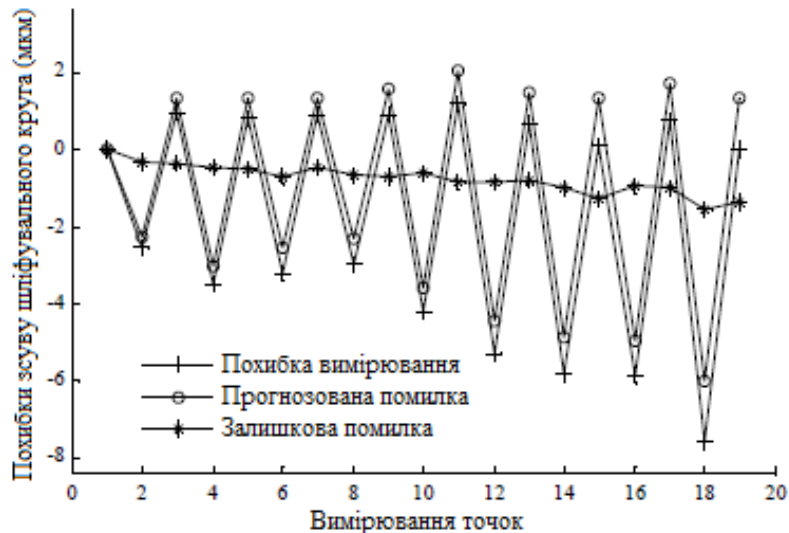
Рис. 4 – Схема вимірювання похибок

(1. Лазер Lasertex LS10, 2. Інтерферометр прямолінійності, 3. Рефлектор прямолінійності, 4. Компенсатор середовища Lasertex LS10, 5. Лінійний відбивач, 6. Лінійний інтерферометр)

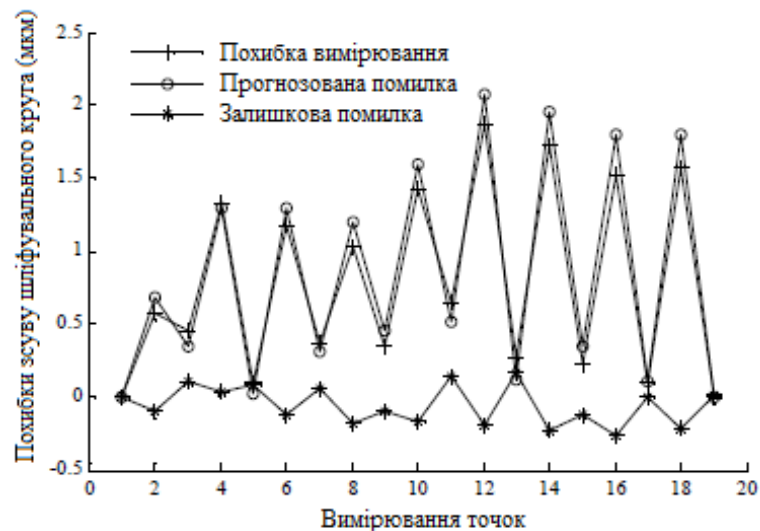
Похибки розташування формуючої точки на шліфувальному кругу вимірюються, як зазначено вище. Прогнозовані похибки обчислюються шляхом підстановки вимірної 21 геометричної похибки у формулу (2). Потім легко застосувати перевірку шляхом порівняння вимірних і прогнозованих похибок. Результати порівняння наведені на рис. 5 і табл. 3. Залишкові похибки отримують за вирахуванням вимірних похибок і прогнозованих похибок.

Таблиця 3 - Індекс ефективності моделі поширення геометричної похибки

Похибка розподілу	Похибки	Максимальне абсолютне значення (мкм)	Середнє значення (мкм)
x	Виміряно	7.575	-1.8132
	Залишок	1.570	-0.7470
y	Виміряно	1.875	0.7763
	Залишок	0.272	-0.0595
z	Виміряно	11.325	-5.7474
	Залишок	0.975	0.2552



(а) похибка розмірного зсуву шліфувального круга по X



(б) похибка розмірного зсуву шліфувального круга по Y

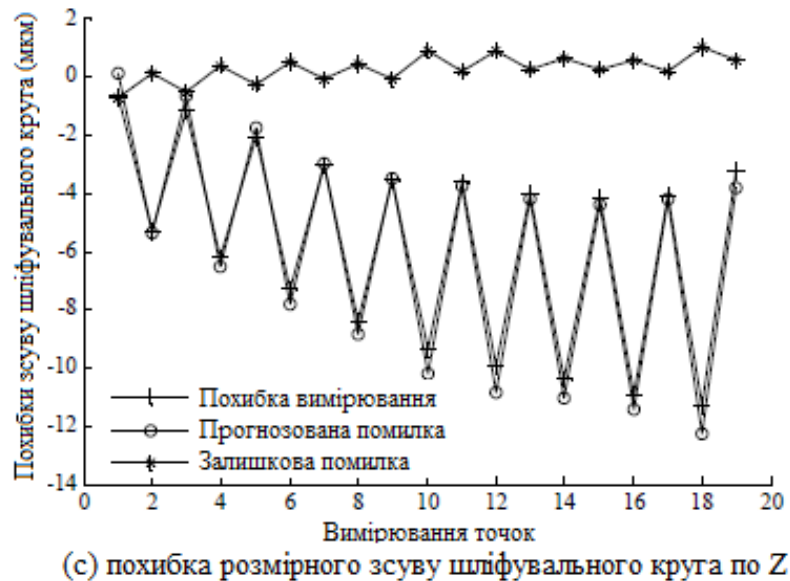


Рис. 5. - Порівняння вимірних похибок із прогнозованими. На основі аналізу даних на рис.5 і табл.3 легко з'ясувати, що прогнозовані похибки можуть сягати 80% вимірних похибок при мінімумі і 95% при максимумі. Таким чином, модель геометричного пагування має ідеальну точність прогнозування.

3. Ідентифікація ключової геометричної похибки для тривісного плоскошліфувального верстата з ЧПК

Ключові геометричні похибки - це змінні похибки, які сильно впливають на точність обробки, тобто вони чутливі до похибок обробки. Візьмемо для прикладу тривісний плоскошліфувальний верстат з ЧПК, змінні похибки, які мають великий вплив на Z -вимірну складову похибки обробки, можна розглядати як ключові геометричні похибки. У цьому документі ключові геометричні похибки ідентифікуються за допомогою ортогонального проектування та тестування параметрів методів DoE.

3.1 Ортогональне проектування та тестування параметрів 21 змінної геометричної похибки методів DoE

Ортогональне проектування — це метод DoE, який використовується для організації та наукового аналізу багатофакторного експерименту, передбачає одночасно зміну різних параметрів для визначення оптимальних значень. за допомогою ортогональної таблиці. Крім того, наскільки важливі зміни для результату експерименту, можна проаналізувати за допомогою дисперсійного аналізу.

Для ортогонального проектування 21 змінних геометричних похибок вибирається ортогональна таблиця $L_{54}(3^{25})$, в якій кожен фактор має три різні значення. Таблиця змінних значень підтверджується з урахуванням даних експерименту виміру похибок, як зазначено в табл.4.

Результати розраховуються за допомогою MATLAB та аналізуються за допомогою дисперсійного аналізу, як показано в табл.5. Символ «*» означає дуже значний [14].

Одиницею лінійної похибки в таб.4 є міліметр (мм), а одиницею кутових похибок і похибок прямокутності є радіан (рад), $0,01/1000=10 \times 10^{-6}=10$ рад. Для $F\alpha$ в табл.5 $\alpha=0,01$ або $0,05$.

Таблиця 4 - Таблиця значень ортогонального проектування

Рівні	δ_{xx}	δ_{xy}	δ_{xz}	δ_{yx}	δ_{yy}	δ_{yz}	δ_{zx}
1	5	4	2	0,4	3	1	0,2
2	9	10	6	1,2	6	2	0,6
3	13	16	10	2	9	3	1
Рівні	δ_{zy}	δ_{zz}	ϵ_{xx}	ϵ_{xy}	ϵ_{xz}	ϵ_{yx}	ϵ_{yy}
1	0,4	5	1	3	3	2	1
2	1,2	9	2	5	6	5	2
3	2	13	3	7	9	8	3
Рівні	ϵ_{yz}	ϵ_{zx}	ϵ_{zy}	ϵ_{zz}	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}
1	1	2	1	1	3	1	6
2	2	5	3	2	10	2	14
3	3	8	5	3	17	3	22

У таблиці 5 наведено результати по 13 змінним геометричної похибки: δ_{yx} , δ_{yy} , δ_{zx} , δ_{zy} , δ_{zz} , ϵ_{xx} , ϵ_{xy} , ϵ_{xz} , ϵ_{yx} , ϵ_{yy} , ϵ_{yz} , S_{yz} , S_{xz} .

Таблиця 5 - Таблиця дисперсійного аналізу ортогонального проектування

Змінні	Квадратична сума	Ступінь свободи	Середнє квадратичне відхилення	Значення функції (F)	F_{α}	Рівень скасування знака
δ_{xx}	6.4037e-09	2	3.2019e-09	9.6056e-01	3.3541;5.4881	
δ_{xy}	4.5593e-09	2	2.2796e-09	6.8389e-01	3.3541;5.4881	
δ_{xz}	8.4259e-09	2	4.2130e-09	1.2639e+00	3.3541;5.4881	
δ_{yx}	2.6044e-05	2	1.3022e-05	3.9067e+03	3.3541;5.4881	*
δ_{yy}	2.4875e-05	2	1.2437e-05	3.7312e+03	3.3541;5.4881	*
δ_{yz}	1.0115e-08	2	5.0574e-09	1.5172e+00	3.3541;5.4881	
δ_{zx}	6.0287e-06	2	3.0144e-06	9.0431e+02	3.3541;5.4881	*
δ_{zy}	2.3415e-05	2	1.1707e-05	3.5122e+03	3.3541;5.4881	*
δ_{zz}	5.8073e-04	2	2.9037e-04	8.7110e+04	3.3541;5.4881	*
ϵ_{xx}	9.6337e-08	2	4.8169e-08	1.4451e+01	3.3541;5.4881	*
ϵ_{xy}	2.1280e-07	2	1.0640e-07	3.1921e+01	3.3541;5.4881	*
ϵ_{xz}	8.2400e-07	2	4.1200e-07	1.2360e+02	3.3541;5.4881	*
ϵ_{yx}	7.0667e-07	2	3.5334e-07	1.0600e+02	3.3541;5.4881	*
ϵ_{yy}	6.3348e-08	2	3.1674e-08	9.5022e+00	3.3541;5.4881	*
ϵ_{yz}	1.9596e-07	2	9.7980e-08	2.9394e+01	3.3541;5.4881	*
ϵ_{zx}	4.5370e-09	2	2.2685e-09	6.8056e-01	3.3541;5.4881	
ϵ_{zy}	1.2470e-08	2	6.2352e-09	1.8706e+00	3.3541;5.4881	
ϵ_{zz}	7.9593e-09	2	3.9796e-09	1.1939e+00	3.3541;5.4881	
S_{xy}	3.9815e-09	2	1.9907e-09	5.9722e-01	3.3541;5.4881	
S_{yz}	7.9748e-08	2	3.9874e-08	1.1962e+01	3.3541;5.4881	*
S_{xz}	6.9433e-06	2	3.4717e-06	1.0415e+03	3.3541;5.4881	*
Обнулювальний	3.1548e-08	8	3.9435e-09	1.1831e+00	2.3053;3.2558	
Упереджене	9.0000e-08	27	3.3333e-09			
Всього	6.7031e-04	53				

3.2 Параметричний тест 21 змінної геометричної похибки

Параметричний тест також проводимо методом DoE, який використовується для аналізу чутливості до відгуку відносно кожного фактора конструкції незалежно, тобто аналізу впливу на відгук шляхом зміни лише одного фактора за раз. Відповідно до формули (3) виводиться формула (4). Перевірка параметрів 21 змінної геометричної похибки виконується на основі формули (4). Символ u_i ($i=1,2,\dots,21$) вказує на 21 змінну геометричної похибки.

Усі початкові значення 21 змінної геометричної похибки дорівнюють нулю, значення мікрозміни змінних лінійної похибки становить 0,001мм, значення мікрозміни кутових похибок і похибок прямокутності становлять 10 рад.

Наступні дві речі можна знайти шляхом аналізу результатів перевірки параметрів, як показано в табл.6.

1) Для кожної змінної лінійної похибки відхилення похибки обробки чисельно дорівнює значенню мікрозміни, але значення може бути додатним або від'ємним. Крім того, похибки напрямку x можуть спричинити відхилення розмірної похибки обробки X , а також похибки напрямку Y та Z .

2) Існує велика різниця у відхиленні похибки обробки, спричиненій кожною кутовою похибкою або похибкою перпендикулярності, але абсолютне значення в основному однакове. Крім того, існує ефект посилення між змінними геометричної похибки та похибкою обробки. Усі похибки, які впливають на Ez , є чутливими змінними похибок і потребують ретельного контролю в процесі проектування верстатів.

Таблиця 6 - Результати перевірки параметрів

Змінні похибки		Результат відхилення		
		$\Delta Ex/mm$	$\Delta Ey/mm$	$\Delta Ez/mm$
Лінійні	δ_{xx}	1.00e-03	0	0
	δ_{xy}	-1.00e-03	0	0
	δ_{xz}	-1.00e-03	0	0
	δ_{yx}	0	1.00e-03	0
	δ_{yy}	0	-1.00e-03	0
	δ_{yz}	0	-1.00e-03	0
	δ_{zx}	0	0	1.00e-03
	δ_{zy}	0	0	-1.00e-03
	δ_{zz}	0	0	-1.00e-03
Кутова	ε_{xx}	0	0	5.00e-04
	ε_{xy}	0	0	-4.50e-04
	ε_{xz}	0	-5.00e-05	-4.50e-04
	ε_{yx}	0	0	-5.00e-04
	ε_{yy}	0	0	5.50e-04
	ε_{yz}	5.00e-05	0	5.50e-04
	ε_{zx}	-5.00e-04	5.00e-04	0
	ε_{zy}	4.50e-04	-5.50e-04	0
	ε_{zz}	4.50e-04	-5.50e-04	0
Прямокутність	S_{xy}	5.00e-04	-5.50e-04	0
	S_{yz}	0	0	-4.50e-04
	S_{xz}	0	0	5.50e-04

4. Розподіл допусків ключових змінних геометричних похибок

Функція втрати якості від точності обробки виведена з використанням методології поверхні відгуку відповідно до теорії робастного проектування. (проектування якісних систем (інжиніринг якості) називається робастним проектуванням. Це такий підхід до проектування, який полягає у зменшенні розкидів вихідних характеристик шляхом використання таких методів, які зменшують чутливість до джерел розкидів. Точки вибірки виходять з використанням латинського гіперкуба оптимальної форми методу DoE та програмного забезпечення Isight, після чого після аналізу витрат та відстеження похибок

створюється модель якості та вартості обробки. Допуски ключових змінних геометричних похибок: розподіляються за моделлю.

4.1 Функція втрати якості від точності обробки

Якісна характеристика точності обробки відноситься до типу STB (чим менше, тим краще), і легко зрозуміти, що функція потері якості є функцією ключових змінних геометричних похибок, як зазначено в наступній формулі. $V = (v_1, v_2 \dots v_{11})$ вказує на 11 ключових геометричних похибок, K — коефіцієнт втрати якості, який є константою.

$$L(y) = Ky^2 = G(V)$$

Якщо Y (якісна характеристика продукції) характеризує випадковість, тобто $L(y)$ є випадковою величиною, то функцію потері якості можна виразити через її очікуване значення [15], як показано у формулі (5). Сучасна теорія точного механічного проектування вказує на те, що геометричні погрішності станків є випадковими величинами, слідує, погрішності обробки, викликані цими погрішностями, а також є випадковими величинами, тоді як функцію якості точності обробки можна виразити формулою (5).

$$E\{L(y)\} = KE\{y^2\} = K(\sigma_y^2 + \mu_y^2) \quad (5)$$

Відповідно до формули (3), функція втрат якості точності обробки складна та нелінійна, і важко безпосередньо визначити очікуване значення функції. Як аналізувалося вище, функція втрати якості точності обробки виводиться з використанням методології поверхні відгуку, як показано у формулі (6).

$$\hat{L}(y) = \hat{G}(V) = a_0 + \sum_{i=1}^{11} b_i v_i + \sum_{i < j}^{11} c_{ij} v_i v_j + \sum_{i=1}^{11} d_i v_i^2$$

У цій формулі a_0, b_i, c_{ij}, d_i всі невідомі коефіцієнти, всього 78 пунктів. Ці коефіцієнти будуть вирішуватися шляхом розрахунку ряду точок вибору.

$$C_q(y) = E\{\hat{L}(y)\} = a_0 + \sum_{i=1}^{11} b_i \mu_{v_i} + \sum_{i < j}^{11} c_{ij} \mu_{v_i} \mu_{v_j} + \sum_{i=1}^{11} d_i (\mu_{v_i}^2 + \sigma_{v_i}^2) \quad (6)$$

Загалом можна вважати, що геометричні похибки підкоряються нормальному розподілу, тоді середнє значення μ , дисперсія σ та допуск T змінних геометричної похибки мають співвідношення, як зазначено в наступній формулі (7):

$$\begin{cases} \mu = 0 \\ T = 6\sigma \end{cases} \quad (7)$$

Згідно з формулами (6) та (7), функція втрати якості точності обробки може відповідати допуску, як показано у формулі (8).

$$C_q(T) = a_0 + \sum_{i=1}^{11} d_i \left(\frac{T_i}{6}\right)^2 \quad (8)$$

4.2 Модель «вартість-якість» для відхилень ключових змінних геометричних похибок

Загалом витрати на продукт протягом усього життєвого циклу включають витрати на виробництво і вартість використання. Більше того, що вища якість продукції, то вища вартість виробництва та нижча вартість використання.

Отже, вартість використання прямопропорційна втрати якості продукту [7, 9], як зазначено у формулі (9), де коефіцієнт пропорційності λ є константою.

$$C_u(T) = \lambda E\{L(y)\} = \lambda C_q(T) \quad (9)$$

Моделі допустимих витрат на обробку вибираються для вираження зв'язків між виробничою вартістю та припущеннями похибок після відстеження ключових геометричних похибок. Для 11 ключових геометричних похибок відповідні зв'язки з точністю деталей шліфувальних верстатів є такими [5, 8]:

(1) δ_{zz} відповідає накопиченій похибці кроку гвинта, пов'язаної з точністю виготовлення пари гвинтів та гайок;

(2) δ_{zy} , δ_{zx} , ε_{xz} , ε_{xy} та ε_{yx} відповідають похибкам прямолінійності напрямних у вертикальній площині;

(3) ε_{yz} відповідає похибці прямолінійності напрямних у горизонтальній площині;

(4) ε_{xx} та ε_{yy} відповідають похибкам паралельності напрямних;

(5) S_{xz} і S_{yz} пов'язані з похибками прямолінійності та довжиною напрямних.

Прямолінійність та паралельність напрямних пов'язані з геометрією напрямних, яка відповідає розміру плоского елемента; тоді як крок гвинта можна представити як розмір елемента позиціонування.

Відповідно до наведеного вище аналізу, для цих десяти похибок:

δ_{zy} , δ_{zx} , ε_{xz} , ε_{xy} , ε_{yx} , ε_{yz} , ε_{xx} , ε_{yy} , S_{xz} і S_{yz} - модель допусків за ціною обробки вибираємо як геометричний розмір, що належить плоскому елементу;

для похибок позиціонування δ_{zz} вибирається модель стійкого допуску для обробки розміру геометричної форми, що належить елементу позиціонування [8], моделі показані в наступних формулах:

$$C(T) = \begin{cases} 5.0261e^{-15.8903T} + \frac{T}{0.3927T + 0.1176} & T \leq 0.165 \\ 1.273338 & T > 0.165 \end{cases}$$

$$C(T) = \begin{cases} 13.3114Te^{\frac{0.0438}{T}} + 7.6593e^{-25.1731T} & T \leq 0.11 \\ 1.463467 & T > 0.11 \end{cases}$$

Тоді собівартість виробництва всього шліфувального верстата є сумою всіх витрат, зазначених у формулі (10):

$$C_m(T) = \sum_{i=1}^{11} C_i(T_i) \quad (10)$$

Відповідно до формули (8)~(10) цільова функція мінімальної вартості та якості розподілу допусків ключових змінних геометричної похибки пропонується у вигляді наступної формули:

$$QC(T) = WC_q(T) + (1-W)[C_m(T) + C_u(T)]$$

$W \in (0 \sim 1)$ — це ваговий коефіцієнт, який зазвичай дорівнює 0,5, щоб визначити, що якість продукції має пріоритет над вартістю. Насамкінець виходить модель «витрати-якість» для розподілу допусків. Ключові змінні геометричні похибки представлені у формулі (11):

4.3 Проектування в розподілі допусків ключових змінних геометричних похибок.

По-перше, прийнято 11 геометричних похибок у якості змінних і похибок обробки по осі Z в якості цільової, на основі даних експерименту з вимірювання похибок, точки вибору отримуються з використанням оптимального латинського гіперкуба DoE. Потім коефіцієнти моделі апроксимації поверхні відклику, то є функція потереі якості, вирішуються з використанням цих точок вибору на підставі формули (8), як показано в таблиці 7.

Таблиця 7 - Коефіцієнти апроксимаційної моделі поверхні відгуку

Коефіцієнт	a_0	d_1	d_2	d_3
Значення	-3.595e-07	0.7723	0.9551	0.9989
Коефіцієнт	d_4	d_5	d_6	d_7
Значення	-19134.8719	-2444.9415	-504.2572	-6378171
Коефіцієнт	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}
Значення	-19605.4703	-20217.9712	-19748.3418	2584.6473

Щоб переконатися, що апроксимаційна модель поверхні відгуку може замінити реальну модель для подальших досліджень, проводиться адаптивний тест, результат якого показаний в таблиці 8, де R^2 - коефіцієнт детермінації, R_a^2 - скоригований коефіцієнт детермінації, всі вони використовуються для перевірки надійності апроксимаційної моделі. Значення надійності моделі знаходиться у допустимому діапазоні ($> 0,9$).

Таблиця 8 - Результати перевірки надійності моделі

	$L(y)$
R^2	0.9999
R_a^2	0.997

Первичні допуски ключових змінних похибок, підтвержені відповідно до загальної точності, і можуть забезпечити наявний стан відповідно до стандарту, як показано в табл. 9.

Таблиця 9 - Допуски змінних геометричної похибки

Змінна	δ_{zx}	δ_{zy}	δ_{zz}	ϵ_{xx}
Допуск/мм	0.005-0.010	0.005-0.010	0.005-0.015	0-0.04/1000
Змінна	ϵ_{xy}	ϵ_{xz}	ϵ_{yx}	ϵ_{yy}
Допуск/мм	0-0.04/1000	0-0.04/1000	0-0.04/1000	0-0.04/1000
Змінна	ϵ_{yz}	S_{yz}	S_{xz}	
Допуск/мм	0-0.04/1000	0-0.04/300	0-0.02/500	

Прийнявши $W= 0,7$, $\lambda = 1$, згідно з моделлю «витрати-якість», розподіл допусків ключових змінних геометричної похибки оптимізується, як показано в табл. 10.

Таблиця 10 - Стійкі розрахункові значення допусків змінних геометричної похибки

Змінна	δ_{zx}	δ_{zy}	δ_{zz}	ϵ_{xx}
Допуск/мм	0.0100	0.0097	0.0149	0.0393/1000
Змінна	ϵ_{xy}	ϵ_{xz}	ϵ_{yx}	ϵ_{yy}
Допуск/мм	0.0303/1000	0.0298/1000	0.0333/1000	0.0276/1000
Змінна	ϵ_{yz}	S_{yz}	S_{xz}	
Допуск/мм	0.0333/1000	0.0388/300	0.0030/500	

Висновки

1) Встановлено модель поширення геометричної похибки та експериментально підтверджено, що модель має ідеальні прогностичні характеристики.

2) Ключові змінні геометричні похибки були ідентифіковані за допомогою ортогонального проектування та перевірки параметрів методом DoE.

Змінними є наступні 11: δ_{zy} , δ_{zx} , ϵ_{xz} , ϵ_{xy} , ϵ_{yx} , ϵ_{yz} , ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , S_{xz} і S_{yz}

3) Функція втрати якості точності обробки була виведена з використанням методології поверхні відгуку відповідно до теорії робастного проектування. Модель точності обробки «витрати-якість» була створена після аналізу витрат та відстеження похибок. На основі досліджень, наведених вище, допуски ключових змінних геометричних похибок розподілені.

Дослідження показують, що теоретична основа та практичне забезпечення високої ефективності, економічності та розумного розподілу геометричної точності шліфувального верстата може значно підвищити точність обробки, продуктивність шліфувального верстата та забезпечити високу надійність усієї системи.

Список використаних джерел:

1. Волошин В. Н. Формоутворюючі можливості п'ятикоординатного фрезерного верстату з ЧПУ / В. Н. Волошин, В. В. Луців // *Актуальні задачі сучасних технологій* : зб. тез доп. 7-ї міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів. – Тернопіль, 2018. – Т. 1. – С. 56–57.
2. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах : монографія / Ю. М. Кузнецов, І. В. Луців, О. В. Шевченко, В. Н. Волошин ; упоряд. Ю. М. Кузнецов. – Київ ; Тернопіль : Терно-граф, 2011. – 692 с.
3. Lutsiv I. Shape forming system model of lathes two-carriage tool systems / I. Lutsiv, V. Voloshyn, V. Buhovets // *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. – 2018 – № 3. – Рр. 80-87.
4. Lutsiv I. Definition of component elements position errors of integrated self-adjusting equipment for turning / I. Lutsiv, V. Voloshyn, V. Buhovets // *Technological Complexes*. – 2016. – № 1. – Рр. 98-105.
5. Решетов Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.
6. Портман В. Т. Универсальный метод расчета точности механических устройств / В. Т. Портман // *Вестник машиностроения*. – 1981. – № 7. – С. 12-16.
7. Портман В. Т. Модель выходной точности станка / В. Т. Портман, В. Г. Шустер // *Вестник машиностроения*. – 1983. – № 9. – С. 30-33.
8. Ивахненко А. Г. Точность формообразования на гексаподах / А. Г. Ивахненко, О. Н. Подленко // *СТИН*. – 2007. – № 9. – С. 2–6.
9. Марчук В. І. Автоматизоване управління точністю оброблення деталей : монографія / В. І. Марчук, В. Т. Михалевиц. – Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2013. – 184 с.
10. Струтинський В. Б. Підвищення точності металорізальних верстатів на основі чисельних розрахунків еліпсоїдів жорсткості / В. Б. Струтинський, В. М. Чуприна, О. Я. Юрчишин // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Технології в машинобудуванні. – 2015. – № 40. – С. 78–84.
11. Струтинський В. Б., Дрозденко В. М. Динамічні процеси в металорізальних верстатах : монографія. Київ : Основа-Принт, 2010. 440с.
12. Математичне моделювання систем і процесів : навч. посіб. / П. М. Павленко, С. Ф. Філоненко, О. М. Чередніков, В. В. Трейтяк. – Київ : НАУ, 2017. – 392 с.
13. Румбешта В. О. Системи керування якістю виготовлення виробів : курс лекцій по курсу / В. О. Румбешта. – Київ : НТУУ «КПІ», 2000. – 85 с.
14. Єгоршин О. О. Довідник з математичної статистики з прикладами обчислень у MatLab. Ч. 2 : навч.-практ. посіб. / О. О. Єгоршин, Л. М. Малярець, Б. В. Сінкевич. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2009. – 508 с.
15. Бахрушин В. Є. Методи аналізу даних : навч. посіб. / В. Є. Бахрушин. – Запоріжжя : КПУ, 2011. – 268 с.

References:

1. Voloshyn, VN & Lutsiv, VV 2018, 'Formoutvoriuiuchi mozhlyvosti piatykoordynatnoho frezernoho verstatu z ChPU' [*Form-forming capabilities of a five-coordinate CNC milling machine*], *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnologii*, Vol. 1, Pp. 56–57.

2. Kuznietsov YuM, Lutsiv, IV, Shevchenko, OV, & Voloshyn, VN 2011, *Tekhnolohichne osnashchennia dlia vysokoefektyvnoi obrobky detalei na tokarnykh verstatakh [Technological equipment for highly efficient processing of details on lathes]*, Terno-hraf, Kyiv.
3. Lutsiv, I, Voloshyn, V & Buhovets, V 2018, 'Shape forming system model of lathes two-carriage tool systems', *Scientific journal of the Ternopil national technical university*, no 3, Pp. 80-87.
4. Lutsiv, I, Voloshyn, V & Buhovets, V 2016, 'Definition of component elements position errors of integrated self-adjusting equipment for turning', *Technological Complexes*, no 1, Pp. 98-105.
5. Reshetov, DN & Portman, VT 1986, *Tochnost metallorezhushchykh stankov [Accuracy of metal cutting machines]*, Mashynostroeniye, Moskva.
6. Portman, VT 1981, 'Universal'nyj metod rascheta tochnosti mehanicheskikh ustrojstv' [*Universal method of calculating the accuracy of mechanical devices*], *Vestnik mashynostroeniya*, no 7, Pp. 12-16.
7. Portman, VT & Shuster, VH 1983, 'Model' vyhodnoj tochnosti stanka' [*Model of machine tool output accuracy*], *Vestnik mashynostroeniya*, no 9, Pp. 30-33.
8. Yvakhnenko, AH & Podlenko, ON 2007, 'Tochnost' formoobrazovaniya na geksapodah' [*Accuracy of forming on hexapods*], *STYN*, no 9, Pp. 2-6.
9. Marchuk, VI & Mykhalevych, VT 2013, *Avtomatyzovane upravlinnia tochnistiu obroblennia detalei [Automated control of the accuracy of parts processing]*, RVV LNTU, Lutsk.
10. Strutynskiy, VB, Chupryna, VM & Yurchyshyn, OYa 2015, 'Pidvyshchennia tochnosti metalorizalnykh verstativ na osnovi chyselnykh rozrakhunkiv elipsoidiv zhorstkosti' [*Increasing the accuracy of metal cutting machines based on numerical calculations of stiffness ellipsoids*], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Tekhnolohii v mashynobuduvanni*, no 40, Pp. 78-84.
11. Strutynskiy, VB & Drozdenko, VM 2010, *Dynamichni protsesy v metalorizalnykh verstatakh [Dynamic processes in metal cutting machines: monograph]*, Osnova-Prynt, Kyiv.
12. Pavlenko, PM, Filonenko, SF, Cherednikov, OM & Treytyak, VV 2017, *Matematychni modeliuvannia system i protsesiv [Mathematical modeling of systems and processes]*, NAU, Kyiv.
13. Rumbeshta, VO 2000, *Systemy keruvannia yakistiu vyhotovlennia vyrobiv [Product quality management systems]*, NTUU «KPI», Kyiv.
14. Yehorshyn, OO, Maliarets, LM & Sinkevych, BV 2009, *Dovidnyk z matematychnoi statystyky z prykladamy obchyslen u MatLab. Ch. 2 [Handbook of mathematical statistics with examples of calculations in MatLab: educational and practical guide. Part 2]*, Vyd. KhNEU, Kharkiv.
15. Bakhrushyn, VYe 2011, *Metody analizu danykh [Methods of data analysis]*, KPU, Zaporizhzhia.

Стаття надійшла до редакції 25 квітня 2024 року.