

Д. В. Янюк*Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна**e-mail: yanyuk_10719366@lutsk-ntu.com.ua*

Оцінка стабільності осьового позиціонування торця довгомірної циліндричної заготовки при автоматичній подачі у верстаті

Запропоновано єдину рамку для параметричної оцінки ймовірності потрапляння торця заготовки в допуск його номінального положення. Процес розглянуто як нормальну непараметричну біноміальну модель, та проведено оцінку частки відповідності з довірчими інтервалами, виведено індекс здатності процесу та оцінку невизначеності, включно з визначенням толерансних інтервалів. Практична значущість полягає у формуванні прийнятних критеріїв якості без зупинки виробництва та без витрат на спеціальні експерименти.

обробка різанням, модель точності положення, стратегія обробки, параметри обробки, оптимізація обробки, підсистеми верстата, фіксація у шпиндельному вузлі

Постановка проблеми. Показники ефективності обробки методом різання у масовому та супермасовому виробництвах визначаються в значній мірі рівнем її автоматизації. Механічна обробка, що виконується автоматично, проводиться ґрунтуючись на утворенні розміру оброблюваних поверхонь відповідно до побудованої програми переміщень інструментів системі координат верстата. Одним з найбільш поширених методів формування заготовки в токарних автоматах є застосування автоматичної подачі довгомірного пруткового матеріалу. Досягнення необхідних характеристик даного процесу є однією з важливих умовою досягнення високої продуктивності автоматичної обробки у масовому та супермасовому виробництві.

На практиці доступна інформація у вигляді наборів результатів про параметри автоматичної подачі довгомірних пруткових заготовок спеціальними машинами типу барфідер. При цьому, відсутня уніфікована статистична процедура для обчислення й інтерпретації ймовірності отримання певного необхідного осьового положення торця заготовки в системі координат верстата після її автоматичної подачі. Це призводить до неоднорідності критеріїв якості процесу формування заготовки з довгомірного пруткового матеріалу шляхом її автоматичної подачі та в значній мірі визначає зміщення осьового положення її торця відносно номінальних значень в системі координат верстата. Така ситуація вимагає застосування у процесі автоматичної обробки додаткових операцій обробки площини торцевої поверхні заготовки, а саме підрізання торця.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи [1,2] Вказують про необхідність точного позиціонування інструмента у токарних верстатах, ігноруючи підвищення ефективності обробки за рахунок зменшення припуску через швидку та точну установку пруткової заготовки [3]. Результати праці [4] вказують на підвищення показників позиційної точності інструменту токарного верстата на 50-80% завдяки введенні корекцій у переміщеннях його вузлів на заздалегідь визначені відхилення від бажаних позицій, що підкреслює необхідність точного прогнозування та визначення статистичних похибок. Для підвищення точності позиціонування робочих органів верстатів [5, 6] автори використовували тензодатчики, завдяки яким можна досягнути

розкиду показників у декілька мікрон, якщо застосувати методи корекції температурних відхилень [7]. В статті [8] автори розробили методику прогнозування ряду параметрів металорізального верстату завдяки статистичному моделюванню, однак не розглянули можливості застосування методу програмного прогнозування для оцінки точності осьового позиціонування заготовки. Автор у [9] дослідив вплив похибок сервоприводів на позиційну точність прутка, та надав рекомендації, які можуть зменшити їх вплив на загальне середньостатистичне відхилення торця заготовки від бажаної позиції. Робота [10] містить інформацію про сили, що виникають у затискних пристроях металообробних верстатів однак не розглядає вплив цих зусиль на заготовку та на похибки, які виникають у процесі її фіксації.

Постановка завдання. Зменшення припуску на підрізання торця або уникнення даної операції можна досягнути шляхом забезпечення необхідної точності осьового позиціонування в системі координат верстата торця, що сформований відрізанням виготовленої деталі. Це створює передумови зменшенню ресурсних та енергетичних витрат на даний вид обробки. Отже, розвиток статистичних методик до оцінки точності осьового позиціонування торця заготовки, що спирається на пасивні дані, і забезпечує метрологічну коректність їх обробки та придатність результатів до оперативного застосування визначає актуальність даної роботи.

Виклад основного матеріалу. Створення методики має на меті формалізований опис сукупності параметрів, які описують підходи статистичних методів при оцінці позиціонування прутка. Такий підхід дозволяє перейти від певного рівня суб'єктивних оцінок процесу позиціонування довгомірної заготовки до кількісного керування можливостями забезпечення параметрів його подачі із підвищенням рівня прогнозованості результату потрапляння у поле номінального положення торця заготовки. В основу розробки теорії покладено наступні ключові положення:

- наявна похибка осьового позиціонування прутка є сумою систематичної та випадкової складових, що мають у своїй основі різні причини та вимагають різних способів для усунення;
- якісна характеристика визначається імовірісно, де цільова функція розташування торця прутка в системі координат верстата спрямована на досягнення номінального значення, але береться до уваги реальний значно нижчий показник, що забезпечує потрапляння в поле допуску;
- контроль повинен базуватися на вимірюванні та аналізі параметрів подачі і забезпечувати умови для можливості здійснення корекції у замкнутому циклі управління процесом автоматичної подачі пруткової заготовки. Для підвищення точності та ефективності методів контролю доцільно скористатись пристроями та алгоритмами оптичного розпізнання положення [1].

Для формального аналізу процесу подачі прутка доцільно застосовувати окремі групи параметрів: L_{set} – задана довжина подачі прутка, як цільове значення, що формується у вигляді керуючої команди системи подачі; L_1 – фактична величина подачі прутка після її завершення, але до здійснення затиску заготовки; L_2 – фактична довжина заготовки після затиску як доступна для обробки; $\Delta = L_2 - L_{set}$ – Похибка осьового положення торця заготовки визначена різницею реального та заданого осьового положення заготовки. Дана похибка є головною випадковою величиною для статистичного аналізу процесу формування заготовки шляхом автоматичної подачі прутка. На її основі обчислюють параметри даного процесу з метою можливості формальної оцінки доцільності прийняття інженерних рішень його покращення.

Розглянуті геометричні параметри дають можливість розробки формального опису основних чотирьох сценаріїв формування осьового позиціонування торця пруткової заготовки при її автоматичній подачі у верстат (рис. 1).

Еталонне положення без підрізання (рис.1 а): $|\Delta| \leq T$, де T – половина двобічного допуску, як ширина вікна «прийнятності» $[-T, +T]$ навколо ідеального положення Z_0 .

Фізично це допуск на виступ торця перед початком циклу обробки. Якщо після подачі й затиску торець заготовки співпадає з програмною площиною $Z=0$ верстата в межах встановленого допуску, тоді торець, що лишився після відрізання попередньої деталі, використовується як готова база для наступного циклу. Як наслідок, це дає можливість не виконувати прохід у площині торця і цикл обробки скорочується.

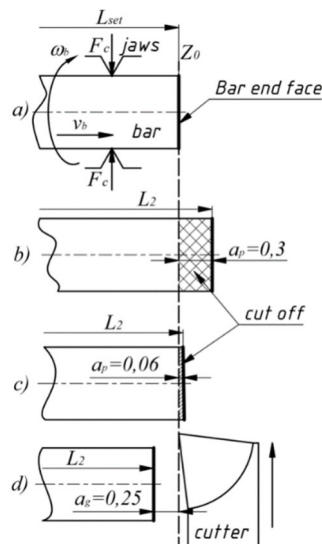


Рисунок 1 – Варіанти положення торця заготовки сформованої автоматичною подачею прутка
Джерело: розроблено автором

Прийнятний варіант із малим припуском на торцювання (рис.1 c): торець виступає за площину $Z=0$ на малу величину a_p , порядку сотих міліметра. Передбачається прохід різця з мінімальним зняттям матеріалу з торця у напрямку $-Z$ до $Z=0$ з метою забезпечення точного осьового розміру. Витрати, спричинені споживанням енергії, і зносом інструменту при цьому процесі мінімальний, що визначає позитивний вплив на техніко-економічні показники обробки.

Прийнятний, але гірший варіант із необхідністю зняття великого припуску (рис.1 b): значний виступ торця за $Z=0$ формує великий припуск на торцювання a_p , що збільшує кількість видаленого матеріалу, витрати енергії, знос інструменту, можливі ускладнення стружкоутворення та і.н. Для керування процесом рекомендується: звузити розкид налаштуванням барфідера, наприклад (стабілізацією осьової сили подачі), внести відповідний зсув, якщо лінійний осьовий припуск на торцювання, тобто відстань вздовж осі Z між фактичним торцем після затиску та цільовою площиною $Z=0$ є величина систематично позитивна. Рекомендується провести інженерні заходи для налаштувань параметрів процесу подачі для його наближення до вище описаних випадків позиціонування.

Неприйнятний варіант, недоподача (рис.1 d): виникає коли торець прутка не доходить до програмної площини $Z=0$. Після затиску тіло заготовки не перетинає програмної площини і її довжини не вистачає для забезпечення розміру. Дії не здатні компенсувати від'ємний дефіцит довжини і осьовий розмір деталі в цьому циклі не може бути забезпечений. Деталь потрапляє у невиправний брак а подальша робота повинна бути припинена до налаштування параметрів подачі. Рекомендовано перезапуск циклу з повторною подачею до затиску. Можливими джерелами даної критичної помилки може бути комбінація помилки подачі та надмірного втягування під час затиску. Рекомендації для даного випадку стосуються оцінки значення величини подачі барфідером до затиску. Якщо ця величина менша ніж необхідний розмір – виконати переналаштування, величини подачі, результат якої буде одним із трьох варіантів: a), b), c) (рис.1).

Для кількісної оцінки відхилення осевого положення заготовки, описаного похибкою Δ , пропонується використовувати наступні статистичні параметри:

- μ – систематична похибка осевого положення заготовки, що визначає систематичний зсув значень її позиціонування, тобто середнє відхилення Δ як середнє всіх випадків позиціонування. Наприклад, коли подача стабільно більша на 0,04 мм.

- σ – виражає повторюваність процесу осевого позиціонування як розкид між циклами подачі за фіксованих умов. Для визначення вибіркового середнього та стандартного відхилення $\{\Delta_i\}$ також бажано враховувати поправку на «шум» засобу вимірювання за методологією оцінки похибки вимірювання положення торця. Таким чином значення μ може бути компенсоване калібруванням процесу подачі а σ можна зменшити інженерними засобами типу стабілізації умов прошивування прутка. Обидва параметри входять у C_{pk} та P_{ok} .

- $P_{ok}=P(|\Delta|\leq T)$ – ймовірність відповідності, що означає відсоткову частку циклів у яких торець потрапляє у допуск, тобто вказує на ймовірність появи його встановленого правильного положення. Визначення може здійснюватися параметрично за виконання вимог до нормальної моделі (за функцією стандартного нормального розподілу Φ):

$$P_{ok}=\Phi((T-\mu)/\sigma)-\Phi((-T-\mu)/\sigma), \quad (1)$$

або непараметрично як емпірична частка $\{|\Delta_i|\leq T\}/n$ з біноміальними довірчими межами.

- $C_{pk}=(T-|\mu|)/3\sigma$ – індекс відповідності процесу позиціонування. Фізична суть індексу є безрозмірною оцінкою наскільки стабільно процес позиціонування прутка вкладається в допуск з урахуванням центрованості та розкиду. Геометрично це означає скільки «трисигмових» інтервалів вкладається в допуск до найближчої межі.

Установлення порогів прийнятності (табл. 1) може застосовуватися як швидкий скалярний індикатор покращення після змін налаштувань процесу подачі. За центрованого процесу P_{ok} монотонно зростає з C_{pk} .

Таблиця 1 – Можлива фізична інтерпретацію якості фіксації через величину C_{pk}

C_{pk}	Якість процесу	Брак	Фізичний зміст
<1,0	Незадовільна	> 2700 ppm*	Процес не вкладається в допуск
1,0	Мінімальна	2700 ppm	3 σ в допуску
1,33	Задовільна	63 ppm	4 σ в допуску
1,67	Хороша	3,4 ppm	5 σ в допуску
$\geq 2,0$	Відмінна	~ 0 ppm	6 σ в допуску

*- parts per million 1ppm = 0,0001%

Джерело: розроблено автором

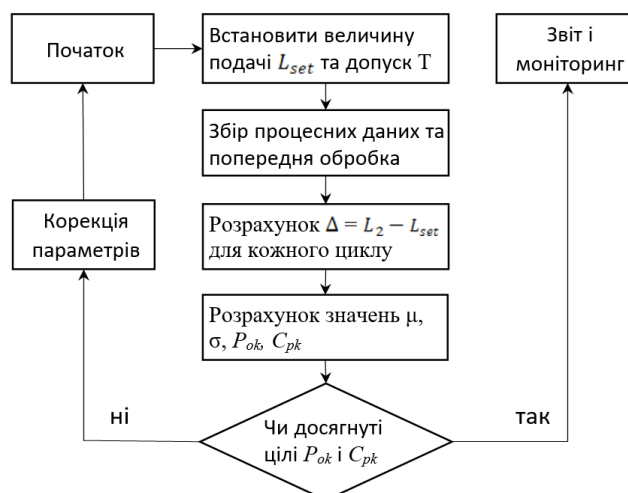


Рисунок 2 - Послідовність обробки інформації для прийняття рішень окращення параметрів позиціонування
Джерело: розроблено автором

За результатами досліджень запропоновано алгоритм обробки даних (рис. 2) про процес позиціонування торця прутка відносно опорної площини Z_{ref} і допусків T . Алгоритм спрямований на агрегування значень середнього μ , та стандартного відхилення σ з розраховуванням формальних показників процесу P_{ok} і C_{pk} . Порівняння результатів обробки інформації з цільовими пороговими значеннями дає можливість автоматизації прийняття або ініціювання корекції параметрів роботи системи подачі.

Висновки. Результати роботи сприяють розробці дієвих методів зменшення середнього зміщення та розкиду осевого положення торця пруткової заготовки, що сформована методом автоматичної подачі. Це знижує потребу в підрізанні торця і, як наслідок, втрати сировини й енергії, що критично для високої завантаженості обладнання у масовому та супермасовому виробництві.

Переваги запропонованого комплексного підходу оцінки точності осевого позиціонування торця є основою засобів для ряду функціональних напрямків і зокрема, для оператора: раннє попередження про проблеми, об'єктивні критерії для втручання, та технолога, оскільки дають статистично обґрунтовані рішення, сприяють оптимізації періодичності обслуговування, аналізу причин деградації процесу та інше. Разом вони формують замкнену статистичну рамку, яка напругу підтримує інженерні дії.

Запропоновані підходи створюють основу для впровадження статистичного керування процесами, що забезпечує чутливість як до дрібних дрейфів μ , так і до падіння фактичної частки відповідності вдалих позиціонувань прутка. Сформовано формальні практичні тригери змін параметрів процесу подачі та виявлено методи встановлення валідності і обмеження, тому отримані результати дають можливість формування алгоритму дій, який перетворює статистичні сигнали з контрольних карт на конкретні інженерні та технологічні рішення покращення роботи системи автоматичної подачі прутка.

Отримані результати спираються на процесні дані, тому можуть бути однаково застосовні до різних номенклатур, діаметрів і технологічних ліній. Як подальший розвиток доцільними для розробки можуть бути: ієрархічні моделі для обробки багаторівневих даних «партія-лінія-зміна»; інтеграція з цифровими базами даних для автоматизованого прийняття рішень.

Список літератури

1. Contactless measurement of error in lathe tool positioning / S. Kumari та ін. 2023 *3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*, м. Hubli, India, 23–25 черв. 2023 р. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/CONIT59222.2023.10205386>.
2. Modeling and testing analysis of prepositioning accuracy of CNC turret / J. Yang та ін. 2022 *5th World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)*, м. Ma'an Shan, China, 18–20 листоп. 2022 р. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/WCMEIM56910.2022.10021535>.
3. Investigation of cutting tool and workpiece positioning precision as a critical factor in enhancing machining accuracy / U. Turaeva та ін. *E3S Web of Conferences*. 2025. Т. 627. С. 04002. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562704002>.
4. Лещенко О. Методи підвищення точності позиціонування верстатів з ЧПК на основі розрахунку системних поправок. *Наука та виробництво*. 2025. № 29. С. 136–144. URL: doi.org/10.31498/2522-9990-292025-330270.
5. Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів / Т. І. Четвержук та ін. *Наукові нотатки*. 2021. № 71. С. 322–329. URL: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.47>.
6. Slapak V., Pajkos M., Hric M. The factors affecting positioning accuracy of geared servodrives. 2019 *International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*, м. The High Tatras, Slovakia, 24–26 верес. 2019 р. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/EDPE.2019.8883922>.
7. Thermal error measurement and compensation with torque limit skip in Swiss-type lathe manufacturing / P. Kaftan та ін. *Precision Engineering*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.01.024>.
8. Öztürk T., Sarıkaya E., Weigold M. Sensor-integrated tap holder for process uncertainty detection based on tool vibration and axial length compensation sensors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07825-6>.
9. Ramesh R., Mannan M. A., Poo A. N. Error compensation in machine tools – a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000. Т. 40, № 9. С. 1257–1284. URL: [doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00010-9).
10. Mathematical analysis of the process forces effect on collet chuck holders / E. Soriano-Heras та ін. *Mathematics*. 2021. Т. 9, № 5. С. 492. URL: <https://doi.org/10.3390/math9050492> (дата звернення: 22.11.2025).

References

1. Kumari, S., et al. (2023). Contactless measurement of error in lathe tool positioning. *2023 3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*, Hubli, India, June 23–25, 2023. <https://doi.org/10.1109/CONIT59222.2023.10205386>.
2. Yang, J., et al. (2022). Modeling and testing analysis of prepositioning accuracy of CNC turret. *2022 5th World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)*, Ma'an Shan, China, November 18–20, 2022. <https://doi.org/10.1109/WCMEIM56910.2022.10021535>.
3. Turaeva, U., et al. (2025). Investigation of cutting tool and workpiece positioning precision as a critical factor in enhancing machining accuracy. *E3S Web of Conferences*, 627, 04002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562704002>.
4. Leshchenko, O. (2025). Methods for improving positioning accuracy of CNC machines based on system correction calculation. *Nauka ta vyrobnytstvo*, 29, 136–144. <https://doi.org/10.31498/2522-9990-292025-330270>. [in Ukrainian].
5. Chetverzhuk, T. I., et al. (2021). Statistical modelling of technical characteristics of metal-cutting machines. *Naukovi notatky*, 71, 322–329. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.47>. [in Ukrainian].
6. Slapak, V., Pajkos, M., & Hric, M. (2019). The factors affecting positioning accuracy of geared servodrives. *2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*, The High Tatras, Slovakia, September 24–26, 2019. <https://doi.org/10.1109/EDPE.2019.8883922>.
7. Kaftan, P., et al. (2024). Thermal error measurement and compensation with torque limit skip in Swiss-type lathe manufacturing. *Precision Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.01.024>.
8. Öztürk, T., Sarıkaya, E., & Weigold, M. (2021). Sensor-integrated tap holder for process uncertainty detection based on tool vibration and axial length compensation sensors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07825-6>.
9. Ramesh, R., Mannan, M. A., & Poo, A. N. (2000). Error compensation in machine tools – a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(9), 1257–1284. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00010-9).
10. Soriano-Heras, E., et al. (2021). Mathematical analysis of the process forces effect on collet chuck holders. *Mathematics*, 9(5), 492. Web site. URL: <https://doi.org/10.3390/math9050492> (accessed 22.11.2025).

Dmytro Yaniuk

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Assessment of The Stability of the Axial Positioning of the End Face of a Long Cylindrical Workpiece During Automatic Feeding in a Machine Tool

The aim of the work is to develop a unified methodology for assessing the accuracy of the axial position of the end face after automatic feeding on lathes, which allows for the correct calculation of the probability of falling within the tolerance window based on process data. It also makes it possible to agree on key metrics (μ , σ , P_{ok} , C_{pk}) and rules for their application, and to determine acceptance thresholds for technological solutions.

The paper formulates a production problem for mass processing. Four scenarios for the result of feeding are proposed: without undercutting; with a small allowance; with a large allowance; underfeeding (critical defect). The value Δ is introduced as the deviation from the plane $Z=0$ and T as half of the bilateral tolerance. A parametric assessment of the axial position accuracy of the bar blank end face is given, and the positioning process capability index $C_{pk} = (T - |\mu|) / (3\sigma)$ and its interpretation are specified. C_{pk} thresholds (1.00; 1.33; 1.67; ≥ 2.00) and their relationship to defectiveness are established for quick decision-making. The methodology provides a metrologically correct and reproducible assessment of the axial position of the end face after automatic feeding, suitable for daily operation. This contributes to the achievement of a targeted reduction in displacement and scatter (μ , σ), which reduces the need for trimming and the associated material and energy costs.

The result is a methodology that provides a reproducible assessment of the axial position of the end face after automatic feeding. Controlled reduction of μ and σ reduces the need for undercutting and resource costs. The C_{pk} thresholds allow comparing bar feeding machines and making decisions on the feasibility of certain engineering actions. In general, the results obtained make it possible to implement automatic process control measures and further expansion.

cutting machining, position accuracy model, machining strategy, machining parameters, machining optimization, machine subsystems, spindle unit clamping

Одержано (Received) 21.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 12.12.2025