

Янюк Д.В.

*Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна*

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРИСТРОЮ ПОДАЧІ ПРУТКОВИХ ЗАГОТОВОК В ТОКАРНОМУ ОБЛАДНАННІ

У роботі розглянуто та проаналізовано сучасні тенденції у обробці пруткових заготовок. Виокремлено, як важливий етап їх завантаження у сучасних токарних верстатах. Досліджено ефективність існуючих механізмів та спроби їх удосконалення. З огляду на присутність недоліків у більшості методів та конструкцій, а саме низьку точність позиціонування торця, у ході дослідження запропоновано новий підхід до подачі заготовок з використанням подвійного зворотного зв'язку. Джерелом інформації для першої лінії зворотного зв'язку слугують безконтактні датчики кінцевого положення, встановлені біля хвостової частини шпинделя та кінцевої точки подачі заготовки. Друга лінія зворотного зв'язку утворена датчиком кутового положення, який інтегрований в притискний ролик. Таким чином відбувається вимірювання відстані, яку пройшла заготовка, щоб знати її положення в будь-який момент часу.

Описано структуру нової системи подачі, характеристики якої прогнозовано сприяють підвищенню точності, що відповідає сучасним вимогам машинобудування. Це надає нові можливості зменшення кількості операцій, що пов'язані з підрізанням торця для забезпечення точності осьового розміру деталі. Використання сучасних міні комп'ютерів дозволить зробити таку систему більш автономною, що збільшить область застосування пристрою. Запропоновано оригінальний варіант виконання робочих частин механізму, що забезпечить зменшення тертя та можливість використання заготовок нижчої якості. Наведені відповідні формули для розрахунку параметрів системи під конкретні задачі.

Результатом всіх удосконалень та новацій очікується підвищення економічності виробництва та покращення екологічних показників. Наукова новизна роботи полягає у розробці системи забезпечення зворотного зв'язку для керування положенням заготовки з метою підвищення точності її фіксації.

**Ключові слова:** подача пруткової заготовки, зворотній зв'язок, роликівна подача, підвищення точності позиціонування торця, система керування стратегія, реінжинірінг бізнес процесу, стратегічні рішення, логістичні технології, матриця пріоритетів.

### ВСТУП

4-та промислова революція дала серйозний виклик у сфері автоматизації виробництва та швидкого переналагодження між дрібносерійними партіями [1]. Значною частиною обладнання машинобудівних виробництв є верстати для токарної обробки заготовок. Все частіше починають використовувати верстати з ЧПК у комплексі з механізмами автоматичної подачі заготовок. Це зменшує затрати часу робітника на обслуговування обладнання в межах однієї партії. Якщо розміри партій будуть зменшуватись то втрачатиметься доцільність такого виду організації роботи, адже на переналаштування більшої кількості систем витратиться більше часу, що в кінцевому результаті зменшить ефективність виробництва. Окрім підготовчих процесів, є операції обробки, яких можна позбутись модернізувавши систему та логіку автоматичної подачі заготовок. Однією з таких операцій є підрізання торця заготовки, що зумовлено не достатньою точністю позиціонування заготовки у осьовому напрямку. Можливості уникнення додаткових операцій і є предметом дослідження даної роботи

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Відповідно до загальних існуючих принципів роботи пристроїв подачі пруткових заготовок (ППЗ), при зміні розміру заготовки зазвичай необхідна заміна прямої втулки у хвостовій частині шпинделя, або заміна цанги подачі [2]. При використанні дешевих не каліброваних заготовок, тобто без попередньої обробки, ці елементи зазвичай виходять з ладу досить швидко.

У роботі [3] відзначено необхідність виконання операції підрізання торця кожного разу після автоматичної подачі заготовки. Чим менш точним є положення заготовки після подачі та фіксації, тим більше матеріалу потрібно передбачити для зрізання, щоб гарантовано досягнути розмірної точності поверхні. Це спричинює збільшення зносу різального інструменту та зменшення коефіцієнта використання металу, використання ресурсу верстата, витрати енергії та супутніх матеріалів, що споживає верстат під час функціонування [4].

Для вирішення проблеми підвищення точності позиціонування заготовки у роботі [5] використали пристрій за принципом дії схожий на маніпулятор. Це вирішило проблему з точністю, але збільшився загальний час виставлення заготовки. Також недоліком пристрою є малий розбіг у діаметрі заготовок що ускладнить переналаштування. Ще один варіант покращення показників

точності представлено у роботі [3], де запропонована система управління подачею з одинарним зворотнім зв'язком. Зазначено, що така система управління може працювати із різними типами ППЗ, через свою автономність в управлінні.

### ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виконати задачу збільшення точності позиціонування торця заготовки запропоновано завдяки принциповій зміні структури системи визначення положення заготовки під час її подачі з метою подальшої фіксації. Замість передачі кінетичної енергії через ланку-штовхач у рух можна приводити безпосередньо заготовку через ролики подачі. Для реалізації ефективної подачі достатньо використати 2 ролики, з яких один буде мати привід, другий – пристрій для зчитування пройденої відстані, що виконуватиме роль зворотного зв'язку. Щоб забезпечити необхідну стабільність фіксації у поперечному напрямку циліндричної заготовки, її поверхня повинна мати як мінімум 3 точки опори. Для цього один ролик повинен мати призматичну твірну, а інший – плоску, або клиноподібну [6, с. 44].

Метою роботи є розробка системи подачі осе-симетричних заготовок різних конфігурацій з можливістю контролю динамічних характеристик процесу їх подачі, що сприяє підвищенню точності позиціонування заготовки в осьовому напрямку.

Практична цінність – підвищення точності позиціонування торця заготовки в осьовому напрямку з метою зменшення відходів матеріалу та втрат супутніх виробничих ресурсів на виконання операції підрізання торцевої поверхні заготовки або уникнення даної операції при різних значеннях допусків точності оброблюваної деталі

Об'єктом дослідження є пристрої подачі пруткових осе-симетричних заготовок в металообробному обладнанні у пристрої автоматичної фіксації.

Предметом дослідження є процеси формування точності положення торцевої поверхні осе-симетричної заготовки під час її подачі з метою подальшої фіксації.

Припущення, що прийняті в даних дослідженнях стосуються можливості отримання необхідної точності параметрів функціонування структурних елементів запропонованої системи.

Обмеження отриманих результатів визначаються умовами фізико-механічного стану поверхні заготовки, що прийняті як типові для випуску гарячекатаних прутків. Наявність відхилень різного виду типу: кривизна, наявність великих виступів, заглиблень чи задирів на поверхні заготовки, покриття клейкими, плинними чи агресивними середовищами та т.д. значно обмежують можливості застосування результатів даних досліджень.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати досліджень відображаються у структурі ППЗ з прогнозовано кращими експлуатаційними характеристиками. Принципи функціонування запропонованого ППЗ і, зокрема, послідовність етапів його функціонування є наступними:

1. Завантаження заготовки з бункера у робочу зону ППЗ (рис. 1);
2. Затиск заготовки роликами для подачі;
3. Подача до визначеної координати;
4. Фіксація заготовки затискним механізмом (ЗМ) верстата;
5. Відвід роликів подачі від заготовки.



а) бункер, б) робоча зона ППЗ

Рисунок 1 Пристрій подавання прутка від Naas [7]

Завантаження заготовки у вигляді пруткового матеріалу починається з команди системи управління верстатом, або оператора, який запускає цикл обробки. Із бункера *а* механізм відділяє 1 заготовку, яка скочується у основний жолоб *б* рис. 1.

Після отримання сигналу від сенсора 7 (рис. 2) про наявність заготовки у основному жолобі та відсутності інших аварійних повідомлень система переходить до наступного етапу.

Блок управління 11 вимикає електромагнітний клапан у розподільнику 2 після чого пружина пересуває золотник та починається нагнітання тиску повітря  $P_2$ , що надходить через диференційний клапан 1, у нижню частину пневматичного циліндра 3. Під дією тиску штоки поршнів 4 обох притискних роликів переміщуються до осі обертання шпинделя, цим самим затискаючи заготовку 12. Логічний блок контролює положення роликів за допомогою цифрових лінійок 6 таким чином, щоб вісь заготовки співпала з віссю шпинделя 13.

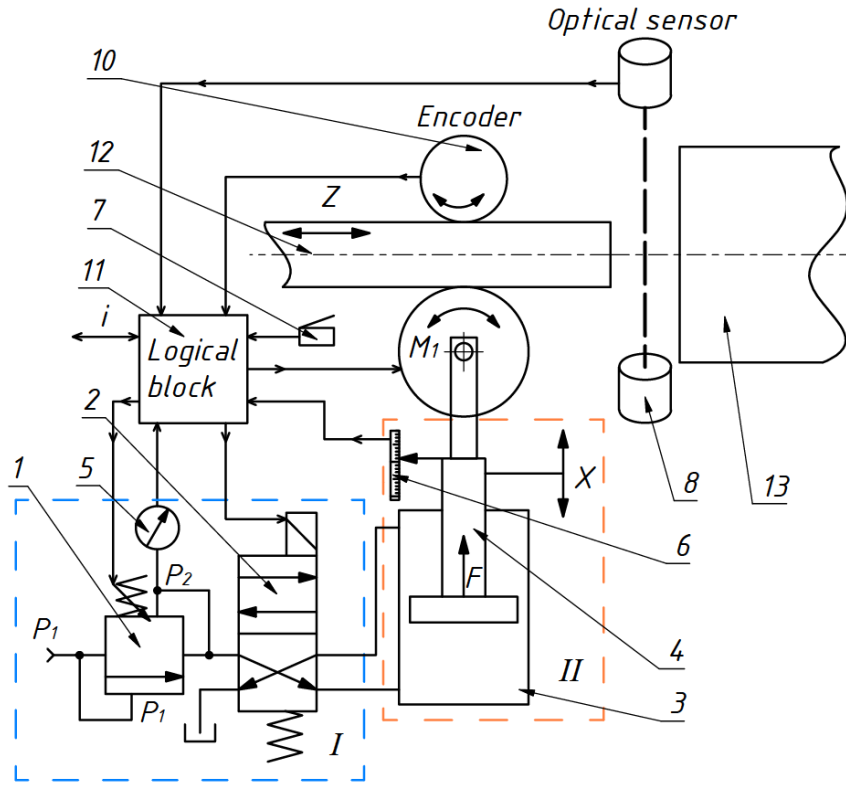


Рисунок 2 Схематичне зображення елементів ППЗ

Тиск у циліндрі 3 контролюється за допомогою зміни попереднього натягу пружини у редукційному клапані 1 та відслідковується за допомогою барометра 5. Це дозволяє досягнути стабільного тиску у системі а отже стабільного зусилля притискання  $F$ . При проектуванні пневматичної системи потрібно враховувати, що тиск у нижньому роликів має бути більшим, щоб нівелювати масу заготовки. Для визначення максимально необхідного тиску в системі нижнього ролика потрібно врахувати форму заготовки, її матеріал, відстань між роликів та необхідну силу тертя :

$$P_2 = \frac{F}{S} = \frac{F_{\text{пр}} + F_{\text{т}}}{S}; \quad (1)$$

$S$  – площа поршня у пневмоциліндрі;

$F_{\text{пр}}$  – максимальне зусилля притискання верхнього ролика;

$F_{\text{т}}$  – сила тяжіння, що діє на один ролик.

Сила тяжіння між роликів розподіляється нерівномірно. Найбільш навантажені роликів це перший (рис. 2) та останній, який перебуває в контакті з заготовкою. Це спричинено безпорним звисом заготовки. Довжина шпинделя у всіх верстатах різна, також відстань між давачем прутка та верстатом може відрізнятись, що спричинює суттєву похибку відстані  $L_{\text{ш}}$  – між першим роликів і ЗМ, або внутрішньою опорою шпинделя. Тому для загального розрахунку краще використовувати відстань між роликів давача. Розглянемо ситуацію коли заготовка в ході подачі покинула опору 4 (рис. 3). З рисунку видно, що довжина звисаючої частини заготовки  $L_{\text{зв}}$  наближена до відстані між роликів  $L_{\text{р}}$ . У такому випадку сила тяжіння що діє на третій ролик буде визначатись за формулою:

$$F_{T3} = mg = \rho g V = \rho g \cdot 2L_p \cdot \pi \frac{D^2}{4}; \quad (2)$$

$\rho$  – найбільша густина серед матеріалів які планується подавати;  
 $D$  – найбільший діаметр заготовки.

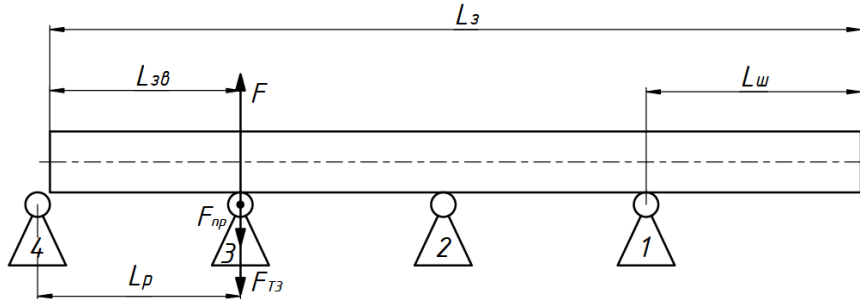


Рисунок 3 Схема для розрахунку навантаження на ролики

Під час роботи система задаватиме значення тиску  $P_2$  розраховуючи його для кожного ролика, тому кожен циліндр повинен комплектуватись індивідуальним блоком пневматичного розподілу  $I$ .

Після стабілізації тиску  $P_2$  та відповідність положення заготовки відносно координати  $X$ , логічний блок розпочинає подачу завдяки мотору  $M_1$ . Поверхня роликів повинна мати елементи що покращать їх фрикційні властивості. Серед таких можуть бути рифлення на поверхні створені накаткою, гума або інші фрикційні матеріали. В залежності від вибору конструктором цих елементів буде змінюватись коефіцієнт тертя  $\mu$ , а згідно формули

$$F_{Tp} = \mu \cdot F = \mu(F_{np} + F_T) \quad (3)$$

він впливатиме на силу тертя  $F_{Tp}$ , або необхідну силу притискання роликів  $F_{np}$ .

Сила тертя напряму впливає на динаміку подачі заготовки запобігаючи проковзуванню роликів при розгоні та гальмуванні:

$$F_{Tp} > ma \quad (4)$$

Де  $m$  – маса заготовки,  $a$  – прискорення, що надається заготовці системою подачі.

$$\mu(F_{np} + F_T) > \rho g Va \quad (5)$$

$$\mu(F_{np} + \rho g \cdot 2L_p \cdot \pi \frac{D^2}{4}) > \rho g Va \quad (6)$$

$$F_{np} > \frac{\rho g(Va - 2L_p \cdot \pi \frac{D^2}{4})}{\mu} = \frac{\rho g \pi D^2 (La - 2L_p)}{4\mu} \quad (7)$$

Якщо отримана нерівність не справджується то заготовка буде проковзувати відносно поверхні ролика. Таких випадків краще уникати. Такі параметри функціонування не відповідають номінальним характеристикам роботи ППЗ. Для виявлення проковзувань система оснащена зворотнім зв'язком, який реалізований через оптичні сенсори 8 та 9 (рис. 4)

По ходу руху заготовка 12 розриває світловий потік оптичного датчика 8, що задає нульову координату для відліку. Заготовка продовжує рух на визначену відстань, яка відраховується за допомогою енкодера 10, що встановлений в притискному ролику. Таким чином забезпечується один контур зворотного зв'язку під час подачі заготовки.

За наближення торця заготовки до заданої координати, ЗМ верстата 14 здійснює попередній підвід затискних елементів до її поверхні [8], що має на меті наблизити її вісь до осі обертання. Це дозволить збільшити точність позиціонування торця.

Оптичний датчик 9 може бути встановленим як на окремому модулі для переміщення 15, так і замість одного із інструментів у супорті. У разі розриву оптичного потоку датчик передає сигнал логічному блоці 11 про завершення подачі. Логічний блок порівнює задану відстань між оптичними сенсорами та виміряну енкодером 10. Якщо значення знаходяться в межах похибки то проковзування не було, що свідчить про правильно підібрані прискорення та силу притискання роликів. Сигнал про завершення подачі передається на блок управління верстатом, після чого, якщо ніяких інших помилок системи немає ЗМ здійснює затиск та датчик 9 відводиться.

Після отримання сигналу про успішний затиск заготовки, логічний блок перемикає електромагнітним клапаном розподільник 2, що реверсує потік повітря. Пневмоциліндри втягуються та розтискають заготовку.

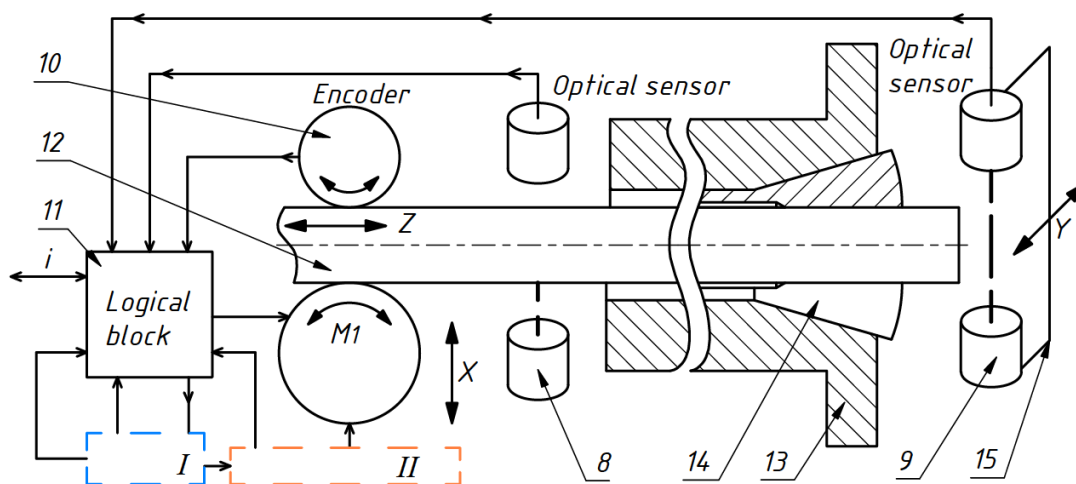


Рисунок 4 Загальна схема подачі заготовки.

## ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Запропонована структура ППЗ прогнозовано забезпечує підвищену точність позиціонування торця заготовки з метою фіксації для подальшої обробки. Її переваги визначаються наявністю зворотного зв'язку, що дає можливість ефективного фактичного контролю положення торцевої поверхні заготовки. Обробка інформації, що необхідна для функціонування запропонованого ППЗ може здійснюватися з використанням окремого мікрокомп'ютера типу Arduino, отже система може бути повністю автономною, що виключає залежність від системи керування верстатом та не потребує під'єднання до неї. Це покращує умови інсталяції даного ППЗ з метою модернізації верстата та забезпечує надійність роботи верстата з точки зору зменшення ймовірностей внесення збурень та додаткового її навантаження.

Як певні обмеження у функціональних можливостях представленої структури ППЗ можна відзначити наявність датчиків у зоні різання, що може спричинити їх пошкодження, або не коректну роботу. Також датчик з модулем переміщення займатиме корисний об'єм, який може знадобитись для додаткового обладнання, або оснастки. Аналіз функціонування запропонованої ППЗ вказує на те, що для ефективної подачі заготовки з дефектами поверхні потрібно налаштувати коливальний контур: заготовка – підтримуючі роликів – пневмоциліндри. Підбір його параметрів допоможе досягти рівномірності руху та згасання коливань заготовки. Самі коливання можуть бути спричинені обертанням заготовки із зміщенням відносно осі центром ваги, або/та некруглістю поверхні заготовки, по якій котяться роликів. Жорстка фіксація підтримуючих роликів може спричинити коливальні навантаження на опори шпинделя чим зменшить їх строк служби, а також погіршить чистоту поверхні що обробляється. Для максимальної ефективності системи необхідно задати оптимальний режим руху заготовки.

Подальші заплановані дослідження з використанням отриманих результатів будуть стосуватися дослідження параметрів функціонування запропонованого ППЗ та розробка його структурних елементів на рівні конструкції. Це дасть змогу проведення оптимізації окремих параметрів. При цьому будуть залучені також результати інших досліджень автора за даним напрямком. Для підвищення ефективності функціонування ППЗ заплановано використовувати описане авторами у роботі [9] програмне забезпечення, що дозволяє швидко визначати інерційні властивості заготовки та



підбирати параметри подачі для максимального наближення до оптимального режиму. Для обробки такої інформації заплановано використання систем на базі мікрокомп'ютерів типу Arduino.

## ВИСНОВКИ

Результати проведених досліджень спрямовані на вирішення задачі підвищення точності осевого положення торця заготовки, що надає нові можливості підвищення продуктивності обробки. Зазначені результати досягнуто шляхом вдосконалення структури пристрою автоматичної подачі заготовки у вигляді тіл обертання типу пруток. Запропонована структура пристрою може бути втілена в складі систем подачі заготовок технологічного обладнання різних видів, робота яких передбачає автоматичну подачу заготовок у вигляді тіл обертання.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ю. М. Кузнецов, Б. І. Придальний Теорія технічних систем в аспектах досліджень та технічної творчості: підручник Луцьк ЛНТУ, 2023. 284 с.

2. Bar lathe with adjustable dia. guide bush - has slit guide bush which is closed onto bar by pressure of adjusting ring on tapered end section : пат. DE4103552A1 Німеччина; код МПК: B23B3/06; B23B31/14; B23B7/02; B23Q1/76/ FORST HEINZ. – № EP08162781A; заяв. 2008-08-21; опубл. 2009-03-04, EP2030707A2.

3. Придальний Б. І. Янюк Д. В. Новий підхід до підвищення точності позиціонування торця пруткової заготовки під час токарної обробки. *Integration of education, science and business in modern environment: summer debates* : тези доп. учасн. V Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Дніпро : Україна, 2023. С. 408–410.

4. E. a. Fatima Zohra, A. Jabri, A. E. Barkany, A. Boharb and N. Moujibi, "Experimental Study and Optimization of Energy Consumption During end Face Turning of AISI 4140," *2024 4th International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, FEZ, Morocco, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/IRASET60544.2024.10549404.

5. Базилевський В. С. Проектування пруткової подачі для токарно-фрезерних багатоцільових верстатів з ЧПК : магістерська робота : 131. Київ, 2019. 77 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30669>.

6. Медведєв В. С., Онищук С. Г., Тулупов В. І. Технологічна оснастка: навчальний посібник, Краматорськ : ДДМА, 2021. 108 с. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/tiup/metod/nm2021/Технологічна\\_оснастка\\_конспект\\_лекцій.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/tiup/metod/nm2021/Технологічна_оснастка_конспект_лекцій.pdf).

7. Пристрій подавання прутків Haas. Haas Automation Inc. - CNC Machine Tools. URL: <https://www.haascnc.com/uk/machines/lathes/haas-bar-feeder-v2.html> (дата звернення: 23.06.2024).

8. Prydalnyi B. Mechatronic device for two-stage clamping of cylindrical objects in machine tool spindles. *Journal of mechanical engineering and transport*. 2021. Vol. 13, no. 1. P. 118–123. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-118-123> (date of access: 24.06.2024).

9. В.В. Баррій, Р.В. Волошин, К.Р. Волошина Нечіткий регулятор системи подачі прутка стану поперечно-клинової прокатки на базі arduino в середовищі labview. Збірник наукових праць ДДТУ № 1(40) 2022. С. 132-143. DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.16

## REFERENCES

1. Kuznietsov, Yu. M., & Prydalnyi, B. I. (2023). *Teoriia tekhnichnykh system v aspektakh doslidzhen ta tekhnichnoi tvorchosti: pidruchnyk*. Lutsk: LNTU.

2. Forst, H. (2009). Bar lathe with adjustable dia. guide bush - has slit guide bush which is closed onto bar by pressure of adjusting ring on tapered end section (Patent No. DE4103552A1). Germany: European Patent Office. EP08162781A. Retrieved from EP2030707A2.

3. Prydalnyi, B. I., & Yaniu, D. V. (2023). Novyi pidkhid do pidvyschennia tochnosti pozytsionuvannia tortsia prutkovoi zahotovky pid chas tokarnoi obrobky. In *Integration of education, science and business in modern environment: summer debates: Proceedings of the V International Scientific-Practical Internet Conference* (pp. 408–410). Dnipro: Ukraine.

4. Fatima Zohra, E. A., Jabri, A., Barkany, A. E., Boharb, A., & Moujibi, N. (2024). Experimental study and optimization of energy consumption during end face turning of AISI 4140. In *2024 4th International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)* (pp. 1-4). FEZ, Morocco. doi:10.1109/IRASET60544.2024.10549404.

5. Bazylevskiy, V. S. (2019). Proektuvannya prutkovoї podachi dlia tokarno-freznykh bagatotsilovykh verstativ z ChPK: mahisterska robota: 131. Kyiv. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30669>.

6. Medvediev, V. S., Onyshchuk, S. H., & Tulupov, V. I. (2021). Tekhnolohichna osnastka. Kramatorsk: DDMA. Retrieved from [http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/tiup/metod/nm2021/Tekhnolohichna\\_osnastka\\_konspekt\\_lektsii.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/tiup/metod/nm2021/Tekhnolohichna_osnastka_konspekt_lektsii.pdf).

7. Haas Automation Inc. (n.d.). Haas Bar Feeder. Retrieved June 23, 2024, from <https://www.haascnc.com/uk/machines/lathes/haas-bar-feeder-v2.html>

8. Prydalnyi, B. (2021). Mechatronic device for two-stage clamping of cylindrical objects in machine tool spindles. *Journal of Mechanical Engineering' and Transport*, 13(1), 118–123. doi:10.31649/2413-4503-2021-13-1-118-123. Retrieved from <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-118-123>

9. Bahrii, V. V., Voloshyn, R. V., & Voloshyna, K. R. (2022). Nechitkyi rehuliator systemy podachi prutka stanu poperechno-klynovoi prokatky na bazi arduino v seredovyskhi labview. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU*, 1(40), 132-143. doi:10.31319/2519-2884.40.2022.1

### **Yaniuk D.V. Improvement of the device for feeding bars in turning equipment.**

A significant portion of the equipment in manufacturing engineering involves lathes for machining workpieces. Increasingly, CNC lathes are used with automatic workpiece feeding mechanisms (bar feeders). However, the axial positioning accuracy of workpieces by available bar feeders is lower than the requirements for most machine-building parts. Less precise positioning after feeding and clamping necessitates more material allocation for cutting to ensure dimensional accuracy, resulting in increased tool wear, reduced metal utilization efficiency, higher machine resource usage, energy consumption, and associated materials.

This study explores avoiding additional operations by improving the accuracy of workpiece end positioning. The proposed solution involves a fundamental change in the workpiece positioning system during feeding: instead of transmitting kinetic energy through a pusher link, the workpiece is moved directly by feed rollers.

The aim is to develop a system for feeding axially symmetric workpieces of various configurations with control over the dynamic characteristics of the feeding process, enhancing axial positioning accuracy. The device operates on a dual-feedback system. The first feedback line uses contactless end-position sensors installed at the spindle's tail end and the final workpiece feeding point. The second feedback line features a roller with an encoder measuring the distance traveled by the workpiece to determine its position at any given moment. This system can optimize the workpiece movement schedule during feeding, what help achieving the required positioning accuracy.

The proposed structure can be integrated into various technological equipment's workpiece feeding systems, anticipating the automatic feeding of rotating bodies. This approach aims to significantly improve workpiece positioning precision, reduce material wastage, enhance tool life, and optimize machining operations' overall efficiency. By implementing a dual-feedback mechanism, the system ensures continuous monitoring and adjustment of the workpiece position, leading to more precise and reliable machining outcomes.

**Key words:** feeding of the bar workpiece, control system with feedback, roller feeding, increasing the accuracy of positioning of the end, control system.

*Яніук Дмитро Володимирович*, аспірант кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail: [dimonyanuk@gmail.com](mailto:dimonyanuk@gmail.com). <https://orcid.org/0009-0002-9633-0620>

*Dmytro YANIUK*, graduate student of the Department of Applied Mechanics and Mechatronics, Lutsk National Technical University, e-mail: [dimonyanuk@gmail.com](mailto:dimonyanuk@gmail.com). <https://orcid.org/0009-0002-9633-0620>

DOI 10.36910/automash.v2i23.1552