

**Володимир Кравець¹, Олександр Кравець², Юрій Адаменко³, Сергій Лапковський⁴,
Володимир Кореньков⁵, Володимир Фролов⁶**

¹інженер кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: bond118@meta.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858> ResearcherID: ITU-8413-2023

²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: om.kravets@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956> ResearcherID: IUQ-7186-2023

³кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: yuriy.adamenko@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4232-3206> ResearcherID: ACT-0127-2022

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: Lapkovsky@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231> ResearcherID: HCH-3837-2022

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: volodymyr.korenkov@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1911-9496> ResearcherID: ADG-1590-2022

⁶кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X> ResearcherID: ACH-0071-2022

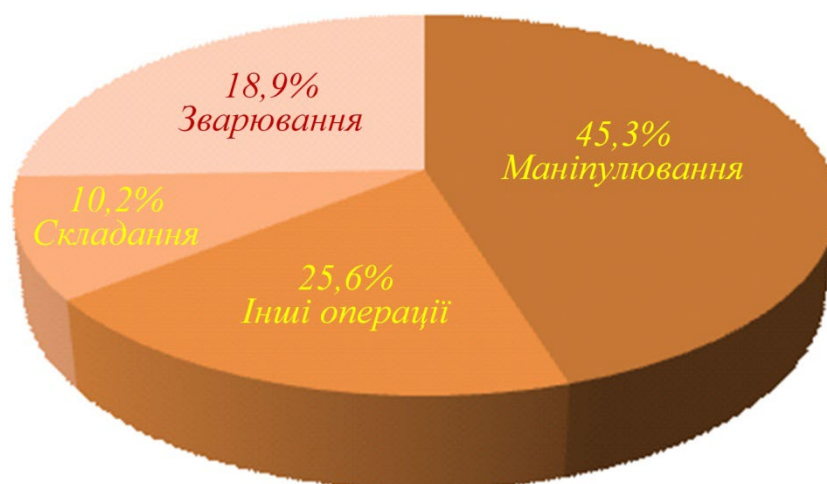
АНАЛІЗ РОЗМІРНИХ ЗВ’ЯЗКІВ РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ

Застосування промислових роботів — безальтернативний шлях підвищення якості та продуктивності сучасного виробництва. Наразі серед усіх роботизованих технологічних операцій саме маніпулювання об’єктами виробництва є найпоширенішою роботизованою операцією. Стаття присвячена вирішенню питань розмірного аналізу роботизованих комплексів металооброблення, адже на даний час розмірний аналіз є дуже ефективним сучасним засобом забезпечення проведення як кількісного, так і якісного аналізів існуючих і синтезу нових технічних систем і технологічних процесів. Метою статті є вирішення задачі виявлення та розрахунку розмірних зв’язків при роботизованому встановленні заготовок або деталей у металорізальний верстат.

Ключові слова: промисловий робот; верстат; роботизований комплекс; розмірні зв’язки; розмірний ланцюг.

Рис.: 10. Бібл.: 14.

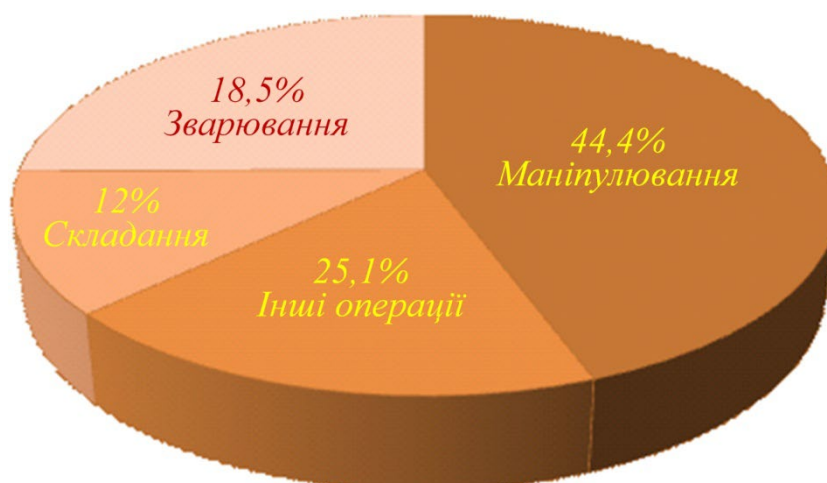
Актуальність теми дослідження. На теперішній час неможливо уявити таку галузь промисловості, якої б не торкнулася промислова робототехніка. Результати багатоаспектного аналізу економічного розвитку промислово розвинених країн доводять, що використання промислових роботів – безальтернативний шлях істотного підвищення якості та продуктивності сучасного виробництва. За даними минулорічного звіту Міжнародної федерації робототехніки (International Federation of Robotics, IFR) [1] в останні роки серед усіх роботизованих технологічних операцій саме маніпулювання об’єктами виробництва є найпоширенішою роботизованою операцією (рис. 1). Операції маніпулювання застосовуються у більшості сфер роботизованого виробництва, особливо це стосується обслуговування промисловими роботами (ПР) основного технологічного обладнання, у тому числі, металорізальних верстатів (МРВ) та оброблювальних центрів (ОЦ) з ЧПК (CNC machine tools tending) (рис. 2), адже в процесі завантаження-розвантаження МРВ або ОЦ з ЧПК промислому роботу необхідно здійснити у просторі цілу низку маніпуляційних операцій із заготовками або деталями (рис. 3). Таким чином, дослідження систем роботизованого завантаження-розвантаження МРВ або ОЦ центрів з ЧПК (Robotic CNC Machine Tending Load-Unload) завжди будуть вельми актуальними.



а



б



в

Рис. 1. Відсоткове співвідношення роботизованих операцій у виробництві:
а – у 2019 році, б – у 2020 році, в – у 2021 році
Джерело: розроблено авторами.



Рис. 2. Обслуговування промисловими роботами металорізальних верстатів та оброблювальних центрів з ЧПК [2–5]

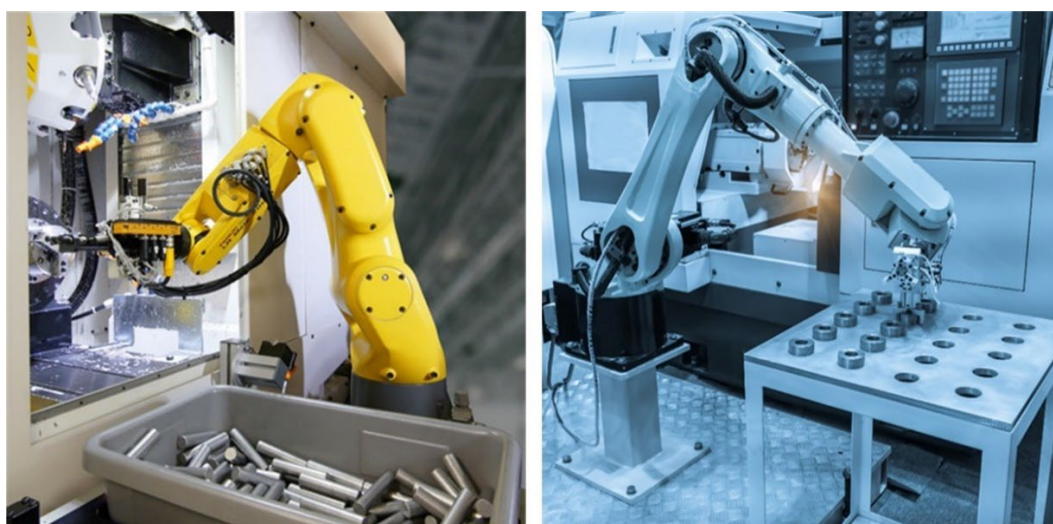


Рис. 3. Маніпуляції із заготовками при обслуговуванні промисловими роботами металорізальних верстатів та оброблювальних центрів з ЧПК [5; 6]

Постановка проблеми. Установчі розмірні зв'язки завжди повинні розраховуватися при роботизованому встановленні заготовок або деталей на верстати, у пристрої, на супутники, в накопичувачі, у складські комірки тощо. Треба зазначити, що методика виявлення та розрахунку установчих розмірних зв'язків така ж сама, як і при складанні виробів. Установчі розмірні зв'язки можуть бути віднесені до складання, різниця полягає лише в тому, що допуски на розміри для встановлення заготовок або деталей у різні пристрої, як правило, можуть бути значно більшими, ніж при складанні виробів, і тому їх набагато легше забезпечити. Разом з тим, якщо розбирання та повторне складання не потрібні, складання кожного виробу зазвичай проводиться лише один раз, а встановлення одних і тих же заготовок або деталей може здійснюватися неодноразово, що також необхідно враховувати.

Метою виявлення та розрахунку розмірних зв'язків при роботизованому встановленні заготовок або деталей, вантажно-розвантажувальних роботах основного технологічного обладнання тощо є вирішення наступних задач:

- 1) забезпечення працездатності роботизованої системи протягом необхідного часу експлуатації в умовах дії різноманітних факторів, що впливають на стабільність складових розмірів та розмірних зв'язків;
- 2) вибір методів та засобів роботизації, які зможуть забезпечити необхідні розмірні зв'язки;
- 3) формулювання вимог до характеристик точності промислових роботів, які реалізують роботизоване встановлення заготовок або деталей;
- 4) вибір методів та способів розмірного налагодження системи.

Крім того, на підставі розрахунку розмірних зв'язків можна встановити регламенти технічного обслуговування та профілактики, сформулювати допустимі обмеження зовнішніх впливів в процесі експлуатації технологічної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі розмірний аналіз – дуже ефективний сучасний засіб для кількісного та якісного аналізу існуючих і синтезу нових технічних систем і технологічних процесів, саме тому в останні роки питанням розмірного аналізу було присвячено чимало наукових досліджень і публікацій як українських, так і зарубіжних авторів [7–13].

У роботі [7] наводяться теоретичні та методологічні основи і алгоритми розмірного аналізу та моделювання технологічних процесів виготовлення деталей, їх використання для оцінювання можливостей та прогнозування з метою забезпечення необхідної точності деталей, визначення розмірних характеристик, які необхідні для реалізації технологічних процесів у виробництві.

Робота [8] присвячена методологічним основам створення системи прогнозування характеристик технологічного процесу на стадії проектування. Створення даної системи надасть можливість переміщення вирішення багатьох задач з етапу освоєння виробництва на етап проектування нового технологічного процесу, на якому процес пошуку оптимальних рішень не буде пов'язаний з низкою значних матеріальних витрат.

У роботах [9; 10] наводяться методологія використання теорії розмірних зв'язків і відповідні типові задачі, які виникають при проектуванні технологічних процесів складання.

Робота [11] присвячена аналізу останніх стандартів допусків ISO, які, разом із своїми перспективами та проблемами, матимуть значний вплив на диджиталізацію виробництва.

Роботи [12; 13] присвячені розмірним та геометричним допускам, що впливають як на вартість, так і на функціональність виробу, адже пошук прийняттого компромісу між ними є одним із найпоширеніших інженерних завдань. У цих роботах автори провели

оцінювання методів аналізу допусків, застосували їх стосовно складних механічних вузлів. Було проаналізовано та порівняно результати, які були отримані методом діаграми допусків, моделюванням методом Монте-Карло, аналізом векторної петлі, уніфікованою моделлю торсора Якобі та іншими методами. Отримані результати підтвердили наявність значних варіацій у результатах досліджуваних методів, що вказало на необхідність обґрунтованого вибору відповідного методу.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Результати ретельного аналізу останніх досліджень і публікацій стосовно розмірного аналізу та систематизація отриманої інформації дозволили зробити наступний висновок: проблема вирішення задачі виявлення та розрахунку установчих розмірних зв'язків при роботизованому встановленні заготовок або деталей у металорізальний верстат або оброблювальний центр наразі не вирішена.

Метою статті є вирішення задачі виявлення та розрахунку розмірних зв'язків при роботизованому встановленні заготовок або деталей у МРВ або ОЦ з ЧПК.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо розмірні зв'язки, які виникають при роботизованому встановленні циліндричної заготовки у самоцентруючий токарний патрон МРВ на прикладі роботизованого комплексу (РК) металооброблення (рис. 4). Завантаження заготовки у патрон і вивантаження деталі здійснює ПР (рис. 5).



Рис. 4. Роботизований комплекс металооброблення [14]

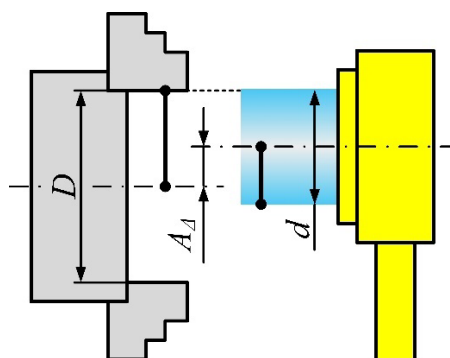


Рис. 5. Встановлення заготовки у самоцентруючий патрон верстата
Джерело: розроблено авторами.

ПР здійснює захоплення заготовки, переміщує її в робочу зону МРВ, а потім вводить заготовку в міжкулачкову зону патрона, після чого системою ЧПК подається команда на затиск кулачків патрона.

З рис. 5 видно, що введення заготовки між відкритими кулачками патрона можливе у тому випадку, коли значення відхилення від центрування заготовки відносно осі кулачків патрона A_{Δ} не перевищує максимального значення $A_{\Delta max}$:

$$A_{\Delta max} = \frac{D-d}{2}, \quad (1)$$

де $A_{\Delta max}$ – максимальне відхилення від центрування;

D – діаметр відкритих кулачків патрона;

d – діаметр заготовки.

Якщо на момент встановлення заготовки значення відхилення A'_{Δ} виявиться більше цього гранично допустимого значення, то в процесі руху захватного пристрою (ЗП) ПР вздовж осі шпинделя заготовка своїм торцем буде впирається у патрон (рис. 6), тобто встановлення заготовки буде неможливим.

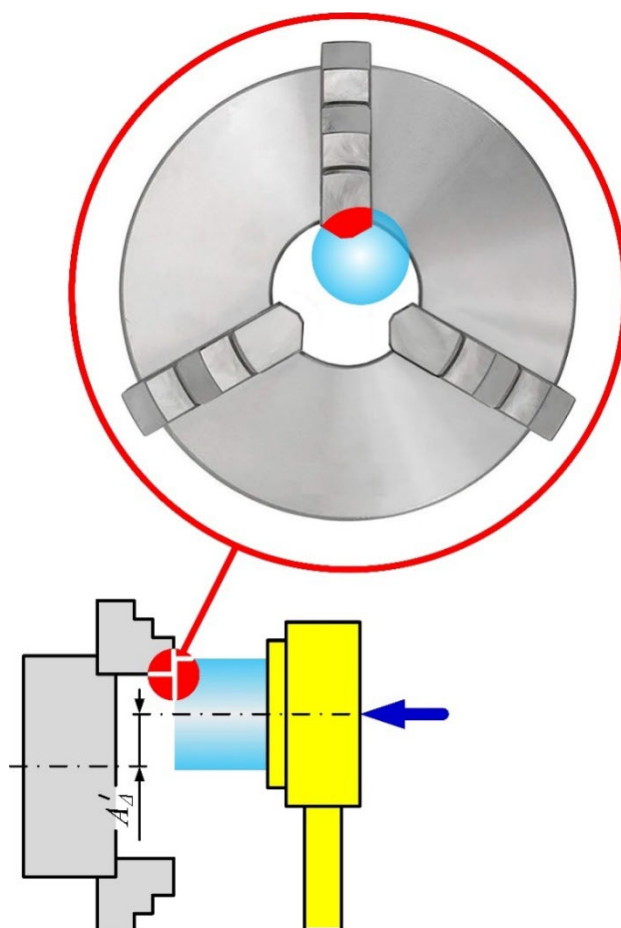


Рис. 6. Неможливість встановлення заготовки у патрон при невиконанні вимоги (1)
Джерело: розроблено авторами.

З наведеного вище виходить, що забезпечення необхідного значення A_{Δ} є умовою можливості роботизованого встановлення заготовки у патрон МРВ або ОЦ. Допустиме значення A_{Δ} розраховується, виходячи з розмірів D і d за формулою (1).

З цієї залежності випливає значення гранично допустимого відхилення $A_{\Delta max}$ від співвісності, що дозволяє ПР встановити заготовку у відкритий патрон.

Так як для більшості токарних патронів з механічним приводом для закріплення заготовки діапазон відкриття кулачка може бути досить великим, то, як правило, не виникає труднощів забезпечення відкриття кулачків в діаметрі, наприклад, на 20 мм більше діаметра заготовки. Тоді максимально допустиме відхилення від співвісності буде дорівнювати $A_{\Delta max} = \pm 10$ мм. У цьому випадку при бажанні забезпечити співвісність значення вихідної ланки можна записати у вигляді $A_{\Delta max} = 0 \pm 10$ мм. Це означає, щоб найкращим випадком було б виконання умови $A_{\Delta} = 0$, але допустиме відхилення дорівнює ± 10 мм, тобто допуск на відхилення A_{Δ} у даному випадку буде дорівнювати $T_{\Delta} = 20$ мм.

Однак, слід зазначити, що проведеного розрахунку недостатньо для виявлення допустимих відхилень від співвісності, адже розрахункове значення A_{Δ} дозволяє лише забезпечити введення заготовки в міжкулачкову зону патрона і є необхідною, але недостатньою умовою.

Розглянемо, як буде фіксуватися заготовка при розрахованому відхиленні від співвісності. Кулачки, зміщуючись до осі патрона, при наявності відхилення від співвісності, будуть прагнути перемістити заготовку в нове положення. В силу того, що заготовка все ще зафіксована у ЗП ПР, буде виникати сила при переміщенні заготовки від ЗП ПР до патрона МРВ. Значення цієї сили можна визначити за наступною формулою:

$$P = j \cdot A_{\Delta}, \quad (2)$$

де P – сила при перенесенні заготовки від ПР до патрона;

j – жорсткість системи робот-заготовка-патрон;

A_{Δ} – допустиме відхилення.

При жорсткості ПР $j = 500$ Н/мм при відхиленні $A_{\Delta} = A_{\Delta max} = 10$ мм згідно (2) сила, яка діє в момент закріплення на ПР, заготовку та кулачки від співвісності патрона, буде дорівнювати $P = 5000$ Н. Якби таке зусилля могли б створити кулачки патрона, то щось обов'язково би зламалося: ЗП ПР, заготовка або патрон, тому зрозуміло, що другою, не менш важливою, умовою визначення гранично допустимого відхилення від співвісності буде обмеження сили P допустимим значенням, що визначається конкретними умовами встановлення заготовки: моделлю МРВ, розмірами і міцністю заготовки, параметрами ПР.

На рис. 7 наведено графік залежності значення допустимого відхилення A_{Δ} від значень сили P при переміщенні заготовки від ЗП ПР у патрон МРВ та жорсткості j системи робот-заготовка-патрон.

Припустимо, що в конкретному випадку для встановлення заготовки необхідно, щоб значення сили P не перевищувало 100 Н. Тоді допустиме відхилення від співвісності буде дорівнювати $A'_{\Delta} = P/j = 100/500 = 0,2$ мм.

Вочевидь, що умова (2) стосовно значення $A_{\Delta max}$ набагато жорсткіше, ніж умова (1), адже $A'_{\Delta max} \leq A_{\Delta max}$. Далі необхідно побудувати розмірний ланцюг для розмірних характеристик РК металооброблення, наведеного на рис. 4. Для цього визначаємо зв'язки між розмірними ланками (рис. 8) і отримуємо шуканий розмірний ланцюг (рис. 9).

Даний розмірний ланцюг описується рівнянням (3):

$$A_{\Delta} = -A_1 - A_2 + A_3 - A_4 - A_5 - A_6 - A_7, \quad (3)$$

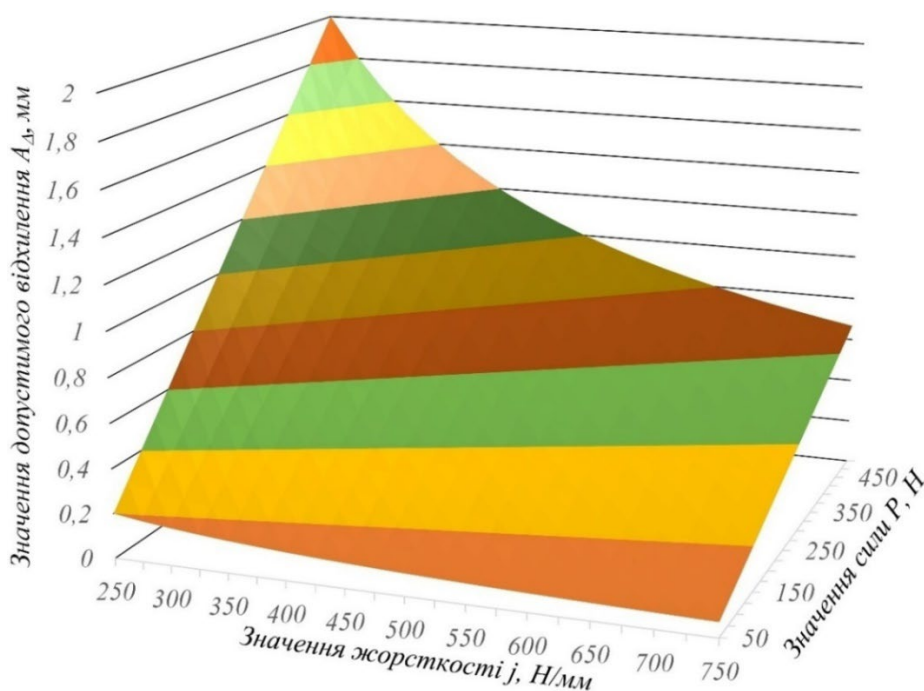


Рис. 7. Графік залежності значення допустимого відхилення від співвісності A_{Δ} від значень сили P та жорсткості j

Джерело: розроблено авторами.

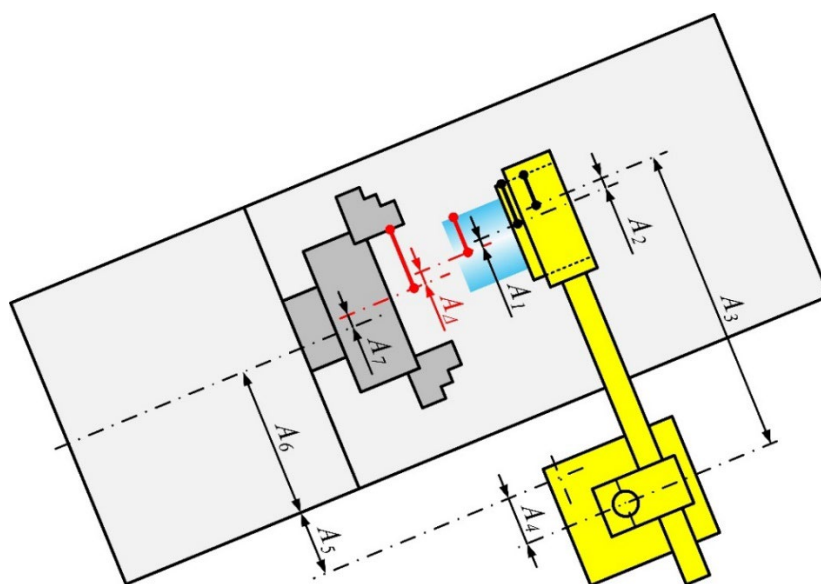


Рис. 8. Зв'язки між розмірними ланками РК металооброблення

Джерело: розроблено авторами.

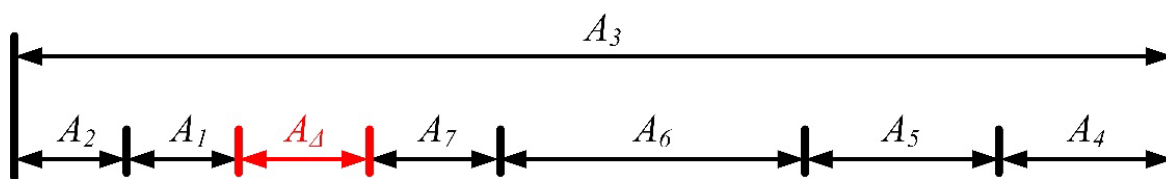


Рис. 9. Розмірний ланцюг РК металооброблення

Джерело: розроблено авторами.

де A_1 – відхилення від співвісності технологічної бази заготовки, що встановлена у патроні, та бази, що визначає положення заготовки у ЗП ПР;

A_2 – відхилення від співвісності поверхні заготовки у ЗП ПР, яке зумовлене похибкою встановлення заготовки у ЗП $A_{2в}$ та похибкою центрування ЗП ПР $A_{2ц}$; $A_2 = A_{2в} + A_{2ц}$;

A_3 – відстань від осі ЗП ПР до бази відліку розмірів при автоматизованому переміщенні останнього згідно з програмою системи ЧПК (запрограмоване значення позиціонування ЗП ПР);

A_4 – відстань від бази відліку розмірів до основної бази робота, що визначає його положення відносно МРВ;

A_5 – відстань між ПР та МРВ;

A_6 – відстань від осі шпинделя МРВ до основної бази МРВ;

A_7 – відхилення від співвісності кулачків патрона по відношенню до осі шпинделя МРВ, що викликане похибкою встановлення патрона на шпиндель $A_{7в}$ та похибкою центрування кулачків патрона $A_{7ц}$; $A_7 = A_{7в} + A_{7ц}$.

Розмірний ланцюг A характеризує зв'язок між габаритами МРВ, ПР і відхиленням від співвісності. Цей зв'язок можна описати математично трьома рівняннями: рівнянням розмірного ланцюга у номіналах, рівнянням допусків цих розмірностей, яке відповідає методу досягнення точності, та рівнянням середніх відхилень розмірів.

При налагодженні РК при програмуванні ПР (рис. 8) розмір A_3 підбирається таким чином, щоб розмір A_4 знаходився в межах допустимих значень, тобто при налагодженні необхідно використовувати регулювання, однак при роботизованому завантаженні заготовок та розвантаженні деталей необхідно використовувати метод повної взаємозамінності.

В процесі експлуатації РК фактичне значення розміру A_4 в основному буде змінюватися через помилки позиціонування ПР, теплових деформацій, помилок при встановленні заготовки у ЗП. Наприклад, похибка позиціонування завантажувальних ПР може становити 0,5 мм і більше; вісь шпинделя токарного верстата, наприклад, 16К20РФ3, при нагріванні передньої бабки на 20°C зміщується у горизонтальній площині на 20 мкм, а у вертикальній – на 40 мкм (рис. 10). Виникає питання: який ПР слід використовувати: з точністю позиціонування ± 1 мм, $\pm 0,1$ мм або $\pm 0,01$ мм, враховуючи, що зі збільшенням точності позиціонування зростає вартість ПР? Відповідь на це питання можна отримати, провівши розмірний аналіз.

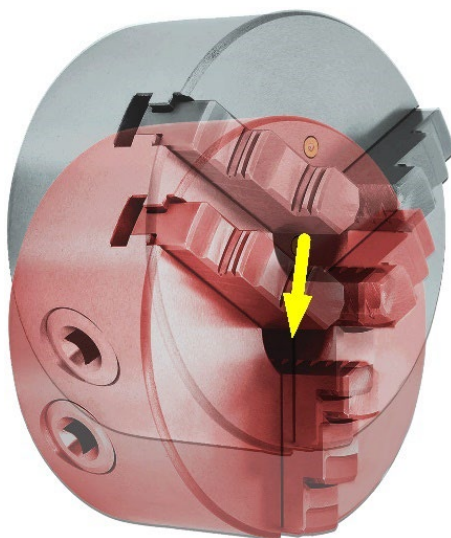


Рис. 10. Зміщення осі шпинделя МРВ внаслідок теплових деформацій
Джерело: розроблено авторами.

При автоматичній роботі РК необхідно забезпечити встановлення ПР кожної заготовки у патрон МРВ без підналагодження та регулювання, тому співвісність A_{Δ} повинна забезпечуватися методом повної взаємозамінності.

При повній взаємозамінності допуск замикаючої ланки повинен дорівнювати сумі полів допусків складових ланок: $T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7$, де $T_1 - T_7$ – допуски розмірів A відповідного номера (рис. 8). Так, допуск співвісності $A_{\Delta} = \pm 0,25$ мм дорівнює $T_{\Delta} = 0,5$ мм.

Розглянемо допуски складових розмірів.

Допуск співвісності T_1 вказується на кресленнику заготовки, яку планується обробляти на РК. Для необробленої поковки допуск може перевищити допуск вихідної ланки. Допуск T_2 визначається похибкою встановлення заготовки у ЗП ПР і похибкою центрування ЗП. Для необроблених поковок похибка встановлення може бути досить значною, в результаті чого сума допусків значно перевищить допуск T_{Δ} замикаючої ланки.

Отже, при прийнятих допусках забезпечити необхідні умови для роботизованого встановлення заготовки неможливо.

Існує декілька способів вирішення даної проблеми.

По-перше:

1) зменшення розмірних допусків складових ланок за рахунок застосування більш точного ЗП ПР з меншою похибкою центрування;

2) використання попередньо оброблених заготовок для зменшення похибки встановлення останніх;

3) розміщення ПР не на окремій платформі, а безпосередньо на станині або передній бабці МРВ;

4) обмеження діапазону робочих температур при експлуатації і таким чином зменшення складових допусків $T_2 - T_6$.

По-друге, можна розширити допуск замикаючої ланки T_{Δ} . З формули (2), з якої було отримано значення допуску, виходить, що розширення допуску при тій самій допустимій силі може бути досягнуто за рахунок зменшення жорсткості заготовки у ЗП ПР. Цей спосіб найбільш зручний і тому ЗП ПР зазвичай роблять підпружиненими. Однак надмірно зменшувати жорсткість також шкідливо, тому що при встановленні заготовок різної ваги буде виникати досить велика похибка позиціонування осі заготовки в ЗП по висоті. Обравши найдешевший ПР з точністю позиціонування ± 1 мм, можна визначити очікуване поле розсіювання ω_{Δ} розміром A_{Δ} за наступною формулою:

$$\omega_{\Delta} = \sum \omega_i, \quad (4)$$

де ω_i – поля розсіювання складових ланок.

Нехай $\omega_{\Delta} = 2,5$ мм. Тоді у ЗП ПР потрібно забезпечити максимальне зміщення заготовки $A'_{\Delta max} = \pm 1,25$ мм. Для цього жорсткість кріплення повинна бути не більше, ніж $j_{max} = P/A'_{\Delta max} = 100/1,25 = 80$ Н/мм.

При заданій жорсткості та необхідному значенні зміщення можна сконструювати підпружинену пружну підвіску ЗП ПР.

По-третє, можна використовувати ПР з адаптивною пошуковою системою керування. При цьому може змінитися структура та параметри розмірного зв'язку, метод досягнення точності замикаючої ланки: замість повної взаємозамінності буде використовуватися автоматичне регулювання розміру. Компенсатором у розмірному ланцюгу може виступати зміна позиціонування ЗП ПР, який управляється системою ЧПК.

Крім того, ПР можна оснастити системою технічного зору і штучним інтелектом для аналізу і контролю положення захоплюваної заготовки, тобто необхідна система адаптивного керування ПР.

Однак такий ПР обійдеться набагато дорожче, ніж стандартний завантажувальний робот, і при сучасному рівні розвитку техніки РК, оснащений таким ПР, навряд чи виявиться конкурентоспроможним для роботизованого завантаження заготовки у МРВ. Для цього достатньо розрахувати термін окупності додаткового оснащення ПР технічним зором і таким чином врахувати різницю у вартості інтелектуального та звичайного завантажувального ПР.

Але все ж таки якщо для роботизації встановлення заготовок виникне необхідність використання інтелектуального ПР, то для визначення необхідних вимог до датчиків інформації, системи керування, точності позиціонування тощо необхідно буде виявити та розрахувати розмірні зв'язки. В іншому випадку буде просто неможливо ні спроектувати новий ПР, ні обрати відповідний ПР із числа існуючих, ні запрограмувати його роботу.

Слід відзначити, що проведений розмірний аналіз роботизованого завантаження МРВ було проведено доволі спрощено, тільки для випадку зміщення осі заготовки відносно осі шпинделя, оскільки на практиці можливий і перекид осей останніх.

У загальному випадку положення в просторі одного об'єкта відносно іншого характеризується шістьма параметрами: трьома переміщеннями і трьома обертаннями систем координат. Для аналізу кожного з цих шести параметрів обов'язкова побудова відповідного розмірного ланцюга.

Розглянута задача роботизованого встановлення заготовки ПР у патрон МРВ схожа з багатьма іншими технологічними задачами, що виникають при складанні, наприклад:

- 1) при встановленні валу в гільзу або навпаки;
- 2) при автоматичному встановленні автооператором ОЦ різального інструменту в магазинне гніздо тощо.

Висновки. Розглянутий аналіз дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) при роботизації технологічних процесів аналіз розмірних зв'язків, що виникають, обов'язковий;
- 2) при роботизованому встановленні заготовки необхідно забезпечити відповідні розмірні зв'язки, інакше роботизоване встановлення заготовки неможливе;
- 3) забезпечення цих розмірних зв'язків безпосередньо впливає на якість та продуктивність роботизованих систем;
- 4) при роботизації виробничих процесів необхідно глибоко вивчити сутність технологічного процесу, який планується роботизувати, зокрема, виявити та розрахувати розмірні зв'язки, обрати метод досягнення точності і доцільні засоби реалізації розмірних зв'язків у роботизованому виробництві.

Список використаних джерел

1. Welcome to the presentation of World Robotics 2022 [Electronic resource] – Access mode https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf
2. Machine Tending Robots: Maximizing Your Production Output [Electronic resource] – Access mode
3. Forget the past, automate for the future [Electronic resource] – Access mode <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/automationsoftware/forget-the-past-automate-for-the-future>
4. The Advantages of CNC Machine Tending with Hanwha HCR Collaborative Robots [Electronic resource] – Access mode <https://factorysurplusdirect.com/the-advantages-of-cnc-machine-tending-with-hanwha-hcr-collaborative-robots/>
5. CNC Robotics: CNC Machining and Automated Robots [Electronic resource] – Access mode <https://www.rapidirect.com/blog/cnc-robotics/>

6. Smart robotic machine tending solutions [Electronic resource] – Access mode <https://www.fanuc.eu/dk/en/industrial-applications/machine-tending>
7. Приходько, В. П. Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів ресурс : навч. посіб. для студ. спец. 131 «Прикладна механіка» / В. П. Приходько ; КПІ ім. І. Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 249 с.
8. Паливода Ю. Є. Розмірні ланцюги : навч.-метод. посіб. / уклад. : Ю. Є. Паливода, А. Є. Дячун, Ю. Б. Капацла, І. Г. Ткаченко. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2018. – 132 с.
9. Основи технології складання : навч. посіб. для студ. спец. 131 "Прикладна механіка" / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новіков, В. О. Жовтобрюх, В. В. Стрельбицький. – Дніпро : ЛІРА, 2021. – 159 с.
10. 2D tolerance stack-up analysis with examples [Electronic resource] – Access mode <https://www.wasyresearch.com/2d-tolerance-stack-up-analysis-with-examples/>
11. Morse, E. P. A brief analysis of recent ISO tolerancing standards and their potential impact on digitalization of manufacturing [Electronic resource] / E. P. Morse, C. M. Shakarji, V. Srinivasan // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 75. – P. 11-18. – Access mode <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118305961?via%3Dihub>
12. Kosec, P. A comparison of the tolerance analysis methods in the open-loop assembly [Electronic resource] / P. Kosec, S. Škec, D. Miler // Advances in Production Engineering & Management. – 2020. – Vol. 15. – P. 44-56. – Access mode http://apem-journal.org/Archives/2020/Abstract-APEM15-1_044-056.html
13. Comparative study of tolerance analysis methods applied to a complex assembly / S. Ramnath, P. Haghghi, A. Chitale, J. K. Davidson, J. J. Shah // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 75. – P. 208-213, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.073>
14. Industrial Robot Solutions for Manufacturing. (б. д.). millsenc.co.uk. Взято 28 серпня 2023 р. з <https://www.millsenc.co.uk/automation-systems/industrial-robots/>

References

1. Welcome to the presentation of World Robotics 2022. (n.d.). ifr.org. https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf
2. Machine Tending Robots: Maximizing Your Production Output. (n.d.). howtorobot.com. <https://howtorobot.com/expert-insight/machine-tending-robots>
3. Forget the past, automate for the future. (n.d.). canadianmetalworking.com. <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/automationsoftware/forget-the-past-automate-for-the-future>
4. The Advantages of CNC Machine Tending with Hanwha HCR Collaborative Robots. (n.d.). factorysurplusdirect.com. <https://factorysurplusdirect.com/the-advantages-of-cnc-machine-tending-with-hanwha-hcr-collaborative-robots/>
5. CNC Robotics: CNC Machining and Automated Robots. (n.d.). rapiddirect.com. <https://www.rapiddirect.com/blog/cnc-robotics/>
6. Smart robotic machine tending solutions. (n.d.). fanuc.eu/dk/en. <https://www.fanuc.eu/dk/en/industrial-applications/machine-tending>
7. Prykhodko, V.P. (2021). Dimensional modeling and analysis of technological processes. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho.
8. Palyvoda, Yu.Ie., Diachun, A.Ie., Kapatsila, Yu.B., & Tkachenko, I.H. (2018). Dimensional chains. Ternopil: Ternopilskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puliuia.
9. Kremniev, H.P., Novikov, F.V., Zhovtobriukh, V.O., & Strelbitskiy V.V. (2021). Basics of assembly technology. Dnipro: LIRA.
10. 2D tolerance stack-up analysis with examples. (n.d.). wasyresearch.com. <https://www.wasyresearch.com/2d-tolerance-stack-up-analysis-with-examples/>
11. Morse, E.P., Shakarji, C.M., & Srinivasan, V. (2018). A brief analysis of recent ISO tolerancing standards and their potential impact on digitalization of manufacturing. *Procedia CIRP*, 75, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.080>

12. Kosec, P., Škec, S., & Miler, D. (2020). A comparison of the tolerance analysis methods in the open-loop assembly. *Advances in Production Engineering & Management*, 16(1), 44–56. <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.348>
13. Ramnath, S., Haghghi, P., Chitale, A., Davidson, J.K., & Shah, J.J. (2018). Comparative study of tolerance analysis methods applied to a complex assembly, *Procedia CIRP*, 75, 208–213, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.073>
14. Industrial Robot Solutions for Manufacturing. (n.d.). millscnc.co.uk. <https://www.millscnc.co.uk/automation-systems/industrial-robots/>

Отримано 30.08.2023

UDC 621.865.8

**Volodymyr Kravets¹, Oleksandr Kravets², Yuriy Adamenko³, Serhii Lapkovsky⁴,
Volodymyr Korenkov⁵, Volodymyr Frolov⁶**

¹Engineer of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: bond118@meta.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858> ResearcherID: ITU-8413-2023

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: om.kravets@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956> ResearcherID: IUQ-7186-2023

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: yuriy.adamenko@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4232-3206> ResearcherID: ACT-0127-2022

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: Lapkovsky@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231> ResearcherID: HCH-3837-2022

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: volodymyr.korenkov@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1911-9496> ResearcherID: ADG-1590-2022

⁶PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X> ResearcherID: ACH-0071-2022

ANALYSIS OF DIMENSIONAL RELATIONSHIPS OF THE ROBOTIC COMPLEX

The use of industrial robots is an indispensable way to improve the quality and productivity of modern production. Currently, among all robotic technological operations, the manipulation of production objects is the most common robotic operation. The article is devoted to solving the issues of dimensional analysis of robotic metalworking complexes, because currently dimensional analysis is a very effective modern means of ensuring both quantitative and qualitative analyzes of existing and synthesis of new technical systems and technological processes. The purpose of the article is to solve the problem of detecting and calculating dimensional relationships during the robotic installation of blanks or parts in a metal cutting machine. The article examines the dimensional relationships that arise during the robotic installation of a cylindrical blanks in a self-centering lathe chuck of a metal-cutting machine using the example of a robotic metalworking complex. For this robotic complex, the relationships between dimensional links were determined and the corresponding dimensional chain was obtained, which characterizes the relationship between the dimensions of the metal-cutting machine, the industrial robot and the deviation from co-axis. This connection can be represented mathematically by three equations: the equation of the dimensional chain in denominations; the tolerance equation of these dimensions, which corresponds to the method of achieving accuracy; by the equation of average size deviations. During the automatic operation of the robotic complex, it is necessary to ensure that the industrial robot installs each blank in the chuck of the metal-cutting machine without adjustment and adjustment, therefore, the alignment must be ensured by the method of complete interchangeability. With full interchangeability, the tolerance of the closing link must be equal to the sum of the tolerance fields of the component links. The given dimensional analysis of the robotic loading of the metal-cutting machine was carried out in a rather simplified manner, only for the case of displacement of the axis of the blank from the axis of the spindle, since in practice it is also possible to misalign the axes of the latter. In general, the position of one object in space relative to another is characterized by six parameters: three movements and three rotations of coordinate systems. For the analysis of each of the six parameters, the construction of the corresponding dimensional chain is mandatory.

Keywords: industrial robot; machine tool; robotic complex; dimensional connections; dimensional chain.

Fig.: 10. References: 14.