

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-68-86](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-68-86)

УДК 621.757:621.793

**Василь Петрович Приходько¹, Людмила Миколаївна Данилова²,
Сергій Вікторович Лапковський³, Сергій Петрович Сапон⁴,
Володимир Костянтинівич Фролов⁵, Олександр Михайлович Кравець⁶**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: privas0718@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>. Researcher ID: HDM-7277-2022

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: ldanylova@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. Researcher ID: ADU-9265-2022

³кандидат технічних наук, доцент, 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>. Researcher ID: HCH-3837-2022

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: s.sapon@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. Researcher ID: IZE-2184-2023

⁵кандидат технічних наук, доцент, 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>. Researcher ID: ACH-0071-2022

⁶кандидат 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>. Researcher ID: IUQ-7186-2023

АВТОМАТИЗОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СХЕМ ФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗМІРІВ НА ЇХНЮ ТОЧНІСТЬ

Для дослідження впливу взаємокомпенсації похибок на точність отримуваних розмірів виконано аналіз особливостей їх формування при обробленні на верстатах з ЧПК. Сформульовані умови комп'ютерного моделювання процесів оброблення. Розроблені алгоритми та спеціальна програма для моделювання, за допомогою якої виконане оцінювання впливу на точність розмірів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів для різних схем їх формування. Отримані графічні та аналітичні залежності відображають вплив умов та схем оброблення на величину коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок, що необхідно враховувати при оцінюванні точності розмірів. Показано, що використання коефіцієнтів взаємної компенсації похибок забезпечує підвищення якості прогнозування точності розмірів різних типів при обробленні на токарних верстатах з ЧПК.

Ключові слова: розмірний аналіз; оцінка точності розмірів; взаємокомпенсація похибок розмірів, точність обробки.

Рис.: 9. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. При проектуванні технологічних процесів (ТП) оброблення заготовок на токарних верстатах з ЧПК важливим етапом є розмірне моделювання та аналіз ТП (РМА ТП). Одним з основних завдань РМА ТП є оцінка можливості забезпечити необхідну точність розмірних параметрів оброблюваних деталей при обраній структурі ТП. Основою для виконання такої оцінки є визначення прогнозних величин полів розсіювання технологічних і конструкторських розмірів шляхом розрахунку операційних розмірних ланцюгів. При виконанні таких розрахунків важливим є забезпечення високої якості прогнозування відповідних параметрів точності, зокрема величин полів розсіювання відповідних розмірів, наближення їх до реальних величин, оскільки отримані таким чином прогнозні оцінки точності розмірів є основою для прийняття рішень щодо структури технологічних процесів. Вирішення такої проблеми можливо за рахунок реалізації комплексу заходів, які передбачають достатньо повне врахування впливу значущих факторів, використання актуальних і достовірних статистичних даних та методологічних підходів. Існуючі методології прогнозування точності розмірів,

не є досконалими та не забезпечують необхідну повноту врахування значущих факторів, зокрема вплив, на точність отримуваних розмірів, особливостей їх формування. Зокрема це стосується взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів (ТР), внаслідок чого знижується якість прогнозування, а отже, і ефективність рекомендацій щодо шляхів поліпшення структури розроблюваних ТП. Недоліки в оцінці прогнозної точності проявляються на етапі проектування – в необхідності забезпечення надмірних запасів точності шляхом уведення додаткового оброблення поверхонь і, як наслідок, – зниження продуктивності та підвищення собівартості оброблення на етапі виробництва.

У зв'язку з чим, дослідження та визначення параметрів взаємокомпенсації похибок, необхідних для більш повного урахування їх впливу на точність отримуваних розмірів, як одного з важливих чинників, що впливають на якість прогнозування для різних схем формування розмірів, є актуальною проблемою.

Постановка проблеми. При обробленні заготовок на верстатах з ЧПК на точність отримуваних розмірів впливає багато факторів тому при прогнозуванні, для досягнення високої якості необхідно мати якісну методологію, а також знати величини параметрів, що характеризують вплив відповідних факторів, використовуючи які можна врахувати зазначений вплив і таким чином наблизити прогнозні параметри точності до реальних значень.

Важливим фактором, урахування впливу якого може суттєво поліпшити якість прогнозування, є взаємокомпенсація похибок (ВКП) технологічних розмірів (ТР), яка має місце в процесах оброблення і яка повинна враховуватись при прогнозуванні.

Відомо, що взаємокомпенсація похибок ТР є важливим чинником, який має суттєвий вплив на точність конструкторських розмірів (КР) і який необхідно враховувати при оцінці їхньої точності [1-3]. Неврахування або неповне врахування взаємокомпенсації призводить до неякісної оцінки точності КР та ТП загалом, щодо можливості забезпечити задану точність розмірів і, як наслідок, – до помилкових рекомендацій щодо необхідності коригування ТП.

Величина ВКП та ступінь її впливу залежить від схем формування розмірів і методики її виявлення та врахування при прогнозуванні. На сьогодні явище ВКП для різних схем формування розмірів вивчено недостатньо. Це проявляється в обмеженості або відсутності інформації щодо коефіцієнтів ВКП, які необхідні для оцінки та урахування їхнього впливу при прогнозуванні точності розмірів, отримуваних при обробленні. Для визначення та урахування величини коефіцієнтів ВКП необхідне проведення подальших досліджень, спрямованих на виявлення їхнього впливу на точність розмірів, для різних типів розмірів, схем, способів їх формування та умов оброблення. Також необхідно отримання кількісних значень параметрів ВКП, які б дозволили врахувати зазначений вплив при розрахунках прогнозних оцінок точності.

Оцінка впливу факторів на точність отримуваних розмірів може бути виконана декількома методами: 1) на основі аналітичного аналізу та розрахунків; 2) на основі аналізу експериментально – статистичних даних, що характеризують точність процесів оброблення; 3) на основі результатів комп'ютерного моделювання та аналізу процесу оброблення.

Кожний із зазначених методів має свої переваги та недоліки, тому розумною стратегією дослідження слід вважати комплексне їх використання, що дозволить повніше дослідити процеси, а також перевірити та підтвердити коректність результатів та висновків, отриманих різними методами, краще і повніше використати переваги кожного із них. У цій роботі використовувались: попередній аналітичний аналіз (для визначення умов машинного моделювання), комп'ютерне моделювання з використанням розробленої і представленої в роботі програми та методологія на основі використання експериментально-статистичних даних для підтвердження коректності комп'ютерного моделювання.

Отримання в результаті досліджень кількісних оцінок параметрів ВКП для різних схем формування розмірів, визначення впливу на їхню величину умов оброблення, а також розроблення рекомендацій та демонстрація прикладів їх використання у практичній діяльності, при використанні різних способів формування розмірів дозволить підвищити якість прогнозування, а отже, і якість розроблюваних технологічних процесів оброблення заготовок на токарних верстатах із ЧПК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У теорії і практиці сучасного машинобудівного виробництва різним аспектам РМА ТП і аналізу конструкцій деталей, вузлів та складальних одиниць приділяється значна увага, про що свідчать наукові та науково-методичні публікації, у яких висвітлюється вирішення різних завдань та наводяться результати досліджень [1-8].

Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів [1-6] є однією зі складових проєктування ТП, яка впливає не тільки на рівень якості ТП щодо забезпечення вимог до точності розмірів, а є також інструментом створення раціональної структури ТП.

Використання РМА ТП сприяє створенню більш досконалих ТП виготовлення деталей та складання вузлів і машин, які забезпечують також підвищення продуктивності та зниження собівартості оброблення. Це вимагає подальшого вдосконалення методології РМА ТП для підвищення продуктивності процесів аналізу та оцінювання, що досягається автоматизацією основних процедур [2; 8; 9; 13-15] і для поліпшення якості та достовірності відповідних оцінок, рекомендацій, спрямованих на вдосконалення відповідних ТП.

В умовах широкого використання верстатів з ЧПК важливе значення має якісна оцінка прогнозної точності на етапі проєктування ТП, яка є основою для формування структури операцій та ТП в цілому, а отже, впливає на забезпечення не тільки точності розмірів, а й на продуктивність та собівартість оброблення.

Основними напрямками досліджень та вдосконалення методології оцінки точності розмірів є автоматизація та формалізація процедур РМА ТП [2; 7-9; 13], отримання та актуалізація даних про точність розмірів при різних процесах та способах оброблення [1-4; 10-12], вдосконалення методології оцінки прогнозної точності на основі дослідження та отримання нових даних [8; 13-15].

Незважаючи на визнання істотного впливу ВКП технологічних розмірів на точність конструкторських розмірів [1-6; 13], при оцінюванні такого впливу та визначенні прогнозної точності немає єдиної формалізованої методології. Є тільки обмежена кількість необхідних статистичних параметрів, що характеризують ВКП, зокрема величин та коефіцієнтів ВКП, які необхідні для її урахування та виконання такої оцінки.

У зв'язку з цим за способом урахування ВКП, на даний час використовуються різні методологічні підходи.

1. На основі використання коефіцієнтів ВКП та формальних розрахунків з використанням відповідних операційних розмірних ланцюгів (ОРЛ) [2; 13; 14].

2. На основі використання «замикаючих – замінюючих» ланок ОРЛ [1; 3].

3. На основі виявлення та розрахунку пов'язаних ОРЛ [3; 4].

Загальною проблемою для всіх наведених методів урахування ВКП є обмеженість даних та інформації, необхідних для їх практичного використання. Крім того, при використанні останніх двох методів не вирішується проблема формалізованого визначення технологічних допусків складових ланок, має місце також їх складність та трудомісткість, що є перешкодою для автоматизації [13]. Через зазначені проблеми, на практиці, у деяких випадках, взаємокомпенсацію похибок ТР взагалі не враховують, а отримані попередні результати додатково уточнюють у процесі впровадження ТП, що призводить до збільшення витрат. Тому такий підхід використовують тільки для попередньої узагальненої оцінки ТП.

Отже, на сьогодні одним із дієвих способів підвищення якості оцінки прогнозованої точності отримуваних розмірів є більш повне урахування впливу схем їх формування та взаємокомпенсації похибок ТР на основі методології використання коефіцієнтів ВКП. Така методологія дозволяє формалізувати процеси виявлення в операційних розмірних ланцюгах складових ланок – технологічних розмірів із ВКП, а також виконати розрахунків прогнозних оцінок точності замикаючих ланок – конструкторських розмірів з урахуванням ВКП. Завдяки цьому вона є у наш час найбільш прийнятною при проведенні РМА ТП, у тому числі для автоматизації відповідних процедур. Для її використання необхідними умовами є можливість визначення величини коефіцієнтів ВКП, що відповідають умовам оброблення та наявність достатньої кількості актуальних довідкових даних, що характеризують параметри точності процесів та способів оброблення деталей. Дані, що характеризують середню економічну точність, на теперішній час представлені достатньо широко [1; 2; 3; 10-12], але у зв'язку з оновленням конструкцій верстатів доцільна їх періодична актуалізація. Вибір величини коефіцієнтів ВКП для різних схем і умов формування розмірів через обмеженість або повну відсутність відповідних даних є проблематичним. Водночас виявлення та знання такого впливу повинно забезпечити більш якісний вибір величин коефіцієнтів ВКП з урахуванням конкретних умов оброблення, а в підсумку – підвищення точності прогнозування.

На цей час є деяка кількість даних [1; 2; 13] щодо величини коефіцієнтів ВКП при обробленні одним інструментом, які визначались на основі використання експериментально-статистичних даних, що характеризують точність різних способів оброблення [1-4; 10-12]. Одержані таким чином значення потребують подальшого дослідження для виявлення впливу на їхню величину різних факторів, що характеризують процес оброблення і потребують підтвердження з використанням інших методів дослідження. Для окремих схем оброблення, наприклад, для схем формування розмірів набором інструментів дані щодо коефіцієнтів ВКП, на цей час, взагалі відсутні. Це є перешкодою для широкого використання зазначеної методології урахування ВКП і для усунення якої необхідне проведення подальших досліджень, спрямованих на визначення кількісних оцінок коефіцієнтів ВКП для різних умов оброблення, що і було предметом досліджень, результати яких представлені в цій статті.

Виявлення та знання такого впливу повинно забезпечити більш якісний вибір величин коефіцієнтів ВКП з урахуванням конкретних умов оброблення, що в підсумку забезпечить підвищення точності прогнозування.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На теперішній час недостатньо вивчений і потребує дослідження вплив схем формування розмірів та факторів, що характеризують процес оброблення на величину коефіцієнтів ВКП. Відомі певні рекомендації щодо величин коефіцієнтів ВКП при формуванні розмірів обробленням одним різцем за програмою ЧПК, але відсутні моделі впливу умов оброблення. Для підвищення якості прогнозованої оцінки точності розмірів на основі урахування коефіцієнтів ВКП необхідно проведення дослідження інших схем формування розмірів із визначенням значень відповідних коефіцієнтів ВКП, а також з отриманням моделей впливу різних факторів на величини коефіцієнтів ВКП. Зокрема це стосується дослідження схем формування розмірів набором інструментів з одностороннім та різностороннім розташуванням припусків на оброблюваних поверхнях.

Через відсутність залежностей, що відображають вплив різних факторів на величину ВКП і, зокрема, на величину коефіцієнтів ВКП, неможливо вибрати оптимальне їх значення, яке б враховувало умови оброблення. Усі перелічені чинники знижують якість оцінки прогнозованої точності оброблення та вказують на необхідність проведення подальших досліджень спрямованих на вирішення перелічених завдань.

Аналіз виконання оцінки прогнозної точності замикаючих ланок – конструкторських розмірів, при розмірному моделюванні технологічних процесів, свідчить про те, що на практиці не повною мірою враховуються особливості їх формування. Зокрема, недостатньо враховується ВКП технологічних розмірів, що знижує достовірність прогнозних оцінок точності та може призвести до необґрунтованих висновків щодо здатності розроблених ТП забезпечити необхідну точність конструкторських розмірів або щодо необхідності та напрямків їх можливого поліпшення. При неврахуванні такого ефекту розрахунков показе значну величину розсіювання розміру A , яка може перевищити величину допуску, при реальній меншій або незначній величині такого розсіювання. Проблема в тому, що для більшості схем, способів та методів оброблення значення коефіцієнтів ВКП визначені тільки для окремих випадків, або невідомі. Крім того, відсутні моделі впливу умов оброблення на їхню величину, що обмежує можливості оптимального вибору коефіцієнтів, відповідно до умов оброблення.

Для вирішення зазначеної проблеми та для визначення величини коефіцієнтів ВКП при токарному обробленні, з урахуванням впливу факторів, що характеризують процес оброблення, була розроблена спеціальна програма для моделювання розсіювання величин технологічних розмірів та ВКП залежно від зміни факторів процесу оброблення для отримання відповідних моделей.

Мета статті – моделювання процесів формування розмірів для оцінки впливу різних факторів на величину взаємної компенсації похибок технологічних розмірів. Визначення величини коефіцієнтів, що її характеризують, необхідних для урахування взаємокомпенсації при прогнозуванні точності отримуваних розмірів. Розроблення рекомендацій щодо використання отриманих результатів для прогнозування точності розмірів при обробленні на токарних верстатах.

Виклад основного матеріалу. Моделювання процесів формування розмірів, на основі створення алгоритмів та розроблення спеціальної програми, виконувалось для оцінки впливу різних факторів на величину ВКП технологічних розмірів. У процесі дослідження визначались величини ВКП, розраховувались коефіцієнти ВКП для різних схем і умов формування розмірів, на основі чого оцінювався вплив на них різних факторів. Отримані на основі досліджень моделі будуть використовуватись для отримання параметрів ВКП, що необхідні для проведення прогнозних розрахунків і оцінок точності отримуваних розмірів у різних умовах оброблення.

У цій роботі для визначення та оцінки впливу параметрів ВКП на точність розмірів різних типів виконувалось комп'ютерне моделювання з використанням розробленої авторами програми. Крім того, для підтвердження коректності моделювання в окремих випадках була використана методологія визначення параметрів ВКП на основі експериментально-статистичних даних [13].

Розроблена програма моделює оброблення з урахуванням впливу пружних деформацій технологічної системи, внаслідок коливання припусків та твердості заготовок, на розсіювання величин технологічних розмірів та ВКП. Вона імітує оброблення і отримання лінійних розмірів за трьома схемами формування:

- 1) послідовне оброблення двох поверхонь одним різцем по програмі ЧПК;
- 2) оброблення набором різців двох поверхонь з однаковим (одностороннім) розташуванням припусків;
- 3) оброблення набором різців двох поверхонь з різностороннім (один – ліворуч, другий – праворуч від оброблюваної поверхні) розташуванням припусків.

Програма обчислює значення технологічних і конструкторських розмірів кожної заготовки встановленої вибірки, розраховує величини полів розсіювання технологічних розмірів $\omega F1, \omega F2$ і конструкторського розміру $\omega A1$, а також величину взаємокомпенсації похибок ω_k .

Вихідними даними для роботи програми є: геометричні параметри заготовки; фізико-механічні характеристики заготовки; параметри, що характеризують ТОС; параметри процесу різання; схема формування розмірів. Для виконання перелічених завдань програма реалізує відповідні алгоритми.

З використанням комп'ютерного моделювання досліджувались наступні схеми формування конструкторського розміру (КР) $A1$:

- 1) з послідовним обробленням одним різцем за програмою ЧПК двох поверхонь з одностороннім розташуванням припусків, відповідно до схеми (рис. 1) [13];
- 2) формування розміру обробленням набором інструментів:
 - а) двох поверхонь з одностороннім розташуванням припусків (рис. 2);
 - б) двох поверхонь із різностороннім розташуванням припусків згідно зі схемою (рис. 3);
- 3) виконувався аналіз схеми (рис. 3) з послідовним обробленням різцями за програмою ЧПК двох поверхонь із різностороннім розташуванням припусків.

Для представлення програми моделювання розглянемо механізми та особливості формування КР $A1$ при використанні різних схем формування розмірів.

В усіх випадках рівняння операційних розмірних ланцюгів, що описуватимуть формування КР $A1$ матимуть такий вираз:

$$[A] = -F1 + F2. \quad (1)$$

У схемах одностороннього розташування припусків на оброблюваних поверхнях, при обробленні одним інструментом (рис. 1) та набором інструментів (рис. 2), які брали до уваги в процесі досліджень, при одержанні технологічних розмірів $F1, F2$ коливання положень їх вимірювальних баз, а також оброблюваних поверхонь значною мірою викликані тими ж самими причинами (факторами), наприклад, наявністю пружних деформацій $\Delta x = \Delta P_x / C_x$.

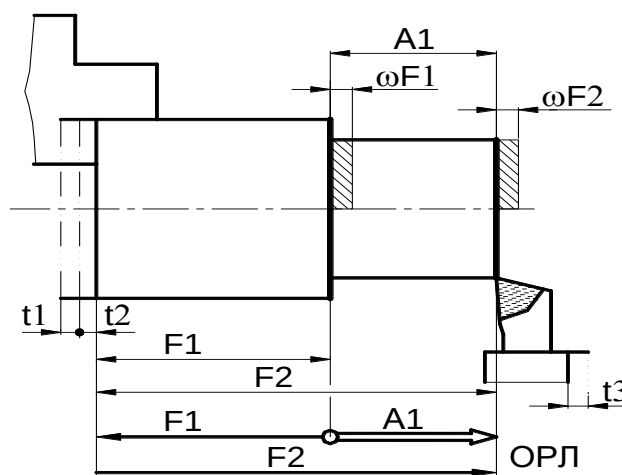


Рис. 1. Схема формування розміру $A1$ послідовним обробленням двох поверхонь одним різцем по програмі ЧПК та відповідний ОРЛ [13]

Наявність відповідних пружних деформацій і виникнення похибки установки заготовки, наприклад, внаслідок похибок базування, закріплення та пристрою буде викликати синхронне зміщення вимірювальної бази (лівого торця деталі) на величини $t1, t2$ і внаслідок чого однакову зміну обох технологічних розмірів $F1$ і $F2$, а оскільки вони є складовими ланками різних типів ($F1$ — зменшуюча, $F2$ — збільшуюча), це приведе до повної взаємної компенсації таких похибок.

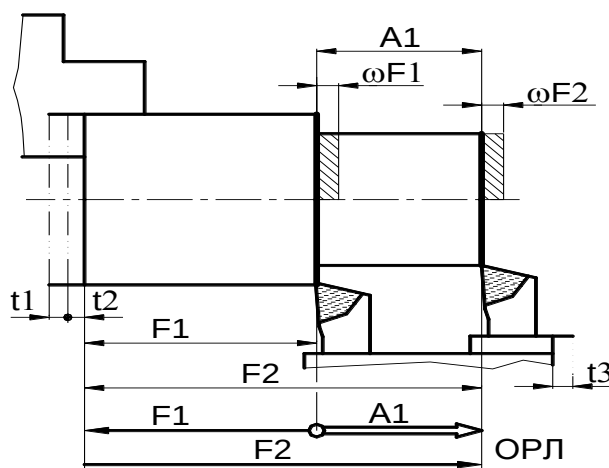


Рис. 2. Схема оброблення набором інструментів та розмірний ланцюг, що описує розмірні зв'язки (одностороннє розташування припусків)

Джерело: розроблено авторами.

Таке ж синхронне зміщення в протилежному напрямку, внаслідок пружних деформацій (t_3) одного різця чи набору різців з інструментальним блоком, будуть мати обидві оброблювані поверхні, наслідком чого буде синхронна зміна (збільшення) технологічних розмірів F_1 , F_2 . Величини зміни розмірів F_1 , F_2 , внаслідок зміщення різальних кромки обох різців можуть відрізнятись на деяку величину, через це, а також через наявність можливого впливу інших факторів, буде мати місце значна, але не повна, а часткова компенсація відповідних похибок. Зауважимо, що механізми взаємокомпенсації при обробленні поверхонь з одностороннім розташуванням припусків одним різцем і набором інструментів будуть подібними і відповідатимуть представленому вище.

У той же час, можна очікувати, що внаслідок зв'язаності різців в інструментальній наладці, їх зміщення внаслідок деформацій будуть відзначатись більшою синхронністю як за напрямом, так і за величиною, наслідком чого може бути більша величина ВКП ТР. Цю гіпотезу доцільно перевірити за результатами комп'ютерного моделювання.

Для окремої конкретної деталі, з урахуванням відповідних похибок (відхилень t_i), переважно викликаних пружними деформаціями, величина КР A_1 згідно з (1) буде дорівнювати:

$$[A_i] = -(F_{1i} + t_1 + t_2 + t_{3i}) + F_2 + t_1 + t_2 + t_{32} = -F_1 + F_2 - t_{3i} + t_{32}.$$

Для спрощення позначимо похибки технологічних розмірів F_1 , F_2 в i -му випробуванні відповідно: $\Delta 1_i = t_{3i}$; $\Delta 2_i = t_{32}$.

Тоді сумарна похибка конструкторського розміру A_1 в кожному випробуванні буде визначатись на основі отриманих комп'ютерним моделюванням похибок ТР таким чином:

$$\Delta A_{1i} = -\Delta 1_i + \Delta 2_i. \quad (2)$$

Отримана таким чином величина похибки КР A_1 вже буде враховувати взаємокомпенсацію похибок ТР, тобто:

$$\Delta A_{1ik} = -\Delta 1_i + \Delta 2_i. \quad (3)$$

Таким чином, це означає, що розраховане поточне значення ΔA_{1ik} в i випробуванні буде: $A_{1ik} = -F_{1i} + F_{2i}$. При різносторонньому розташуванні припусків на оброблюваних поверхнях, зв'язаних КР A_1 (рис. 3) напрями переміщення різальних кромки різців будуть протилежними, а отже, і похибки ТР при визначенні похибок конструкторського розміру A_1 повинні додаватись:

$$\Delta A_{1i} = \Delta 1_i + \Delta 2_i. \quad (4)$$

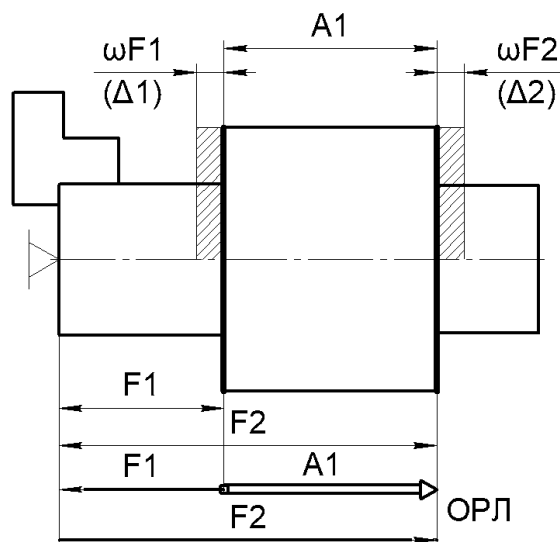


Рис. 3. Схема оброблення (різностороннє розташування припусків) та розмірний ланцюг, що описує розмірні зв'язки

Джерело: розроблено авторами.

Величини елементарних похибок у кожному випробуванні розраховувались з урахуванням коливання твердості та припуску при обробленні кожної поверхні відповідної заготовки та значень параметрів процесу різання, ТОС, фізико-механічних характеристик матеріалу заготовки, які враховувались при визначенні відповідних сил різання та деформацій.

Таким чином, для кожної вибірки результати випробувань формувались на основі заданих (незмінних) умов оброблення (схема формування розмірів, режими різання, жорсткість ТОС, параметри інструменту, характеристики заготовки), але з імітацією коливання твердості й величин припусків.

Колівання припуску відтворювалось наступним чином: для вибраної схеми оброблення, з урахуванням допуску на відповідний розмір заготовки, визначалось мінімальне значення припуску h_{min} до якого додавалась частка допуску, розрахована за допомогою випадкового числа, згенерованого програмою:

$$h_i = h_{min} + x \cdot [ES - EI]_i, \quad (5)$$

де x – випадкове число, $x \in [0; 1]$, ES та EI – відповідно верхнє та нижнє граничні відхилення розміру, мм.

Колівання твердості оброблюваних поверхонь реалізовано аналогічно, тобто визначалось мінімальне значення твердості матеріалу HB_{min} , задане у вихідних даних, а до нього додавалось значення частини інтервалу $(HB_{max} - HB_{min})$, розраховане за допомогою згенерованого випадкового числа:

$$HB_1 = HB_{min} + y \cdot [HB_{max} - HB_{min}], \quad (6)$$

де y – випадкове число, $y \in [0; 1]$, HB_{max} та HB_{min} – максимальне та мінімальне значення твердості матеріалу.

У програмі прийнято коливання твердості $\Delta HB = 10\%$ – в межах однієї деталі, а саме $HB_2 = HB_1 \pm 5\%$. Величину HB_2 отримують також з використанням генератора випадкових чисел. Аналогічний підхід використовувався при визначенні припусків. Таким чином відтворювався вплив зазначених факторів на точність розмірів, оскільки це має місце та характеризує реальні умови оброблення і є основною причиною виникнення відмінностей умов оброблення, а отже, і величин похибок отримуваних розмірів $F1$, $F2$.

З урахуванням того, що програма імітує отримання лінійних розмірів з обробленням торцевих поверхонь, для кожного випробування у вибірці з урахуванням відповідних коливальних глибини різання і твердості заготовки розраховувалась величина сили різання P_x в напрямку осі x за загальновідомою залежністю [16]:

$$P_x = 9,8 C_p h^x f_o^y V^n k_p, \quad (7)$$

де C_p – постійний коефіцієнт, x, y, n – показники степені, що враховують вид обробки, матеріал різальної частини інструменту та фізико-механічні властивості матеріалу заготовки, h – глибина різання, мм; f_o – подача на оберт, мм/об, V – швидкість різання, м/хв, k_p – коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу та геометричні параметри різальної частини інструмента.

Далі з урахуванням відповідних величин сили різання при обробленні поверхонь з витримуванням розмірів $F1, F2$, на основі заданої жорсткості системи C_x в напрямку осі x , розраховувались відповідні похибки: $\Delta_{ij} = P_{xij}/C_x$, де Δ_{ij} – похибка при обробленні j -ї поверхні, i -ї деталі. У цьому випадку ($\Delta_{1i}; \Delta_{2i}$).

Використовуючи представлений алгоритм, у програмі моделювались та формувались відповідні вибірки похибок технологічних розмірів $F1, F2$, які використовувались для розрахунків похибок конструкторського розміру $A1$. При цьому для схем оброблення поверхонь з одностороннім розташуванням припусків та для встановлених у вихідних даних умов оброблення, значення похибок конструкторського розміру $A1$ розраховувались на основі рівняння (3), з урахуванням взаємокомпенсації похибок ТР. Для схем оброблення з різностороннім розташуванням припусків на оброблюваних поверхнях значення похибок конструкторського розміру $A1$ розраховувалось з використанням рівняння (4).

Для оцінки точності та подальшого аналізу, з використанням, отриманих у вибірці, похибок відповідних розмірів, згідно з наведеним алгоритмом для кожної вибірки розраховувались значення середньоквадратичних відхилень S_i (8), а потім величини полів розсіювання ($\omega F_i = 6S_i$) технологічних розмірів $\omega F1, \omega F2$, а також величина поля розсіювання конструкторського розміру з урахуванням взаємокомпенсації похибок ($\omega A1_k = 6S_k$).

$$S_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{N-1}}. \quad (8)$$

де N – заданий обсяг вибірки (кількість випробувань); Δ_i – похибка розміру; $\bar{\Delta}$ – середнє арифметичне похибок розміру.

Подальший розрахунок параметрів, що характеризують величини ВКП, виконувався за програмою з використанням такого алгоритму:

1. За отриманими величинами $\omega F1, \omega F2$ та рівнянням (1) розраховувалась прогнозна величина поля розсіювання КР $\omega A1$ без урахування ВКП технологічних розмірів:

$$[\omega A1] = \omega F1 + \omega F2. \quad (9)$$

2. Розрахункова величина поля розсіювання КР $\omega A1_p$, з урахуванням ВКП технологічних розмірів, може бути визначена з використанням рівняння (10) [1; 2; 13] на основі, отриманих значень величин $\omega F1, \omega F2$ та невідомої величини ВКП (ω_k):

$$[\omega A1_p] = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega_k. \quad (10)$$

3. Для визначення величини ВКП (ω_k), отриману комп'ютерним моделюванням величину поля розсіювання конструкторського розміру, з урахуванням взаємокомпенсації ($\omega A1_k$), прирівнювали до правої частини рівняння (10):

$$[\omega A1_k] = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega_k. \quad (11)$$

4. З рівняння (11) знаходили величину взаємокомпенсації похибок ТР для заданих умов оброблення:

$$2\omega_k = \omega F1 + \omega F2 - [\omega A_k]. \quad (12)$$

5. Розраховували величину коефіцієнта взаємокомпенсації k , як частки від меншої величини поля розсіювання ТР: прийнято, що $2\omega_k = 2 \cdot k \cdot \omega F_i$, відповідно $\omega_k = k \cdot \omega F_i$, а коефіцієнт ВКП визначався як $k = \omega_k / \omega F_i$.

Відзначимо, що використання в прогностичних розрахунках відносної характеристики взаємокомпенсації похибок, а саме: коефіцієнта взаємокомпенсації похибок k є більш ефективним, зручним і універсальним у порівнянні з абсолютними величинами взаємокомпенсації. Такий підхід при виконанні розрахунків прогностичної точності дозволяє розширити сферу його застосування, а також зменшити чутливість отриманих результатів і висновків до зміни умов оброблення, можливих похибок у розрахунках сил різання, жорсткості ТОС та інших параметрів, оскільки їх зміни будуть відноситись до оброблення обох зв'язаних розміром поверхонь. Зазначені зміни факторів можуть спричиняти зміну абсолютних значень величинами взаємокомпенсації, але значно менше впливатимуть на величину коефіцієнта взаємокомпенсації похибок, що підвищує його стійкість до зміни умов оброблення.

Водночас час є фактори, які мають істотний вплив на величину коефіцієнта ВКП, зокрема, одним із таких факторів є схема формування конструкторського розміру.

Для вивчення впливу схем формування КР на величину ВКП у програмі реалізовано окреме моделювання різних схем.

Таким чином, у результаті моделювання, згідно із заданими умовами оброблення (рис. 4), для кожної вибірки отримували протокол результатів, що містить значення відхилень розмірів F1, F2, A1, відповідно $\Delta 1_i$, $\Delta 2_i$, $\Delta A1_{ik}$ чи $\Delta A1_i$ та результати розрахунків $\omega F1$, $\omega F2$, $\omega A1_k$, що виводяться на екран у формі таблиці (рис. 5) після натискання кнопки «Оброблення результатів».

Оцінювання точності та взаємокомпенсації похибок розміру

Вихідні дані

Характеристика заготовки

	D1, мм	D2, мм	D3, мм	Розмір F1, мм	Розмір F2, мм
Номінал, розмір	55	44	34	55	106
Верхнє відх.	0.5	0.4	0.3	0.5	0.6
Нижнє відх.	-0.25	-0.2	-0.15	-0.25	-0.3

Матеріал заготовки:

Твердість, НВ

Мінімальна	Максимальна
190	210

Параметри технологічної системи

Жорсткість супорта, Н/мм:

Виліт різця, мм:

Розміри державки, ВхН:

Режими різання

Глибина різання, мм:

Подача, мм/об:

Частота, об/хв:

Параметри деталі

	D1, мм	D2, мм	D3, мм	Розмір F1, мм	Розмір F2, мм
Номінал, розмір	50	40	30	50	100
Допуск [мм]	0.12	0.1	0.08	0.2	0.22

Схема оброблення

☒ Послідовне оброблення за програмою

☐ Оброблення з поперечною подачею

☐ Оброблення з поздовжньою подачею

Характеристика різця

Матеріал різця:

Кут в плані φ, °:

Розмір партії деталей

Кількість деталей N, шт:

Розрахунок Результат Вихід

Рис. 4. Інтерфейс програми для схеми формування розміру за програмою ЧПК, з одностороннім розташуванням припусків на оброблюваних поверхнях Джерело: розроблено авторами.

Рис. 5. Приклад фрагмента таблиці результатів моделювання

Джерело: розроблено авторами.

Завданням цих досліджень було визначення впливу різних факторів та умов оброблення на величину коефіцієнта ВКП. Для кожного випробування та умов формування розмірів, з метою забезпечення адекватних результатів, виконувалось триразове повторення моделювання. На основі отриманих результатів розраховувались середні значення величини коефіцієнтів взаємокомпенсації, які використовувались при формуванні та представленні графічних і математичних моделей впливу відповідних факторів, а також при аналізі результатів та розробленні відповідних рекомендацій. Приклади представлення отриманих результатів для різних умов формування розмірів наведено в табл. 1, а також у вигляді графічних залежностей, показаних нижче.

Таблиця 1 – Результати розрахунків коефіцієнтів взаємокомпенсації k – оброблення набором інструментів поверхонь з одностороннім розташування припусків

№ випробування	№ з/п	$\omega F1$	$\omega F2$	$\omega A1$	ωk	k_i	$k_{ср}$
1	1	0,076	0,095	0,038	0,066	0,868	
	2	0,073	0,088	0,095	0,060	0,822	0,848
	3	0,069	0,083	0,095	0,059	0,855	
2	1	0,065	0,076	0,040	0,050	0,769	
	2	0,077	0,109	0,047	0,069	0,896	0,853
	3	0,085	0,113	0,045	0,076	0,894	

Джерело: розроблено авторами.

У процесі комп'ютерного моделювання досліджувався вплив на величину ВКП схем формування розмірів, елементів режимів різання (глибини, швидкості різання, подачі), жорсткості інструментальної наладки C , фізико-механічних характеристик матеріалу заготовки (НВ).

Для обмеження кількості факторів та відсіювання незначущих були виконані попередні дослідження. Вони показали практично повну відсутність впливу на величину коефіцієнта взаємокомпенсації похибок k швидкості різання та схеми формування розміру при обробці різцем по програмі ЧПК, у випадку різностороннього розташування припусків на оброблюваних поверхнях (рис. 3). Також встановлено незначний вплив на величину коефіцієнта k ВКП твердості матеріалу заготовки та схеми формування розміру набором різців, для випадку різностороннього розташування припусків, у межах зміни величини k на 0,05. На підставі таких висновків, величини перелічених факторів не змінювались, а зазначені схеми формування розмірів з різностороннім розташуванням припусків на оброблюваних поверхнях надалі не досліджувались, але були відображені в загальних рекомендаціях.

Попередні результати моделювання засвідчили значний вплив схеми формування розмірів на величину коефіцієнта k ВКП ТР, тому в усіх дослідженнях розглядався та представлявся вплив відповідного фактору для двох схем формування розмірів обробленням: одним різцем за програмою ЧПК та набором інструментів, встановлених в інструментальній наладці, при односторонньому розташуванні припусків, що й відображено на графіках. На всіх графіках, наведених нижче: k_1 – коефіцієнт ВКП, що відповідає обробленню з формуванням розміру одним інструментом за програмою ЧПК; k_2 – коефіцієнт ВКП, що відповідає обробленню та формуванням розміру набором інструментів.

Для підвищення інформативності та якості аналізу, залежності, що відображають вплив різних факторів на величину коефіцієнтів ВКП, представлені графічно з відповідною апроксимацією, а також у формі математичних моделей із розрахунками коефіцієнтів множинної кореляції R^2 , для оцінки якості апроксимації моделей.

Відзначимо, що вплив практично усіх досліджених факторів представлений лінійними моделями, які, судячи зі значень коефіцієнтів кореляції R^2 , достовірно відображають такий вплив.

З урахуванням найбільшого впливу на величину k_i двох схем формування ТР на всіх графіках представлялись залежності для зазначених схем, що наочно демонструє різницю їх впливу. Вагомість та напрям впливу кожного фактору оцінювались на основі аналізу графіків та відповідних моделей, зокрема аналізувались величина і знак коефіцієнтів у першому члені математичної моделі ($y_i = a_i x_i + b_i$). Аналіз виконувався для факторів, що залишились після попереднього відсіювання.

На підставі оцінки результатів, за описаною вище методологією, можна відзначити, що має місце істотний вплив жорсткості ТОС, збільшення якої приводить до зменшення величин коефіцієнта ВКП – як при чорновому, так і при чистовому обробленні. При цьому необхідно відзначити більший вплив жорсткості на величини коефіцієнтів k_1 і k_2 у випадку використання інтенсивних режимів різання (чорнове точіння), який полягає в більшому зменшенні коефіцієнтів ВКП (рис. 6).

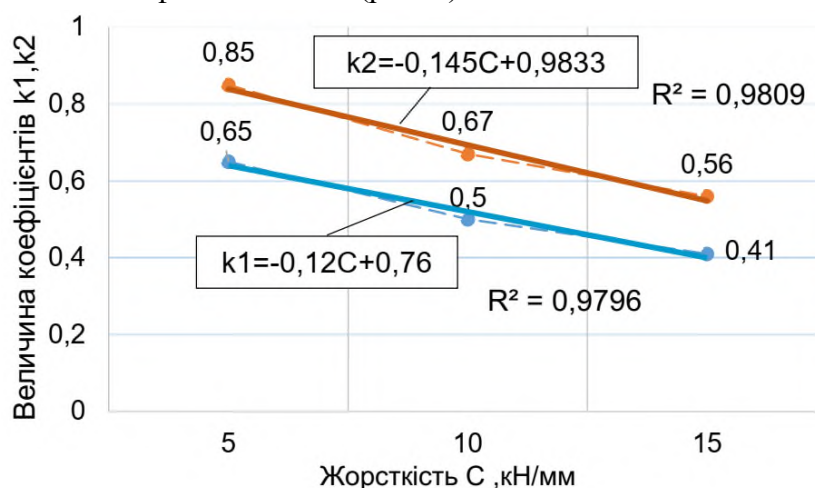


Рис. 6. Вплив жорсткості інструментальної наладки C на зміну величини коефіцієнтів взаємної компенсації похибок k_1 та k_2 при чорновому обробленні ($h = 4$ мм, $f_o = 0,9$ мм/об., HB170-190)

Джерело: розроблено авторами.

У розглянутому діапазоні зміни величини жорсткості C у випадку чорнового оброблення величини коефіцієнтів ВКП k зменшувались на $\Delta k_1 = 0,26$, $\Delta k_2 = 0,29$. Значення коефіцієнтів при C : $a = -0,145$ для k_1 ; $a = -0,12$ для k_2 свідчать про однаковий за напрямом і приблизно рівний за величиною вплив жорсткості для обох схем формування розмірів. Різниця величин вільних членів моделей відображає вплив схем формування розмірів і свідчить про більшу величину ВКП при обробленні набором інструментів. Високі значення коефіцієнтів кореляції R^2 вказують на хорошу якість лінійних моделей, що відображають вплив жорсткості на величини коефіцієнтів взаємної компенсації похибок k_1 та k_2 .

Вплив режимів різання – глибини різання h і подачі f_o значно менший, ніж вплив жорсткості C інструментальної наладки, про що свідчать суттєво менші значення коефіцієнтів при x у відповідних моделях (рис. 7-8).

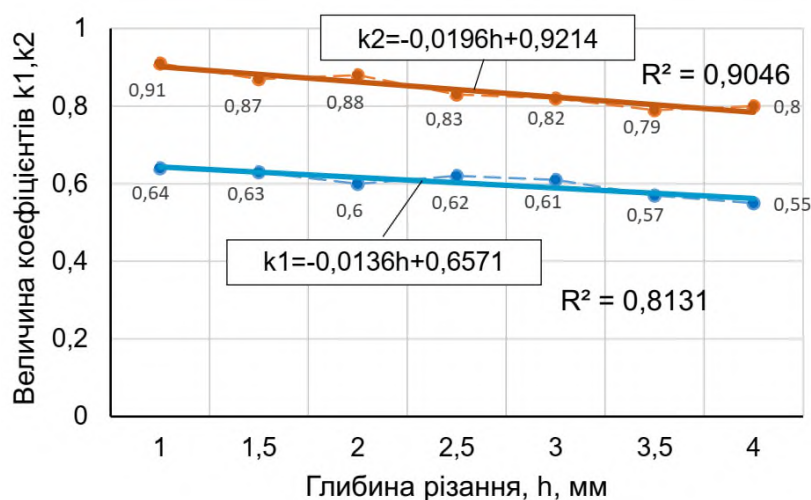


Рис. 7. Вплив глибини різання на величину коефіцієнтів ВКП, $k=f(h)$
Джерело: розроблено авторами.

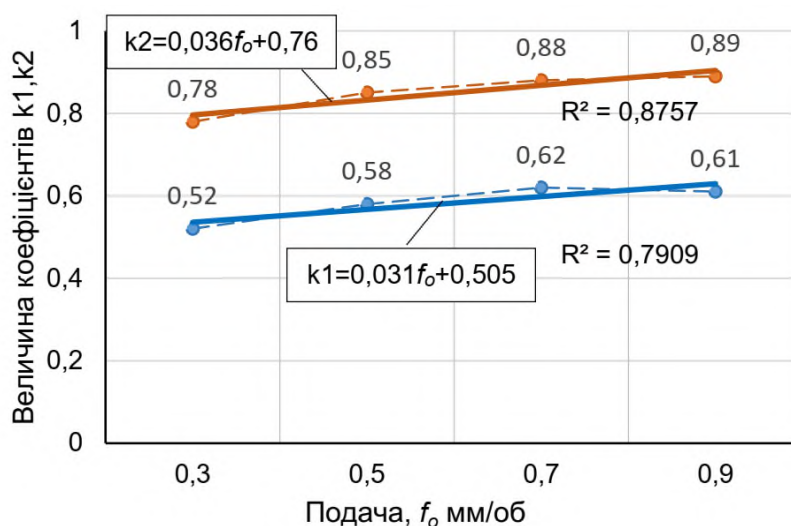


Рис. 8. Вплив подачі на величину коефіцієнтів ВКП, $k=f(f_0)$
Джерело: розроблено авторами.

Збільшення глибини різання h призводить до зменшення величини коефіцієнтів ВКП, для обох схем формування розмірів. При цьому інтенсивність зменшення, а отже, і вагомість впливу глибини різання менша, ніж вплив подачі f_0 та значно менша, ніж жорсткості C інструментальної наладки. Таким чином, вплив глибини різання в розглянутому діапазоні відображає переважно тенденцію і не є достатньо вагомим. Це свідчить про відносно невелику чутливість коефіцієнтів ВКП до зміни глибини різання, отже, і на необхідність орієнтації на величини більш значущих факторів при виборі значень коефіцієнтів k_1 і k_2 .

Величини коефіцієнтів a_i в лінійних моделях ($y_i = a_i x_i + b_i$), що відображають вплив подачі f_0 , є в середньому вдвічі більші, ніж у моделях впливу глибини різання h . Таким чином, вплив подачі f_0 більш виражений, у порівнянні з впливом глибини різання h , але також є менш вагомим, ніж вплив схеми формування розмірів і жорсткості C інструментальної наладки.

Аналіз впливу твердості заготовки виконувався в діапазоні HB 180-230 одиниць і не виявив значних змін коефіцієнтів k_1 , k_2 , що свідчить про збереження приблизно однакового рівня ефекту ВКП при зміні твердості (рис. 9). За характером і величиною він подібний до впливу глибини різання h .

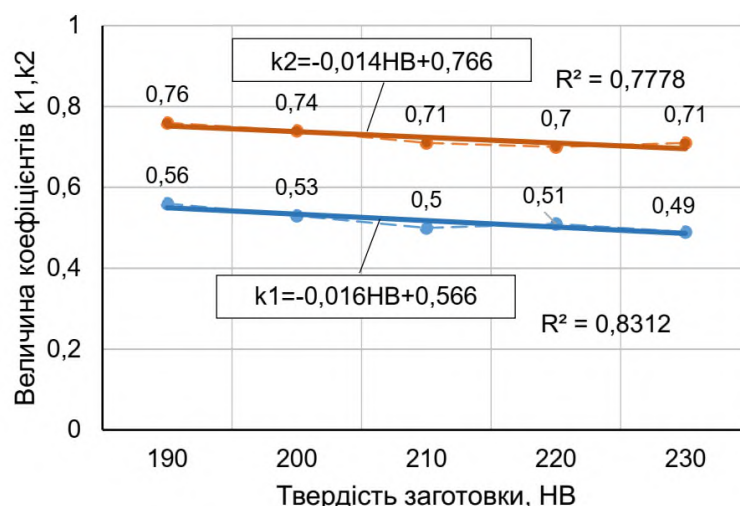


Рис. 9. Вплив твердості матеріалу заготовки (HB) на величини коефіцієнтів ВКП, $k=f(HB)$

Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, отримані результати досліджень виявили тенденції впливу різних факторів, які повинні бути враховані при уточненні величини коефіцієнтів ВКП (k), на основі аналізу відповідних моделей, приведених на графіках.

У практичних розрахунках, при оцінюванні прогнозової точності доцільно використовувати узагальнені значення коефіцієнтів ВКП k . Такі оцінки для досліджених схем формування розмірів з однаковим розташуванням припусків на оброблюваних поверхнях, на основі отриманих результатів, рекомендується приймати в межах наступних значень k :

а) при формуванні розмірів одним різцем за програмою ЧПК – $k_1 = 0,5-0,65$ або усереднене значення $k_1 = 0,55$;

б) при формуванні розмірів набором інструментів – $k_2 = 0,65-0,85$ або усереднене значення $k_2 = 0,75$.

При більш детальному виборі необхідно орієнтуватись та брати до уваги рівень значень найбільш вагомих факторів, що характеризують відповідні умови оброблення.

Обговорення та аналіз результатів. Моделювання та аналіз процесів оброблення з використанням різних схем формування розмірів для визначення впливу факторів на величину коефіцієнта ВКП засвідчило значний вплив схем формування ТР, а також важливість та необхідність урахування розташування припусків відносно оброблюваних поверхонь.

При різносторонньому розташуванні припусків на оброблюваних поверхнях (див. рис. 1) і формуванні розміру одним інструментом ВКП ТР відсутня. При формуванні розмірів набором інструментів і з різностороннім розташуванням припусків (див. рис. 2) величина ВКП мінімальна і знаходиться у межах $k = 0,05$, її можна не враховувати при розрахунках ОРЛ. При цьому, необхідно відзначити, що точність замикаючих ланок – КР буде вищою при обробленні набором інструментів, завдяки деякій стабілізації та компенсації сил різання, що діють в протилежних напрямках на обох інструментах, розташованих в інструментальному блоці, і таким чином сприяють стабілізації процесу різання навіть при деякій відмінності умов оброблення на зв'язаних розмірах поверхнях (див. рис. 3).

Отже, при різносторонньому розташуванні припусків на оброблюваних поверхнях, похибки замикаючих ланок – конструкторських розмірів будуть включати похибки обох розмірів, що входять в ОРЛ, а розрахунок ОРЛ і величин полів розсіювання замикаючих ланок – конструкторських розмірів повинні виконуватись без урахування взаємокомпенсації ТР.

При односторонньому розташуванні припусків на зв'язаних розмірах поверхнях (див. рис. 2, 3), завжди буде мати місце ВКП ТР, тому величини полів розсіювання замикаючих ланок – конструкторських розмірів повинні виконуватись з урахуванням взаємокомпенсації відповідних ТР.

Комп'ютерне моделювання та аналіз процесів формування розмірів з використанням різних схем показало, що найбільший вплив на ВКП мають схеми формування розмірів. Величина коефіцієнта k буде суттєво більшою у випадку формування розміру оброблення набором інструментів, у порівнянні з обробленням одним інструментом по програмі. Така закономірність має місце при будь-яких режимах різання, характеристиках ТОС та оброблюваного матеріалу.

Вплив жорсткості C інструментальної наладки на величину k – менший ніж схеми формування, але достатньо значущий і його слід ураховувати при виборі величин k . При збільшенні величини C має місце зменшення k , це характерно для обох схем формування технологічних розмірів.

Швидкість різання, для обох схем формування розмірів, не впливає на величину k . Глибина різання h та подача f_o мають обмежений вплив, який проявляється у зміні величини k у межах до 0,1 з тенденцією до зростання при збільшенні подачі. Глибина різання h та подача f_o мають деякий сукупний вплив, рівень якого залежить від їх співвідношення. Більші величини k мають місце при сукупності невеликих глибин різання $h = 1-2$ мм і великих подач $f_o = 0,5-0,9$ мм/об.

Зміна твердості матеріалу, в межах HB (180-230) не має відчутного впливу на величину коефіцієнтів ВКП для обох схем формування розмірів.

Використання встановлених закономірностей впливу різних факторів сприятиме обґрунтованому вибору величини k залежно від умов оброблення та отриманню більш достовірних оцінок прогнозованої точності отримуваних розмірів.

Урахування ВКП також розширює можливості представлення ТР на операційних ескізах, дозволяє використання найбільш прийняттого способу – ланцюгового, координатного чи комбінованого та забезпечує отримання достовірних прогнозних оцінок точності в усіх випадках. Знання та використання параметрів ВКП ТР дозволяє обґрунтовано визначити та розширити допуски ТР, при забезпеченні заданої точності КР. При цьому розширені допуски ТР можуть перевищувати допуск замикаючої ланки. Використання механізму урахування ВКП при розмірному аналізі розкриває суть формування розмірів – замикаючих ланок та пояснює факт отримання величин допусків замикаючих ланок менших ніж допуск однієї складової ланки, а тим більше ніж сума допусків складових ланок. Така методологія врахування ВКП дозволяє також розрахувати значення допусків ТР, які, будучи більшими ніж допуск замикаючої ланки, забезпечать задану точність конструкторського розміру при меншій собівартості та більшій продуктивності оброблення.

Покажемо на прикладі (див. рис. 1, 2) ефективність та доцільність урахування ВКП ТР. Згідно зі схемою операційного розмірного ланцюга (див. рис. 1, 2) представимо його загальне рівняння та визначимо прогнозне значення $\omega A1$:

$$A1 = -F1 + F2.$$

Тоді величина поля розсіювання замикаючої ланки – конструкторського розміру, без урахування ВКП, буде дорівнювати: $\omega A1 = \omega F1 + \omega F2$.

З урахуванням похибок ТР, що взаємокомпенсуються, рівняння, у якому однією зі складових буде величина взаємокомпенсації ω_k , матиме такий вид [13]:

$$\omega A1_k = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega_k \text{ або } \omega A1_k = \omega F1 + \omega F2 - 2 \cdot k \cdot \omega F1.$$

Якщо $F1 = 50$ мм., $F2 = 100$ мм., $A1 = 50$ мм, необхідно забезпечити $\omega A1 = 0,16$ мм (IT11). Плануємо завершальне (чистове) оброблення з виконанням ТР $F1$ і $F2$ по IT10, тоді буде забезпечено [1; 2]: $\omega F1 = 0,12$ мм, $\omega F2 = 0,14$ мм.

Прогнозна величина поля розсіювання розміру $A1$ без урахування ВКП буде дорівнювати:

$$\omega A1 = \omega F1 + \omega F2 = 0,12 + 0,14 = 0,26 \text{ мм.}$$

Висновок 1: задана точність КР, чистовим точінням різцем за програмою ЧПК, не забезпечується, необхідно вводити додаткове (тонке) оброблення.

Прогнозна величина поля розсіювання розміру $A1$, при обробленні чистовим точінням різцем за програмою ЧПК, з урахування ВКП та $k1 = 0,6$, буде дорівнювати:

$$\omega A1_k = \omega F1 + \omega F2 - 2k \cdot \omega F1 = 0,12 + 0,14 - 2 \cdot 0,6 \cdot 0,12 = 0,26 - 0,144 = 0,116 \text{ мм} \approx 0,12 \text{ мм.}$$

Висновок 2: Задана точність КР, чистовим точінням різцем за програмою ЧПК, при оцінці її з урахування ВКП, забезпечується і вводити додаткове (тонке) оброблення не потрібно.

Прогнозна величина поля розсіювання розміру $A1$, при обробленні чистовим точінням набором інструментів, з урахування ВКП та $k2 = 0,7$, буде дорівнювати:

$$\omega A1_k = \omega F1 + \omega F2 - 2 \cdot k \cdot \omega F1 = 0,12 + 0,14 - 2 \cdot 0,7 \cdot 0,12 = 0,26 - 0,168 = 0,092 \text{ мм} \approx 0,09 \text{ мм.}$$

Висновок 3: При обробленні чистовим точінням набором інструментів задана точність КР, забезпечується по IT10 замість IT11, у зв'язку з чим можна обмежитись одноразовим точінням.

Наведений приклад засвідчує суттєву відмінність (більше ніж удвічі) в оцінках прогнозованої точності, без та з урахування ВКП технологічних розмірів, що підтверджує необхідність та доцільність використання, отриманих при моделюванні, коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів для підвищення якості прогнозних оцінок точності конструкторських розмірів при токарному обробленні заготовок.

З метою перевірки та підтвердження результатів отриманих комп'ютерним моделюванням для токарного оброблення поверхонь набором інструментів, у цій роботі оцінювання ВКП технологічних розмірів також було виконано з використанням методики, що базується на використанні експериментально-статистичних даних [13], наведених у науковій і довідковій літературі, які характеризують точність оброблення на токарних верстатах набором інструментів. Для визначення величини взаємокомпенсації виконувався аналіз варіанта одержання конструкторського розміру $A1$ (див. рис. 2) прямим формуванням ТР, що збігається з конструкторським розміром $A1$, обробленням двох поверхонь набором інструментів. Згідно з експериментально-статистичними даними, наведеними в літературі [1; 2] прогнозна величина поля розсіювання отриманого таким способом розміру $A1$ знаходиться в межах $\omega A1 = 0,06 - 0,10$ мм. У нашому прикладі прогнозна величина, отримана розрахунком з використанням коефіцієнта ВКП, становить $\omega A1_k = 0,09$ мм, тобто попадає в інтервал $0,06 - 0,1$ мм.

Збіг результатів прогнозних оцінок точності КР, отриманих на основі використання коефіцієнтів ВКП, а також на основі експериментально-статистичних даних свідчить про достовірність результатів моделювання та підтверджує можливість ефективного й коректного використання отриманих величин коефіцієнтів ВКП при прогнозуванні точності розмірів у реальному виробництві.

Висновки. 1. Теоретичний аналіз та результати комп'ютерного моделювання засвідчили значний вплив схем формування розмірів на величину взаємокомпенсації похибок ТР, а отже, і на точність отримуваних розмірів, що підтверджує важливість та необхідність урахування такого впливу при прогнозуванні точності розмірів.

2. На основі результатів досліджень встановлені графічні залежності та математичні моделі, що відображають вплив на величину взаємокомпенсації похибок умов оброблення, які необхідні для визначення величин коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів при використанні різних схем формування розмірів.

3. Встановлено, що величини взаємокомпенсації та відповідних коефіцієнтів k будуть суттєво більшими у випадку формування розмірів при обробленні набором інструментів, у порівнянні з обробленням одним інструментом по програмі. Така закономірність має місце при будь-якому рівні режимів різання, характеристик ТОС та оброблюваного матеріалу і свідчить про можливість забезпечення вищої точності.

4. Порівняння отриманих комп'ютерним моделюванням значень коефіцієнтів k з відповідними величинами, які були отримані в роботі з використанням інших методів засвідчило їх збіг, чим була підтверджена достовірність результатів моделювання.

5. Для практичного використання при прогнозуванні точності отримуваних розмірів доцільно рекомендувати такі рівні коефіцієнтів ВКП (k): а) при формуванні розміру обробленням одним різцем – $k_1 = 0,5-0,65$; б) для умов формування розмірів набором інструментів – $k_2 = 0,65-0,85$. Більш точні значення коефіцієнтів, при необхідності, можна отримати на основі врахування умов оброблення з використанням відповідних моделей.

6. Використання рекомендованих величин коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів дозволяє істотно підвищити якість прогнозування оцінки точності замикаючих ланок – конструкторських розмірів за рахунок суттєвого наближення їх до реальних значень, які дають оцінки, що будуть більше ніж удвічі меншими від оцінок, отриманих без урахування взаємокомпенсації похибок. Підвищення точності прогнозування дозволяє більш обґрунтовано підійти до формування структури ТП, яка забезпечить підвищення продуктивності та скорочення витрат на оброблення при забезпеченні заданої точності розмірів та дозволить уникнути додаткового коригування ТП у процесі його впровадження.

Список використаних джерел

1. Рудь, В. Д., Герасимчук, О., & Маркова, Т. (2010). *Розмірно-точнісний аналіз конструкцій та технологій*. РВВ ЛДТУ.
2. Приходько, В. П. (2021). *Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»*. КПІ ім. Ігоря Сікорського. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38826>.
3. Бондаренко, С. Г. (1993). *Розмірні розрахунки механоскладального виробництва*. ІСДО.
4. Кравченко, Л. С. (2009). *Розмірний аналіз при проектуванні, виготовленні й складанні*. НТУ "ХПІ".
5. Dietrich, R., Garsaud, D. Gentillon, S., & Nicolas, M. (2004). *Précis de méthodes d'usinage : méthodologie, production et normalisation*. Ed. NATHAN – AFNOR
6. Mercier, J (2007). *De l'étude de fabrication à l'analyse d'usinage, 3ème édition*. Edition de la Technique moderne - Pierron, Sarguemines.
7. Приходько, В., Пуховський, Є., Данилова, Л., Лапковський, С., & Сапон, С. (2022). Інформаційне забезпечення розмірного моделювання та аналізу технологічних процесів. *Технічні науки та технології*, (3(29)), 77–93. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3\(29\)-77-93](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3(29)-77-93).
8. Tichadou, S. (2004). *Modélisation et quantification tridimensionnelles des écarts de fabrication pour la simulation d'usinage*.
9. Bourdet, P. *Chaine de cotes unidirectionnelle (modèle et mode opératoire)*. École normale supérieure de Cachan. 94235.
10. Marche, L., Paquet G. (2004). *Guide de la productique*. Ed. Delagrave, Paris.
11. Branger, G. (2008). *Guide du bureau des méthodes*. Ed. Desforges. Paris.
12. Swift, K. G., & Booker, J. D. (2013). *Manufacturing process selection handbook*. Elsevier Science & Technology Books.

13. Приходько, В. П., Пуховський, Є. С., Данилова, Л. М., Лапковський, С. В., & Гаврушкевич, Н. В. (2023). Визначення та урахування величини взаємокомпенсації похибок при прогнозуванні точності оброблення на верстатах з ЧПК. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (4(50)), 84–91. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.12>.

14. Wolff, V., & Lefèbvre, A. (2007). *Vers l'évaluation des dispersions d'usinage en tournage pour la caractérisation d'une MOCN*. <https://hal.science/hal-00344394v1/document>.

15. Kamali Nejad, M., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2009). Simulation of the geometrical defects of manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(7-8), 631–648. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2001-3>.

16. Мазур, М. П., Внуков, Ю. М., Доброскок, В. Л., Залога, В. О., Новосьолов, Ю. К., & Якубов, Ф. Я. (2000, 2011). *Основи теорії різання матеріалів*. Новий світ.

References

1. Rud, V. D., Herasymchuk, O. O., & Markova, T. P. (2008). *Rozmirno-tochnistnyi analiz konstruksii ta tekhnologii [Dimensional-accuracy analysis of constructions and technologies]*. RVV LDTU.

2. Prykhodko, V. P. (2021). Rozmirne modeliuвання ta analiz tekhnologichnykh protsesiv: navchalnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 131 «Prykladna mekhanika» [Dimensional modeling and analysis of technological processes: study guide for students of specialty 131 “Applied mechanics”]. *KPI im. I. Sikorskoho – Kyiv Polytechnic Institute named after I. Sikorsky*. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38826>.

3. Bondarenko, S. H. (1993). *Rozmirni rozrakhunky mekhanoskladalnoho vyrobnytstva [Dimensional accounts of mechano-assembly production]*. Instytut systemnykh doslidzhen osvity Ukrainy.

4. Kravchenko, L. S. (2009). Razmernyi analiz pry proektyrovanny, yzgotovlenyy y sborke [Dimensional analysis in design, manufacture and assembly]. *NTU “KhPI” – National Technical University “Charkiv Polytechnic Institute”*.

5. Dietrich, R., Garsaud, D. Gentillon, S., Nicolas, M. (2004). *Précis de méthodes d'usinage : méthodologie, production et normalisation*. 7ème édition", Ed. NATHAN - AFNOR.

6. Mercier, J (2007). De l'étude de fabrication à l'analyse d'usinage. 3ème édition. Edition de la Technique moderne - Pierron, Sarguemines.

7. Prykhodko, V., Pukhovskiy, Y., Danylova, L., Lapkovskiy, S., Sapon, S. (2022). Informatsiine zabezpechennia rozmirnoho modeliuвання ta analizu tekhnologichnykh protsesiv. [Information support for dimensional modeling and analysis of technological processes]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical Sciences and Technologies*, (3(29)), 77-93.

8. Tichadou, S. (2004). Modélisation et quantification tridimensionnelles des écarts de fabrication pour la simulation d'usinage.

9. Bourdet, P. *Chaine de cotes unidirectionnelle (modèle et mode opératoire)*. École normale supérieure de Cachan. 94235.

10. Marche, L., Paquet G. (2004). *Guide de la productique*. Ed. Delagrave, Paris.

11. Branger, G. (2008). *Guide du bureau des méthodes*. Ed. Desforges. Paris.

12. Swift, K. G., & Booker, J. D. (2013). *Manufacturing process selection handbook*. Elsevier Science & Technology Books.

13. Prykhodko, V. P., Pukhovskiy, Y. S., Danylova, L. M., Lapkovskiy, S. V., & Havrushkevych, N. V. (2022). Vyznachennya ta urakhuvannya velychyny vzayemokompensatsiyi pokhybok pry prohnouzuванні tochnosti obroblyennya na verstatakh z CHPK. [Determination and accounting of the value of mutual compensation of errors in predicting the accuracy of processing on CNC-machines]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (4(50)), 78-85.

14. Wolff, V., & Lefèbvre, A. (2007). *Vers l'évaluation des dispersions d'usinage en tournage pour la caractérisation d'une MOCN*. <https://hal.science/hal-00344394v1/document>.

15. Kamali Nejad, M., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2009). Simulation of the geometrical defects of manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(7-8), 631–648. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2001-3>.

16. Mazur, M. P., Vnukov, Yu. M., Dobrosiuk, V. L., Zaloha, V. O., Novosolov, Yu. K., & Yakubov, F. Ya. (2000, 2011). *Osnovy teorii rizannia materialiv*. [Fundamentals of the cutting theory of materials] *Novyy Svit – New World*.

Отримано 16.06.2025

UDC 621.757:621.793

**Vasyl Prykhodko¹, Liudmyla Danylova², Serhii Lapkovsky³,
Serhii Sapon⁴, Volodymyr Frolov⁵, Oleksandr Kravets⁶**

¹PhD 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: privas0718@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>. **Researcher ID:** [HDM-7277-2022](https://orcid.org/HDM-7277-2022)

²PhD 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: ldanylova@outlook.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. **Researcher ID:** [ADU-9265-2022](https://orcid.org/ADU-9265-2022)

³PhD 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>. **Researcher ID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/HCH-3837-2022)

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: s.sapon@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. **Researcher ID:** [IZE-2184-2023](https://orcid.org/IZE-2184-2023)

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: v.k.frolov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **Researcher ID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/ACH-0071-2022)

⁶PhD 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>. **Researcher ID:** [IUQ-7186-2023](https://orcid.org/IUQ-7186-2023)

**AUTOMATED ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL
DIMENSIONING SCHEMES ON THEIR ACCURACY**

The study determined the influence of various factors and processing conditions on the value of the mutual error compensation coefficient of technological dimensions during turning. To investigate the impact of mutual error compensation on the accuracy of the resulting dimensions, the analysis of their formation schemes during machining on CNC machines was performed. Automated evaluation of the influence of technological dimension formation schemes on their accuracy using computer simulation was carried out.

Conditions and methodology for computer simulation of machining processes were formulated. Algorithms and the specialized program for simulating the dispersion of technological dimension values were developed. Simulation in the program allowed determining the effect of mutual error compensation of technological dimensions on their accuracy for different machining schemes. To ensure reliable results, simulation was repeated three times for each processing condition. Based on the obtained data, average values of mutual error compensation coefficients for different machining schemes and conditions were calculated. Graphical and analytical dependencies were constructed, reflecting the influence of the machining scheme, cutting conditions, and workpiece material hardness on the mutual error compensation coefficients. The obtained compensation coefficient values and their determination dependencies are necessary for consideration when assessing accuracy of technological dimensions.

It was found that mutual compensation values and corresponding coefficients are significantly higher when machining with a set of tools compared to machining with a single tool under CNC programming.

Examples of calculating the accuracy of the closing link in the operational dimensional chain are provided. It is shown that using the recommended mutual error compensation coefficients for technological dimensions significantly improves predictive assessment quality of closing links—design dimensions—by bringing them much closer to real values. Predictive accuracy, when accounting for mutual error compensation coefficients, is more than twice as high as in calculations without considering error compensation.

The improved prediction accuracy offered by the methodology presented in this work allows for the more substantiated approach to structuring technological processes. This ensures increased productivity and reduced machining costs while achieving the required dimensional accuracy.

Keywords: dimensional analysis; dimensional accuracy assessment; mutual compensation of dimensional errors, machining accuracy.

Fig.: 9. References: 16.