

УДК 621.91

В. Є. Карпусь, С. В. Кузьменко

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ АВТОМОБІЛЯ

*Розглядаються шляхи підвищення інтенсивності формоутворення на токарному верстаті з ЧПК, вбудованому в гнучку виробничу систему для обробки циліндричних зубчастих коліс.*

*К л ю ч о в і с л о в а:* коробка зміни передач, зубчасті колеса, гнучка виробнича система, токарний верстат з ЧПК, багаторізецевий тримач, період стійкості, ймовірнісне моделювання.

**Постановка проблеми.** Зубчасті передачі широко застосовуються у сучасних автомобілях завдяки своїм перевагам: малим габаритам; високому ККД; великій надійності в роботі; постійній величині передавального відношення через відсутність проковзування; можливості застосування в широкому діапазоні моментів, швидкостей і передаточних відношень. Найбільш поширеними є евольвентні циліндричні зубчасті передачі.

Багаторічний досвід виробництва і експлуатації зубчастих передач показав, що технологічні фактори значно впливають на динаміку, віброактивність, ресурс і надійність їх роботи. Технологія виробництва ефективних зубчастих передач для автомобільної техніки повинна забезпечувати високу точність виготовлення базових поверхонь і усіх елементів зачеплення, низьку шорсткість та високоякісне хіміко-термічне зміцнення робочих поверхонь зубчастих коліс, мінімальну собівартість виготовлення зубчастих коліс та ін.

Автомобілебудування відзначається високим рівнем автоматизації виробничих процесів, перш за все, механічної обробки з використанням високоавтоматизованого металообробного обладнання з числовим програмним керуванням (ЧПК), на базі якого створюються гнучкі виробничі системи (ГВС). Запорукою високої ефективності виробництва зубчастих передач є оптимальне проектування структури ГВС, а також вибір найвигіднішого технологічного оснащення та режимів обробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням технологічних процесів виготовлення зубчастих передач присвячені праці [1–4], в яких розглядаються питання технологічного забезпечення високої якості зубчастих коліс, але в цих та інших джерелах інформації не розглядається можливість використання на токарних верстатах з ЧПК пристроїв, що дозволяли б виконувати багаторізецеву обробку, також не враховується стохастичність процесу різання при виборі найвигідніших режимів обробки.

**Метою статті** є розроблення гнучкої виробничої системи для обробки циліндричних зубчастих коліс, а також методики визначення режимів багаторізецевої обробки на токарних верстатах з ЧПК з використанням ймовірнісного моделювання процесу різання.

**Виклад основного матеріалу.** Робота виробничих підприємств в умовах ринкової економіки висуває на перший план необхідність забезпечення високої якості виробів разом з відносно низькою собівартістю. Це своєю чергою спричинює підвищення вимог до точності виготовлення деталей та вузлів, визначає необхідність застосування дороговартісного обладнання та оснащення, що пов'язано зі збільшенням витрат і часу на технічну підготовку виробництва.

У традиційному проектуванні питання пошуку оптимального технологічного рішення найчастіше не є пріоритетним через те, що число детально проаналізованих варіантів невелике, а їх оцінювання виконується на основі інтуїції та досвіду проектувальника і лише в окремих випадках – порівнянням найбільш простих кількісних критеріїв.

Сьогодні завдання вибору оптимальних технологічних рішень стає дуже актуальним. Це обумовлено, з одного боку, неможливістю іншими засобами суттєво вдосконалити технологію, а з іншого, – потенційними можливостями сучасної комп'ютерної техніки. Таким чином, є сприятливі умови для розвитку та впровадження автоматизації технічної підготовки виробництва, у тому числі для автоматизації проектування технологічних процесів механічної обробки деталей машин методами багатокритеріальної оптимізації.

До машинобудівного виробництва висуваються суперечливі вимоги: забезпечення необхідної якості продукції і зниження собівартості виготовлення та часу технологічної підготовки виробництва. Застосування ГВС та виробничих систем змінної конфігурації у виробництві висуває додаткові умови до скорочення часу технологічного проектування. Найбільш ефективним видом металорізального обладнання, що використовується в умовах багатомономенклатурного виробництва, є багатоцільові

верстати з ЧПК, які забезпечують автоматизацію процесу механічної обробки, концентрацію технологічних переходів, можливість реалізації складних просторових переміщень різальних інструментів, швидке переналадження, багатостантне обслуговування та ін.

Керуючись вказаними принципами технологічного проектування шляхом багатокритеріальної оптимізації, нами розроблене технологічне компонування ГВС для обробки циліндричних зубчастих коліс (рис. 1).

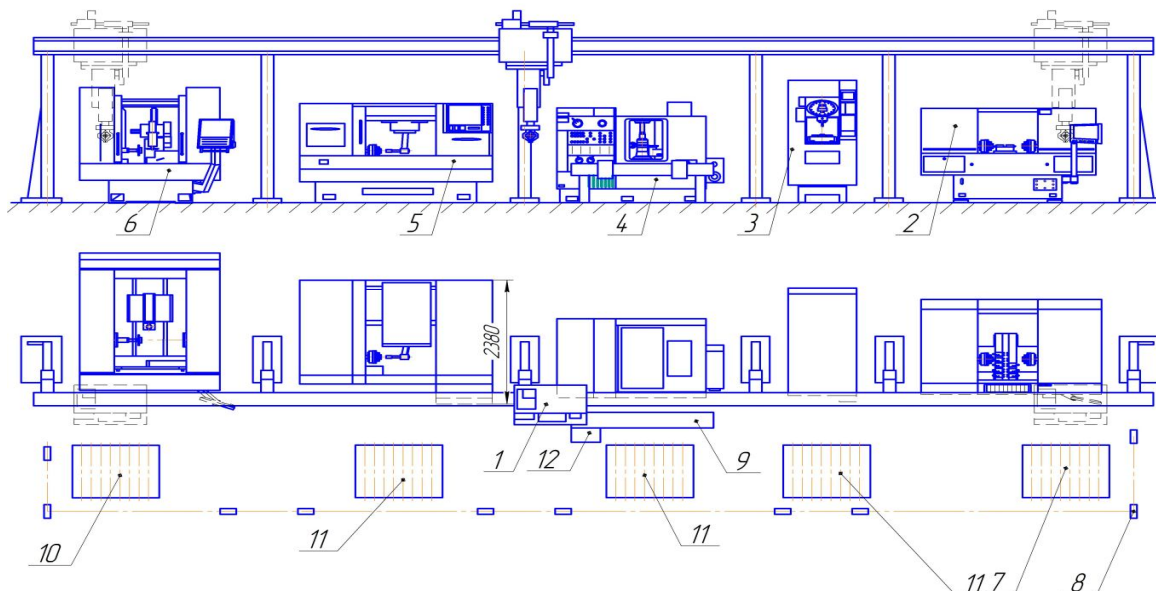


Рис.1. Технологічне компонування ГВС для обробки циліндричних зубчастих коліс:

- 1 – промисловий робот моделі УМ160Ф2.81.01; 2 – промисловий робот моделі РБ – 232;
- 3 – токарний багатощпелювий верстат моделі КСТ200ТТSYі; 4 – довбальний верстат моделі ГД320Ф3;
- 5 – зубофрезерний верстат моделі 53Д30ПФ3; 6 – внутрішньошліфувальний верстат моделі МШ204;
- 7 – зубошліфувальний верстат моделі МШ395; 8 – вхідний накопичувач заготовок; 9 – міжпозиційний накопичувач заготовок; 10 – вихідний накопичувач заготовок; 11 – фотодатчик

Токарна обробка зовнішніх та внутрішніх поверхонь заготовок зубчастих коліс виконується на токарному багатощпелювому верстаті моделі КСТ200ТТSY. Цей верстат має два незалежні шпинделі, оснащені трикулачковими гідравлічними патронами, та два револьверних інструментальних магазини по 12 інструментів у кожному. Є також можливість встановлення приводного інструменту (свердел, мітчиків, фрез). У верстаті використані приводи і системи управління виробництва фірми FANUC (Японія).

Одним з напрямків підвищення продуктивності обробки та розширення технологічних можливостей токарних верстатів з ЧПК є впровадження багаторізевої обробки з використанням багаторізових тримачів [5–6]. Багаторізовий тримач являє собою допоміжний інструмент, призначений для встановлення та закріплення в одній позиції револьверної головки кількох різців (рис. 2, а).

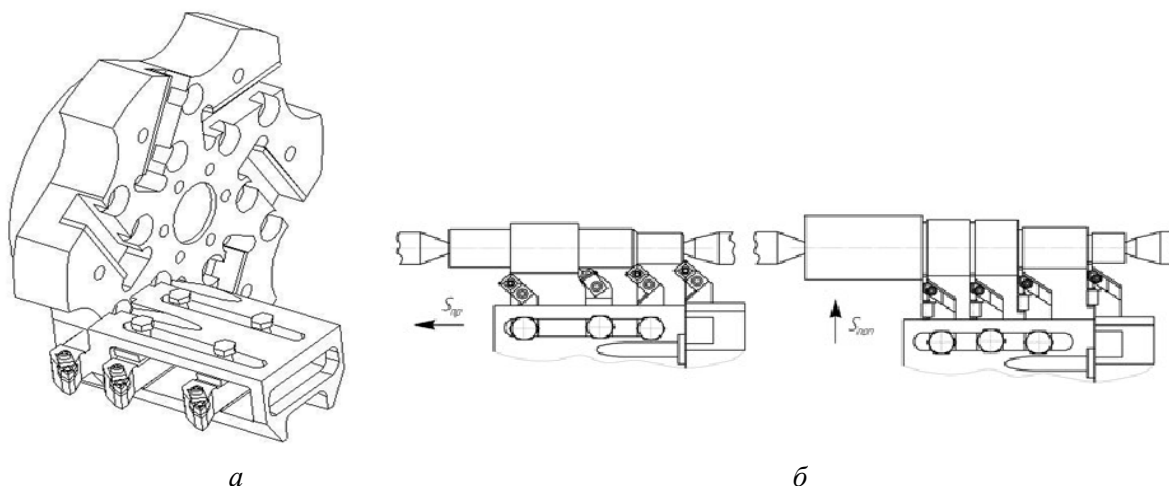


Рис. 2. Багаторізовий тримач (а) та технологічні схеми обробки (б)

Багаторізецевий тримач може використовуватися для багаторізецевої обробки деталей (див. рис. 2, б) як на токарних верстатах з ручним керуванням, так і на токарних верстатах із ЧПК. При цьому багаторізецевий тримач можна застосовувати для обробки способом розподілення припуску на обробку або розподілення довжини обробки.

Для визначення рівня підвищення продуктивності багаторізецевої обробки з використанням багаторізецевого тримача були проведені дослідження її впливу на величину інтенсивності формоутворення та трудомісткість обробки деталей різного діаметра. Розрахунок інтенсивності формоутворення та складників норми часу виконано для випадку використання різального інструменту (РІ) з твердосплавними пластинами вітчизняного виробництва без зносостійкого покриття, режими різання для якого призначалися згідно з рекомендаціями загальномашинобудівних норм часу та режимів різання, а також для випадку використання РІ фірми SANDVIK COROMANT. У разі використання вітчизняного РІ обробку доцільно здійснювати на звичайному токарному верстаті з ЧПК, що не забезпечує високих швидкостей різання, а при використанні РІ фірми SANDVIK COROMANT, який забезпечує високі швидкості різання, необхідно орієнтуватися на високошвидкісні токарні верстати з ЧПК.

На рис. 3 наведено графіки залежності нормативної інтенсивності формоутворення токарного верстата з ЧПК від діаметра оброблюваної поверхні при однорізецевій обробці стандартним РІ та багаторізецевої обробці за допомогою багаторізецевого тримача. Обробка РІ фірми SANDVIK COROMANT на токарних верстатах дозволяє підвищити нормативну інтенсивність формоутворення та зменшити трудомісткість обробки на 48 %. Багаторізецева обробка за допомогою багаторізецевого тримача з дворізецевою наладкою при використанні вітчизняного РІ дозволяє підвищити інтенсивність формоутворення та зменшити трудомісткість обробки порівняно з однорізецевою обробкою на 47 %, а при використанні РІ фірми SANDVIK COROMANT – на 64 %. Багаторізецевий тримач з трирізецевою наладкою дозволяє підвищити інтенсивність формоутворення та зменшити трудомісткість обробки на 95 та 145 % відповідно, порівняно з однорізецевою обробкою.

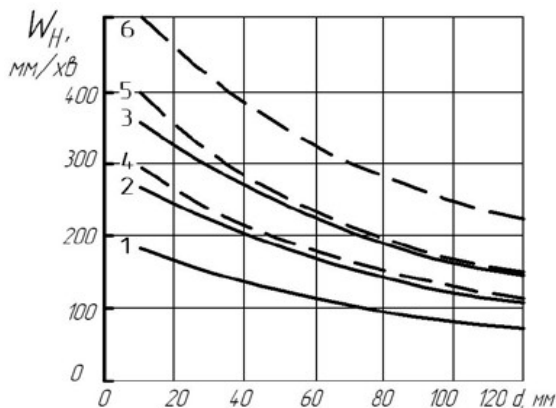


Рис. 3. Залежність нормативної інтенсивності формоутворення для токарного верстата з ЧПК від діаметра обробки:

- 1, 2, 3 – одно-, дво- та трирізецева обробка відповідно з режимами різання згідно з рекомендаціями [1];  
4, 5, 6 – одно-, дво- та трирізецева обробка РІ для режимів різання згідно з рекомендаціями [4]

Таким чином, ефективність використання багаторізецевого тримача збільшується при його застосуванні на високошвидкісних токарних верстатах і з використанням інструментів провідних світових виробників.

Продуктивність обробки та інтенсивність формоутворення суттєво залежать від режимів обробки. Комплект РІ на верстаті являє собою сукупність інструментів, взаємопов'язаних кінематично або структурно і призначених для вирішення загальної технологічної задачі – виконання заданої обробки деталі.

Особливістю обробки комплектом РІ є взаємний вплив інструментів, тобто заміна або технічне обслуговування одного РІ спричинює простій всіх інструментів комплекту. Тому вибір початкових режимів різання комплектом РІ слід здійснювати з урахуванням сумарних витрат часу на обслуговування інструментів комплекту. Найбільше впливає на швидкість різання стійкість РІ.

Нами досліджено вплив стійкості РІ на інтенсивність формоутворення і величину витрат часу на їх обслуговування.

Технологічна інтенсивність формоутворення розраховується за формулою

$$W_T = nS_0,$$

де  $n$  – частота обертання осевого РІ (свердла, зенкера та ін.), об/хв;  $S_0$  – подача РІ, мм/об.

Витрати часу на обслуговування комплекту РІ оцінюються за допомогою коефіцієнта обслуговування інструментів

$$K_i = 1 / (1 + \sum_{i=1}^{N_k} t_{zi} K_{pi} / T_i),$$

де  $t_{zi}$  – час зміни  $i$ -го РІ, хв;  $T_i$  – стійкість  $i$ -го РІ;  $K_{pi}$  – коефіцієнт різання, що являє собою відношення часу різання першим РІ до максимальної величини часу різання серед всіх інструментів комплекту;  $N_k$  – число РІ у комплекті, шт.

Комплексно врахувати зміни технологічної інтенсивності формоутворення і витрат часу на обслуговування РІ залежно від величини періоду стійкості дозволяє показник інтенсивності формоутворення комплектом РІ:

$$W_k = \sum_{i=1}^{N_k} n_i S_{0i} / (1 + \sum_{i=1}^{N_k} t_{zi} K_{pi} / T_i).$$

Максимальній величині  $W_k$  відповідає стійкість і режими різання, що забезпечують найбільшу інтенсивність та продуктивність багатоінструментної обробки комплектом РІ.

Отримані результати дозволяють ввести поняття “оптимальна стійкість комплекту РІ”, тому що впливаючі фактори є загальними для всіх інструментів комплекту. Збільшення витрат часу на заміну одного інструмента від 0,5 до 1,5 хв призводить до збільшення  $T_{opt}$ , що істотно знижує інтенсивність формоутворення. Отже, актуальним є застосування швидкокодіючого допоміжного інструмента, а також впровадження планово-попереджувальної системи обслуговування РІ.

На рис. 4 наведено графіки, що характеризують вплив періоду стійкості на інтенсивність формоутворення комплектом РІ.

У результаті аналізу впливу стійкості РІ на величину економічних витрат, що залежать від режиму

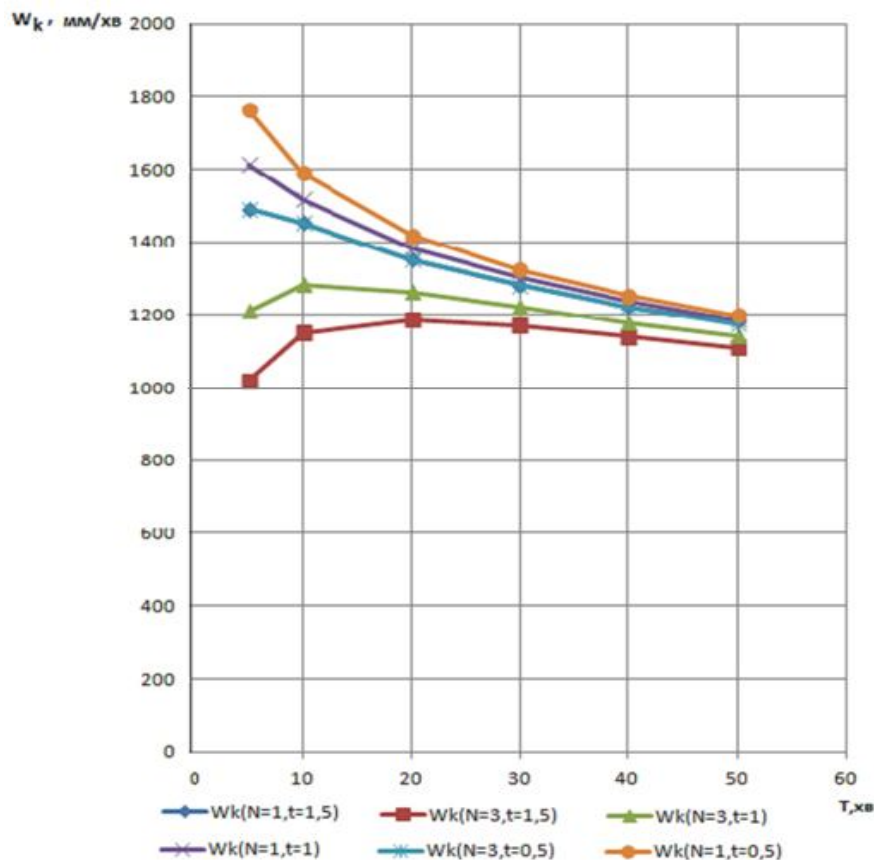


Рис. 4. Вплив періоду стійкості на інтенсивність формоутворення комплектом різальних інструментів

різання, встановлено, що в зоні швидкостей, які відповідають максимальній інтенсивності багатоінструментної обробки, економічні витрати зі зміною стійкості змінюються не суттєво. Так, збільшенню стійкості у 3 рази відповідає зростання економічних витрат всього на 25 %. Отже, рішення, що приймаються на основі критерію інтенсивності формоутворення, не суперечать економічним показникам.

Період стійкості (час безвідмовної роботи)  $PI$  і тривалість одиничного простою через відмову інструмента (час заміни  $t_3$ ) є випадковими величинами з відповідними законами розподілу. Очевидно, що показники ефективності процесу багатоінструментної обробки (в тому числі інтенсивність формоутворення), отримані в результаті детермінованих розрахунків, будуть менш достовірними, ніж знайдені в результаті ймовірнісного моделювання.

Математична модель процесу функціонування комплексу  $PI$ :

$$P(T > t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t = 0; \\ 1 - e^{-\left[ t \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\epsilon} \right) / T \right]^\epsilon}, & \text{якщо } t > 0; \end{cases}$$

$$P(t_3 > t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t = 0; \\ e^{-t/t_3}, & \text{якщо } t > 0; \end{cases}$$

де  $T$  – середня величина періоду стійкості  $PI$ , отримана розрахунковим шляхом, хв;  $\Gamma(1 + 1/\epsilon)$  – гамма-функція Ейлера;  $\epsilon$  – показник степені, що визначає форму кривої розподілу періоду стійкості;  $t_3$  – середня величина часу зміни одного  $PI$ , хв.

Відомо, що ймовірність відмови  $PI$  може бути описана законом Вейбулла – Гніденка для всієї партії  $PI$ , якщо більшість інструментів відмовляють внаслідок накопичення пошкоджень. Під час моделювання випадкові значення періоду стійкості  $PI$  обчислюють за формулою

$$T^* = T \sqrt[\epsilon]{-\ln \xi} / \Gamma(1 + 1/\epsilon)$$

з використанням рівномірно розподіленого випадкового числа  $\xi$  з інтервалу  $[0, 1]$ , яке генерується в комп'ютері.

Час заміни одного  $PI$  підпадає під дію експоненціального закону розподілу випадкових величин. Випадкові значення часу заміни  $PI$   $t_3^*$  визначаються за формулою

$$t_3^* = -t_3 \ln \xi$$

З використанням отриманих для всього  $PI$  комплексу значень  $T^*$  і  $t_3^*$  розраховується точкова оцінка інтенсивності формоутворення  $W^*_{K, PI}$ . Цей результат має випадковий характер, тому для забезпечення статистичної стійкості оцінка обчислюється як середнє значення великої кількості реалізацій. Встановлено, що при 6 тис. реалізацій можна отримати результати з точністю  $\pm 4\%$  ( $\epsilon = 2$ ), при 10 тис. реалізацій –  $\pm 3,7\%$  ( $\epsilon = 3$ ), при 13 тис. реалізацій –  $\pm 5,6\%$  ( $\epsilon = 1$ ) (рис. 5).

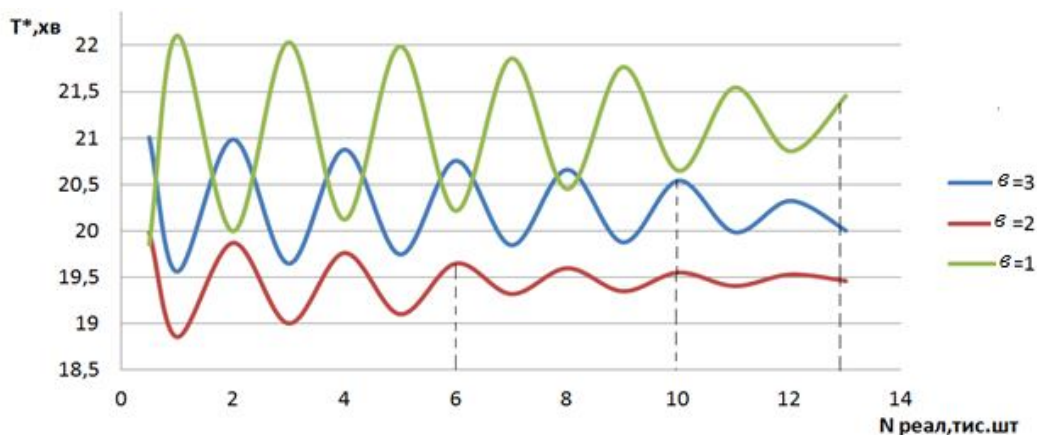


Рис. 5. Визначення доцільного числа реалізацій для ймовірнісного моделювання періоду стійкості інструментів

Отримані результати розрахунків інтенсивності обробки комплектом різців наведено в таблиці.

Т а б л и ц я

*Результати розрахунків інтенсивності обробки комплектом різців*

Методика розрахунку	Період стійкості $T_{хв}$	Інтенсивність формоутворення комплектом інструментів			
		$N = 3$ шт; $t = 1$ хв.	$N = 3$ шт; $t = 1,5$ хв.	$N = 1$ шт; $t = 1$ хв.	$N = 1$ шт; $t = 1,5$ хв.
Без моделювання	20	1262,8	1185,5	1383	1350
3 моделюванням ( $\varepsilon = 1$ )	21,06	1249	1176	1362	1132
3 моделюванням ( $\varepsilon = 2$ )	19,46	1269	1190	1393	1160
3 моделюванням ( $\varepsilon = 3$ )	20,57	1261	1186,7	1378	1347

Таким чином, інтенсивність формоутворення комплектом РІ, розрахована без урахування стохастичного характеру  $T$  і  $t$ , буде завищеною, особливо у випадках низької надійності РІ.

### Висновки

На прикладі токарної обробки заготовок циліндричних зубчастих коліс на токарному двошпиндельному багатоцільовому верстаті досліджено основні напрямки інтенсифікації механічної обробки шляхом використання багаторізевого тримача та обґрунтованого визначення найвигіднішої величини періоду стійкості комплекту різальних інструментів на основі ймовірного моделювання процесу різання. Розроблена методика визначення режимів обробки на токарних верстатах з ЧПК є теоретичною основою для подальшого розроблення системи автоматизованого розрахунку режимів різання.

### Список використаних джерел

1. Филонов, И. П. Проектирование технологических процессов в машиностроении [Текст] / И. Л. Филонов. – Минск : Технопринт, 2003. – 909 с.
2. Зуев, А. А. Технология машиностроения [Текст] / А. А. Зуев. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2003. – 496 с.
3. Міренський, І. Г. Основи технології машинобудування [Текст] : навч. посіб. / І. Г. Міренський. – Х. : Тимченко, 2008. – 256 с.
4. Грицай, І. Є. Сучасне обладнання з ЧПК та інструменти для високошвидкісного чистового оброблення зубчастих коліс [Текст] / І. Є. Грицай // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2008. – Вип. 42. – С. 152–156.
5. Багаторізецевий тримач [Текст] : пат. на корисну модель 24139 Україна: МПК(2006), В 23В 29/24 / Карпусь В. Є., Котляр О. В.
6. Karpus, V. E. Multicutter machining on controlled lathes / V. E. Karpus, A.V. Kotlyar // Russian Engineering Research, 2007, Vol.27, No.12. – pp. 884–887.

*Стаття надійшла до редакції 06.11.2014 р.*