

# ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ. ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ, ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

УДК 621.914.5:621.9.015

І. Є. Грицай, С. І. Громнюк  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування

## ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА БЕЗВІДМОВНОСТІ ПРОЦЕСУ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС РАДІАЛЬНО-КОЛОВИМ СПОСОБОМ З УРАХУВАННЯМ ДІЇ ДИНАМІЧНИХ ЧИННИКІВ

© Грицай І. Є., Громнюк С. І., 2015

*Розглянуто засади моделювання пружної системи зубофрезерного верстата з процесом різання радіально-коловим способом зубофрезерування та впливу пружних коливань дискової фрези на якість нарізаних зубчастих коліс.*

*Ключові слова: процес зубофрезерування, радіально-коловий спосіб, динамічна система, коливання, точність.*

*The principles of stiff system modeling of a gear-hobbing machine is considered. It includes the radial-circular gear-hobbing cutting method and the impact of stiff oscillations of disk-shaped mills on the quality of cogged wheel cutting.*

*Key words: process of gear-hobbing cutting, radial-circular method, dynamic system, oscillations, accuracy.*

**Вступ. Стан проблеми.** В умовах автоматизованого нарізання зубчастих коліс у переліку першочергових завдань технологічної підготовки виробництва є забезпечення безвідмовності процесу оброблення та роботи верстата і оснащення. Одним із високоефективних напрямків удосконалення технології виготовлення зубчастих коліс сьогодні є радіально-коловий спосіб зубонарізання. Заміна традиційних дорогих і складних зубонарізних інструментів простим дисковим інструментом за збереження основних засад неперервного обточування дає змогу багатократно підвищити продуктивність і якість зубонарізання та одночасно на порядок зменшити витрати на різальний інструмент і оснащення. За розімкнення кінематичного зв'язку між ланцюгами основного руху і руху обточування і використання мультиплікатора на осі фрези можна збільшити швидкість різання до 100–180 м/хв та використовувати дискові фрези, споряджені пластинами з твердого сплаву [1].

Спорядження приводів головного руху та зворотно-поступального переміщення дискової фрези засобами мехатроніки керованими програмними серводвигунами на приводах головного руху та зворотно-поступального переміщення фрезерного модуля підвищує рівень автоматизації і універсальності процесу зубофрезерування та обладнання [2, 3].

До того ж за значного збільшення швидкості різання зростають коливання, вібрації та динамічні навантаження у технологічній системі верстата. У результаті дії сил різання виникає загроза часткового руйнування і виривання твердосплавних пластин з тіла дискової фрези, порушення засад безвідмовної роботи верстата, окрім того, дія цих чинників негативно впливає на якість і точність процесу зубонарізання.

**Мета роботи** – розробити методику визначення таких умов нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом, за якого будуть забезпечуватися безвідмовна робота обладнання та задана якість оброблення зубців в умовах автоматизованого процесу.

### 1. Вихідні теоретичні положення методики.

Розрахункова схема навантаження і деформації фрези.

На рис. 1 показано пружне деформування дискової фрези 1, що має радіус виступів зубців  $R_a$ , бокову складову  $P_1$  сили різання, яка діє на західній частині фрези з боку набігання заготовки і виникає внаслідок різання боковими лезами з товщиною зрізів  $a$ . за частоти обертання стола з колесом  $n_k$ . Ця сила – радіус ділильного діаметра колеса  $R_w$ , складова  $P_2$  сили різання, що діє в радіальному для фрези напрямку, в якому жорсткість системи є значною, а деформування і коливання неістотні. У площині торця сила різання подана складовою  $P'$ , яка є проекцією сили різання на цю площину.

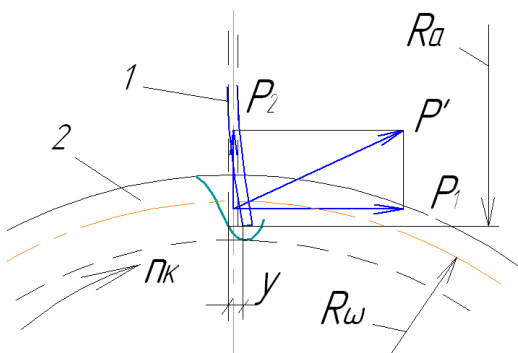


Рис. 1. Пружне деформування дискової фрези та його зв'язок з похибкою профілю

Для розв'язання задачі забезпечення раціональних умов зубофрезерування РК-способом розроблена динамічна модель пружної системи верстата з системою процесу різання. Рівняння руху подані в операторній формі на основі часу перехідних процесів сили різання і товщини зрізу та постійних часу коливних процесів елементів верстата. Замкнену пружну систему (ПС) зубообробного верстата описано двоконтурною системою, в якій перший контур характеризує пружну систему процесу різання (ПС ПР), а другий – еквівалентну пружну систему верстата (рис. 2).

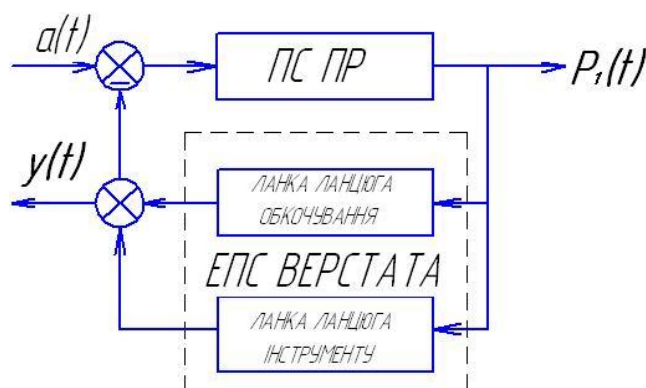


Рис. 2. Схема пружної системи зубофрезерного верстата

На вході ПС процесу різання діють змінна товщина зрізів дискової фрези –  $a(t)$  та вільні коливання  $y(t)$  ланок ланцюга фрези і ланцюга заготовки зі столом верстата на власних частотах, а на виході – сила різання  $P(t)$ .

Пружна система процесу різання дискової фрези.

Динамічна характеристика складової  $P_1$  сили різання, що показує залежність сили різання на передній поверхні від зміни товщини зрізуваного шару бокового леза в операторній формі, має такий вигляд [4]:

$$P_1 = \frac{K_P}{1 + T_P p} \cdot a,$$

$$K_P = [\tau] \cdot x \cdot b,$$

де  $K_P$  – коефіцієнт різання;  $a$ ,  $b$  – товщина і ширина зрізу на боковому вхідному лезі фрези;  $\xi$  – коефіцієнт осадження стружки;  $[\tau]$  – межа міцності матеріалу заготовки на зсув, МПа;  $T_P$  – стала часу перехідного процесу стружкоутворення, с. За даними, наведеними у [4], величину параметра  $T_P$  подамо такою залежністю:

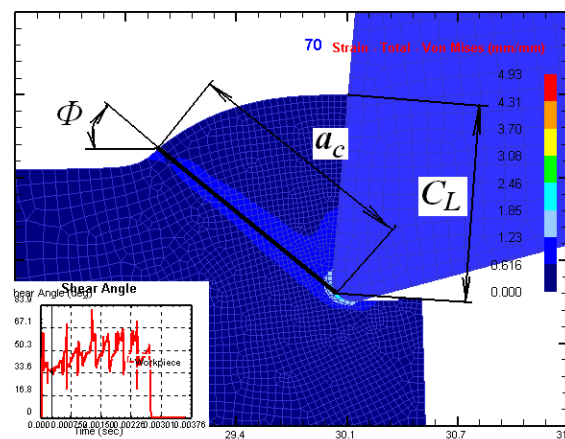
$$T_P = ctg\Phi \cdot \frac{C_L}{a_c} \cdot \frac{a_0 \cdot x_0}{V},$$

де  $\Phi$  – кут зсуву;  $C_L$  – довжина ділянки контакту стружки з передньою поверхнею інструменту, мм;  $a_0$ , мм і  $x_0$  – середні значення товщини зрізу і коефіцієнта осадження стружки;  $V$  – швидкість різання, мм/с.

Для визначення сталої часу перехідного процесу сили різання можна використати засади реологічного аналізу процесу різання [5].

Такий підхід виключає проведення працемістких і складних експериментальних досліджень і дає змогу визначати параметри процесу різання для довільних початкових умов. Так, наприклад, на рис. 3 показано миттєвий стан деформованої зони, для якої за  $[\tau] = 1100$  МПа і переднього кута інструменту  $\gamma = 6,5^\circ$  отримаємо: кут зсуву  $\Phi = 38^\circ$ ; коефіцієнт осадження стружки  $\xi = 1,4$ ; товщину стружки  $a_c = 1,62$  а; довжину ділянки контакту стружки  $C_L = 1,63$  а. Для цих даних за товщини зрізу на боковому лезі фрези 0,5 мм і швидкості різання 100 м/хв стала часу стружкоутворення  $T_P$  дорівнюватиме  $5,4 \cdot 10^{-4}$  с.

Рис. 3. Ділянка пластичного деформування та її параметри на основі реологічного аналізу процесу різання



Пружна система верстата по зв'язку з різанням.

Еквівалентну пружну систему верстата приймемо двомасовою та виділимо дві пружні ланки – ланцюга обкочування і ланцюга дискової фрези. Нормальні форми коливань розглядаємо у напрямку вектора складової  $P_1$  сили різання. Перші нормальні гармонічні складові форм коливань вказаних ланок такі: стіл верстата здійснює крутні коливання у низькочастотному діапазоні на частотах порядку 10 Гц; дискова фреза, навантажена вказаною силою, здійснює періодичні згинні коливання.

Ланка обкочування включає стіл верстата із заготовкою. Ланку інструменту подамо вузлом фрези, який є окремим модулем і складається з корпусу, інструментального вала з підшипниками та шестерень мультиплікатора – приводу обертання фрези від інструментального шпинделя верстата [6].

Подамо рівняння руху по кожній із нормальних форм у вигляді:

$$(T_{11}^2 p^2 + T_{12} p + 1) \cdot y = \frac{P_z}{C}; \quad (1)$$

$$(T_{21}^2 p^2 + T_{22} p + 1) \cdot j = \frac{P_z \cdot R_w}{G}, \quad (2)$$

де  $T_1$  – інерційна стала часу, с;  $T_2$  – стала часу демпфування, с, на відповідних нормальних формах коливання;  $y$  – осьове зміщення фрези, мм;  $\varphi$  – кутова деформація стола із заготовкою, рад;  $1/C$ , мм/Н та  $1/G$ , (рад/Н·мм)<sup>-1</sup> – статичні характеристики ланцюгів фрези і стола;  $P_z$  – осьова складова сили різання, Н;  $R_w$  – дільний радіус зубчастого колеса, мм.

Наведемо вираз (2) для крутих коливань нарізаного зубчастого колеса до лінійних переміщень, які викликають зміну товщини зрізів на боковому вхідному лезі дискової фрези.

Враховуючи залежність для малих кутів

$$j \cong \text{tg} j = \frac{y}{R_w},$$

отримаємо

$$(T_{21}^2 p^2 + T_{22} p + 1) \cdot y = \frac{P_z \cdot R_w^2}{G}. \quad (3)$$

Жорсткість інструментальної ланки, яка обмежується жорсткістю фрези як найпіддатливішої складової, можна визначити розрахунком [7]:

$$C = \frac{3 \cdot E \cdot j}{R_a^3}, \text{ Н/мм}; \quad (4)$$

$$j = \frac{h(y) \cdot b^3}{12} = \frac{b_{\phi p}^3 \cdot \sqrt{2 \cdot y \cdot R_{\phi p} - y^2}}{6}, \text{ мм}^4, \quad (5)$$

де  $j$  – момент інерції перетину дискової фрези щодо нейтральної осі перерізу, мм<sup>4</sup>;  $R_a$  – радіус виступів зубців фрези;  $b$  – ширина фрези, мм;  $E$  – модуль пружності інструментального матеріалу; для легованих сталей прийmemo:  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа.

Враховуючи вираз (5), осьова жорсткість фрези на її зовнішньому діаметрі дорівнюватиме:

$$C = \frac{3 \cdot E \cdot b^3}{R_a^2}, \text{ Н/мм}. \quad (6)$$

Якщо маса цього вузла, величину якої можна виміряти, становитиме  $m$ , кг, то його інерційна стала часу коливання дорівнюватиме:

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{C}}, \text{ с}, \quad (7)$$

а стала часу демпфування для цієї ланки:

$$T_2 = \frac{h}{J} = \frac{1}{p} \cdot T_1, \quad (8)$$

де  $h$  – коефіцієнт затухання коливань;  $\lambda$  – логарифмічний декремент коливань. Частота власних коливань цього вузла дорівнюватиме:

$$f_c = \frac{1}{2 p T_1}, \text{ Гц}. \quad (9)$$

Оскільки маса інструментального вузла 10 кг, ширина фрези – 2,5 мм, зовнішній діаметр – 200 мм,  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\lambda = 0,3$ , то жорсткість вузла фрези становить – 3 кН/мм; сталі часу дорівнюють:  $T_1 = 0,058$  с;  $T_2 = 0,0055$  с; власна частота коливань –  $f_c = 12,6$  Гц.

Динамічні характеристики ланок пружної системи верстата, зокрема на осі зубчастого колеса зі столом верстата, можна встановити експериментально на основі методики, наведеної у [8].

Моделювання динамічних процесів у пружній системі верстата здійснюється за допомогою системи Simulink MATLAB. Подавши на вхід моделі ПС процесу різання сигнал, що характеризує закономірність зміни товщини зрізів на бокових вхідних лезах, визначених за методикою [9, 10], на виході отримаємо коливання сили різання, що діє на вході ПС верстата. Своєю чергою, вихідне коливання у цій системі характеризує пружні коливання у ділянці зони різання і контакту інструменту з заготовкою, тобто періодичні деформації дискової фрези і похибку обробки в тангенційному напрямку. Амплітуда високочастотних коливань фрези з частотою, кратною кількості її зубців, відповідає амплітуді шорсткості, що виникає на поверхнях зубців колеса, а амплітуда, кратна оберту фрези, визначає амплітуду похибки профілю зубців нарізованого колеса.

На основі моделювання можна визначити величини вказаних похибок для встановлених початкових умов та регулювати значеннями конструктивно-технічних, технологічних параметрів і жорсткості дискової фрези, її товщиною, зовнішнім діаметром та кількістю зубців, а також вибирати раціональну швидкість різання для забезпечення заданих технічних умов на виготовлення зубчастого колеса.

Вирішення поставленої мети можна досягти по-різному:

- зміною інтенсивності деформування зрізаного шару і сили різання вибором відповідних режимів різання за допомогою реологічного моделювання;
- зміною параметрів у системі верстата, зокрема, жорсткості, товщини і діаметра дискової фрези.

Розглянемо другий шлях – вибір раціональних параметрів фрези. На рис. 4 показано схему замкненої дволанкової пружної системи верстата з системою процесу різання. Сталі часу коливань у вузлі дискової фрези прийmemo ті, що розраховані вище, а у вузлі стола верстата:  $T_1 = 0,008$  с;  $T_2 = 0,0001$  с.

У лівій частині схеми показано блоки для моделювання товщини зрізів на бокових лезах, що змінюються за закономірністю, показаною на рис. 4.

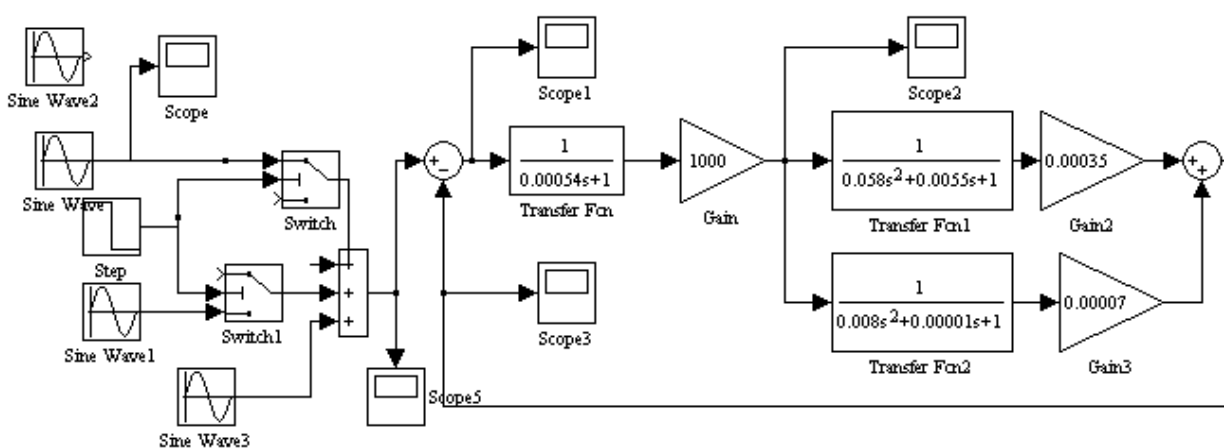


Рис. 4. Схема пружної системи верстата у системі Simulink

У лівій частині схеми пружної системи показано блок, який імітує товщину зрізів на вхідних лезах. На підставі моделювання цього параметра виявлено його закономірності; зокрема, залежність товщини зрізів від модуля нарізованого колеса, показано на рис. 5.

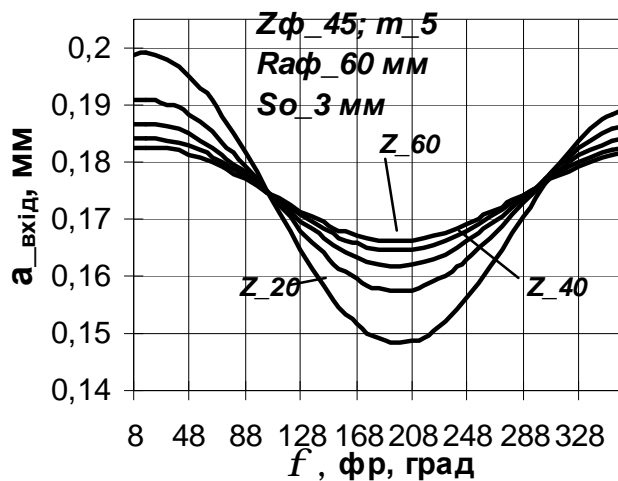


Рис. 5. Зміна товщини зрізів на бокових вхідних лезах фрези: модуль колеса – 2,5 мм; діаметр фрези – 160 мм; кількість зубців: фрези – 45, колеса – 20

Часові характеристики динамічних процесів у системі Simulink відтворено нижче. На рис. 6 показано коливання сили різання, а на рис. 7 – викликані цією силою пружні коливання у ділянці контакту дискової фрези з оброблюваною поверхнею, що дорівнюють похибці обробки. Як бачимо з отриманих даних, амплітуда коливання сили різання становить 275 Н, викликані цією силою відхилення становлять: похибка профілю – 0,45 мм, а висота мікронерівностей – 75 мкм.

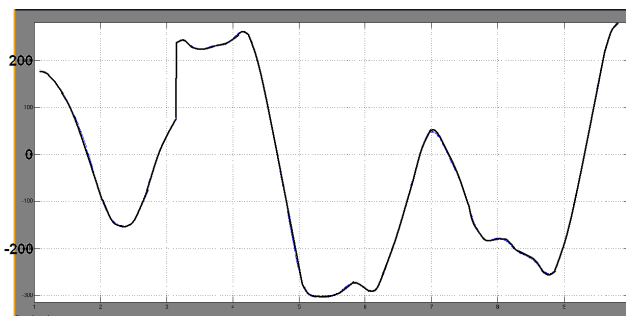


Рис. 6. Коливання сили різання:  $[\tau] = 1100 \text{ МПа}$ ;  $\gamma = 6,5^\circ$ ;  $\Phi = 38^\circ$ ;  $\zeta = 1,4$

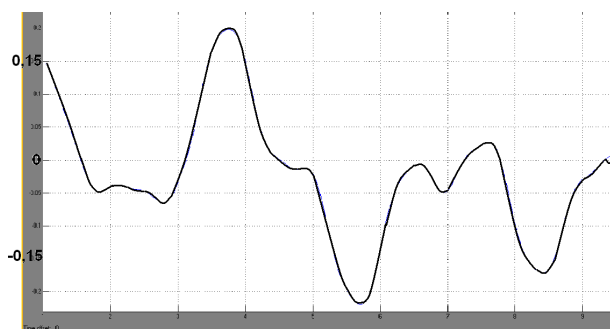
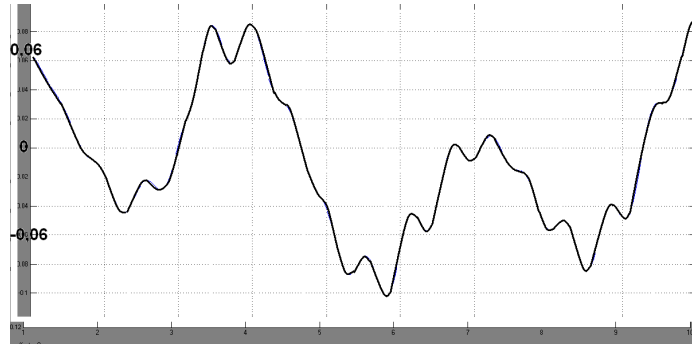


Рис. 7. Відхилення нарізованого профілю

Така якість не відповідає технічним умовам. Змінюємо параметри фрези: ширина фрези – 4 мм, зовнішній діаметр – 160 мм. Для інших вихідних даних отримаємо: сталі часу коливання в ланцюзі фрези –  $T_1 = 0,0126 \text{ с}$ ;  $T_2 = 0,0012 \text{ с}$ ; власна частота коливань –  $f_c = 12,6 \text{ Гц}$ .

Відхилення профілів після внесених змін: похибка профілю становить 0,18 мм, а висота мікронерівностей лежить у межах 11–26 мкм (рис. 8).

Рис. 8. Відхилення нарізуваного профілю після коригування початкових умов



**Висновки.** Отже, розроблена методика дає змогу прогнозувати вплив параметрів пружної системи процесу різання на показники якості нарізання зубчастих коліс за заданих умов обробки і режимів різання, а також виконувати зворотне завдання підготовки виробництва: добирати конструктивно-технічні параметри різального інструменту – дискової фрези.

1. Грицай І. Є. Підвищення ефективності процесу нарізання зубчастих коліс на основі радіально-обертового методу в умовах обкочування / І. Є. Грицай, С. І. Громнюк // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. Донбаської державної машинобудівної академії.* – 2013. – Вип. 32. – Краматорськ, 2013. – С. 226–229. 2. Громнюк С. І. Концепція зубофрезерного верстата на основі радіально-колового способу зубонарізання / І. Є. Грицай, С. І. Громнюк // *Сучасні технології в машинобудуванні.* – Харків: НТУ “ХПІ”, 2014. – С. 142–152. 3. Громнюк С. І. Розширення технологічних можливостей універсальних зубофрезерних універсальних верстатів введенням керованого приводу головного руху // *Технологічний аудит та резерви виробництва.* – Харків, 2014. – № 5/3(19)2014. – С. 23–27. 4. Кудинов В. А. Динаміка станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с. 5. Ступницький В. В. Використання автоматизованого програмного комплексу DEFORM для дослідження температурних та деформаційних параметрів під час різання металів / В. В. Ступницький, Б. Р. Магерус // *Український міжвідом. наук.-техн. зб. “Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні”.* – Львів, 2012. – № 46. – С. 145–152. 6. Грицай І. Є. Підвищення ефективності процесу нарізання зубчастих коліс на основі радіально-обертового методу в умовах обкочування / І. Є. Грицай, С. І. Громнюк // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матер. XI Міжнар. наук.-техн. конф.* – Краматорськ, 2013. – С. 44. 7. Громнюк С. І. Пружні деформації в радіально-коловому способі зубонарізання та їх вплив на точність зубчастих коліс / І. Є. Грицай, С. І. Громнюк // *Прогресивні технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. III Всеукр. наук.-техн. конф.* – Львів-Карпати, 2015. – С. 38. 8. Грицай І. Є. Метод оцінки динамічної характеристики металорізального верстата // *Вісник НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні й приладобудуванні”.* – 2002. – № 467. – С. 114–118. 9. Грицай І. Є. Параметри поперечного перерізу зрізів в радіально-обкочувальному способі нарізання зубчастих коліс з осьовою подачею / І. Є. Грицай, С. І. Громнюк, А. М. Кук // *Вісник НУ “Львів. політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”.* – Львів: Вид-во НУ “Львів. політехніка”, 2014. – № 772. – С. 8–14. 10. Громнюк С. І. Вплив динамічних чинників на якість зубчастих коліс в радіально-коловому способі зубонарізання / І. Є. Грицай, С. І. Громнюк // *12-й Міжнар. симпозіум інженерів-механіків у Львові: тези доп.* – Львів, 28–29 травня 2015 р. – С. 82–83.