

УДК 621.914.5:621.9.015

І. Є. Грицай

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування

## **РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗУБОФРЕЗЕРНИХ ОБКОЧУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ ДЛЯ НАРІЗАННЯ КОНІЧНИХ КОЛІС НА ОСНОВІ РАДІАЛЬНО-КОЛОВОГО СПОСОБУ**

© Грицай І. Є., 2017

*Розроблено новий спосіб нарізання конічних зубчастих коліс дисковою фрезою на зубофрезерному верстаті, що ґрунтується на радіально-коловому способі зубофрезерування. Розраховано параметри налагодження робочих рухів верстата для отримання конічних коліс з заданими параметрами. Показано переваги способу та можливість його широкого використання.*

**Ключові слова:** конічні зубчасті колеса, дискова фреза, радіально-коловий спосіб, ефективність.

*The paper presents a new method bevel gears cutting. It's based on the radial-circular generating gear teeth method. Gear cutter is a simple thin mill disc and a process implements a gear cutting machine with the gear rotation. The cutting conditions and parameters in bevel gears machining are calculated.*

*The advantages of the method and the possibility of it's application are proven.*

**Key words:** bevel gears, mill disc cutter, radial-circular generating gear teeth method, efficiency.

**Вступ.** Зубчасті колеса та зубчасті передачі є невід'ємними складовими сучасних машин. Їх використовують у редукторах і мультиплікаторах засобом передачі та перетворення рухів між приводами і робочими елементами машин і механізмів. Для більшості машин, особливо рухомих, зокрема для усіх видів транспорту – автомобільного, повітряного, морського та річкового, залізничного тощо, зубчасті колеса та передачі є і залишаються на найближчу перспективу незамінними.

Як деталі машин зубчасті колеса належать до деталей підвищеної складності, а їх якість регламентують три норми точності та норма бокового зазору в передачі, при цьому у кожній нормі діє система багаточисленних показників. Таких жорстких вимог у машинобудуванні немає у регламентації точності жодних інших деталей. Відповідно, технологічне забезпечення усіх вимог технічних умов спряжене зі значними виробничими витратами, а на вартість виготовлення редукторів і коробок швидкостей припадає від 15 до 40 % від вартості машин загалом.

Від якості виготовлення зубчастих коліс залежать експлуатаційні властивості машин і механізмів: показники їх довговічності та безвідмовності, рівень шуму, навантажувальна здатність передачі, маса і габарити редукторів. Ці вимоги неухильно підвищуються внаслідок тенденції до зростання швидкостей і навантажень з одночасним зменшенням матеріаломісткості машин. У таких умовах перед виробниками зубчастих коліс стоїть два завдання: забезпечення високої точності коліс за системами комплексних параметрів і якості їх робочих поверхонь та зменшення витрат і собівартості їх виготовлення й механічного оброблення. Ці вимоги є взаємосуперечливими, оскільки, за усталеними положеннями досягнення вищої якості забезпечується тільки більшими виробничими витратами.

**Стан проблеми.** У газузі зубооброблення сьогодні є технічне рішення, здатне задовольнити одночасно обидві вимоги – це радіально-коловий спосіб нарізання зубчастих коліс (“спосіб

Блаугта”, далі – РК-спосіб). Цей універсальний спосіб дає змогу на одному серійному зубофрезерному верстаті простим інструментом – дисковою фрезою – нарізати колеса різних видів: прямо- і косозубчасті, черв’ячні і глобоїдальні, з прямолінійними і гвинтовими зубцями. Крім того, один інструмент можна використовувати не тільки для нарізання коліс з різною кількістю зубців, але й різних модулів зміною ексцентриситету без обмеження його величини [1, 2].

Цей спосіб легко піддається автоматизації і може бути реалізований навіть на універсальному зубофрезерному верстаті його частковою модернізацією – встановленням сервоприводів основних рухів, керованих від системи програмного контролю, або від комп’ютера. У цьому випадку тим самим одним інструментом – тонкою дисковою фрезою – можна нарізати колеса з зубцями різних профілів – синусоїдального, евольвентного, колового, аркового [3–5].

Істотною перевагою цього способу є те, що зубчасті профілі усіх типів формуються інструментом з прямолінійними зубцями, у той час, як для їх формоутворення традиційними методами різальні інструменти повинні мати криволінійні поверхні, що на порядок здорожчує їх вартість, навіть порівняно з дорогими черв’ячними фрезами. Дискову фрезу легко виготовити збірною, оснащеною пластинами з твердого сплаву або різальної кераміки, тоді можна використовувати РК-спосіб для чистового оброблення загартованих коліс замість шліфування. Цим методом на зубофрезерному верстаті підвищеної точності можна шліфувати зубці тонкими шліфувальними кругами, без використання дорогих спеціальних абразивних інструментів – черв’ячних кругів та хонів.

Ефект від використання цього способу полягає у зменшенні потреби у складних і дорогих спеціальних верстатах та різальних інструментах для кожного типу коліс і профілів зубців, відповідно, зі значним скороченням витрат на основне обладнання і спорядження, істотним підвищенням продуктивності процесів зубонарізання за забезпечення високої якості зубчастих поверхонь.

Найменших змін конструкції верстатів для використання РК-способу потребують для виготовлення синусоїдальних зубчастих коліс, оскільки періодичне радіальне зворотно-поступальне переміщення дискової фрези, встановленої ексцентрично до осі її обертання, забезпечує утворення синусоїдальних профілів. Теоретично обґрунтовано та перевірено експериментально, що профілі, окреслені синусоїдою, порівняно з традиційними евольвентними мають значні переваги. До найважливіших переваг синусоїдальних зубців належать менший на 3,5–4 дБ (12–15 %) рівень шуму у передачі; до 40 % вища навантажувальна здатність, контактна і циклічна міцність; значно більший ресурс; можливість зменшити до 30 % масогабаритні параметри редукторів і передач; відсутність підрізання навіть за кількості зубців, що дорівнює трьом. Важливо також, що ці передачі можуть бути як силовими, так і швидкісними, а також можуть поєднувати ці вимоги одночасно [6, 7].

Очевидно, що перелічені переваги синусоїдальних зачеплень і технології РК-способу поширюються на усі види коліс, як на циліндричні, так і на конічні зубчасті. Відомі сьогодні дослідження, пов’язані з цим методом, до цього часу стосувалися виключно циліндричних коліс. Хоча конічні зубчасті колеса та передачі поступаються циліндричним у застосуванні, проте поширення РК-способу на область їх виготовлення та використання теж має практичне значення, передбачає значну ефективність від його впровадження, а завдання дослідження можливості нарізання конічних коліс РК-способом і перевага синусоїдальних конічних зачеплень є актуальним для машинобудування.

**Мета роботи** – розробити спосіб нарізання конічних зубчастих коліс дисковою фрезою на зубофрезерному верстаті в умовах безперервного обкочування на основі радіально-колового способу зубофрезерування.

**Шляхи виконання завдання.** Нарізання конічних прямолінійних коліс радіально-коловим способом можливе на універсальному обкочувальному зубофрезерному верстаті, який призначений

для роботи черв'ячною фрезою. Зміни у конструкції приводу головного руху у цьому випадку такі самі, як при нарізанні циліндричних коліс. Диска фреза встановлюється на осі інструментального шпинделя з ексцентриситетом, величина якого відповідає модулю нарізаного колеса. Фреза, встановлена зі зміщенням щодо осі регульованої оправки, показана на рис. 1, а. Під час використання мультиплікатора між осями фрези і інструментального шпинделя (рис. 1, б) можна збільшити частоту обертання фрези до швидкості, яка необхідна для різання твердим сплавом. Кінематичний зв'язок між обертанням стола із заготовкою та інструментом в обточувальному русі при цьому розривається, а фреза у межах однієї впадини між зубцями колеса здійснює не один оберт, а кілька обертів, що дорівнюють передавальному числу мультиплікатора [8, 9].

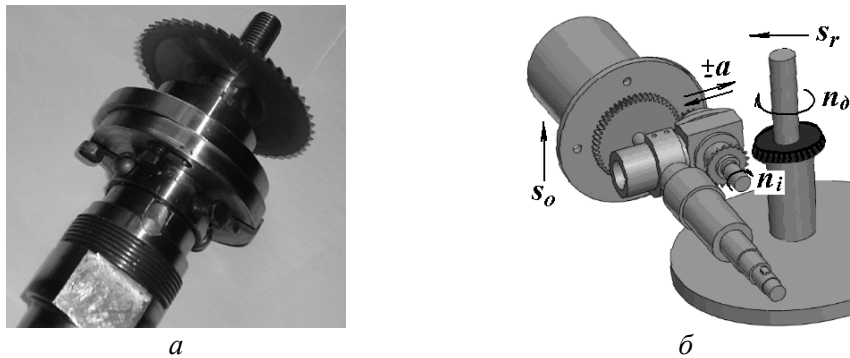


Рис. 1. Диска фреза, встановлена на оправку зі зміщенням (а) та з передачею руху різання через мультиплікатор (б)

Крім руху подачі  $s_o$  і обертального руху стола з зубчастим колесом, для формування конічного зубчастого вінця необхідне додаткове лінійне переміщення, яке потрібно надати столу із заготовкою – радіальну подачу  $s_r$ . Особливість використання універсального зубофрезерного верстата, на якому реалізований РК-спосіб для конічних коліс, полягає в необхідності погодження напрямку і величини лінійних переміщень фрезерного супорта і стола (допоміжних рухів), а також врахування періодичного радіального зворотно-поступального руху дискової фрези з її обертанням навколо осі – головних рухів різання у радіально-коловому способі.

*Напрямки переміщень.* Більшість універсальних зубофрезерних верстатів з ручним керуванням мають механізм з приводом і напрямними для радіального переміщення стола, необхідні для виготовлення косозубих коліс. Наприклад, конструкція важкого зубофрезерного верстата з дисковою фрезою, який можна використати для РК-способу, показана на рис. 2, а, де: 1 – дискова фреза, встановлена з ексцентриситетом; 2 – стійка інструментального супорта; 3 – двигун приводу інструментального шпинделя; 4 – зубчасте колесо; 5 – станина. Налаштування радіального переміщення стола виконують за допомогою гітари змінних шестерень, якою узгоджують радіальну подачу з вертикальною подачею фрези.

Такі можливості, як технічні, також є у зубофрезерних верстатів з ЧПК, де передбачене радіальне переміщення, так і програмні – для задання величини радіальної подачі. Наприклад, у зубофрезерного верстата з ЧПК мод. LC80 німецької фірми Liebherr-Verzahntechnik радіальне переміщення ( $X_I$ ) надається інструментальній бабці, яка переміщається по напрямних кочення (рис. 1, б).

Під час використання одноступеневого мультиплікатора напрямок обертання фрези щодо напрямку обертання інструментального шпинделя змінюється на протилежний. Інструментальний шпиндель обертається за годинниковою стрілкою, а обертання фрези відбувається в протилежному напрямку. Вертикальна подача супорта може здійснюватися як згори вниз, так і знизу вгору. В першому випадку різання необхідно починати від осі заготовки, а переміщення стола повинно відбуватися в бік від супорта. Тоді отримаємо різання з попутною подачею (рис. 3, а).

У другому випадку нарізання колеса потрібно починати від периферії колеса, а стіл – переміщати з подачею  $s_r$  в напрямку до супорта; різання буде здійснюватися із зустрічною подачею (рис. 3, б).

*Рух різання.* Особливість руху різання у РК-способі – необхідність додаткового періодичного радіального зворотно-поступального руху дискової фрези з частотою, що дорівнює кількості зубців колеса, яке нарізають. Цей рух забезпечує безперервність процесу обкочування, як це здійснюється при нарізанні циліндричних коліс черв'ячними фрезами. Величина періодичного переміщення дискової фрези визначається зовнішнім окружним модулем  $m_{te}$  конічного колеса і має амплітуду  $a$ , а довжина подвійного ходу фрези дорівнює  $2a$ . Налаштування верстата повинно бути таким, щоб у граничному переміщенні зовнішній діаметр фрези був дотичним до твірної конуса западин зубців колеса, як це показано на рис. 3.

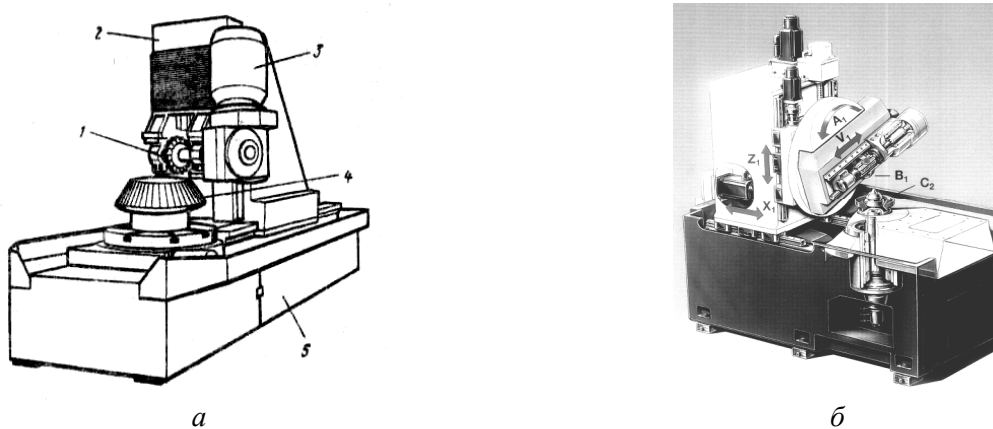


Рис. 2. Загальний вигляд верстатів для нарізання конічних коліс за неперервного обкочування за РК-способом: а – універсальний зубофрезерний верстат; б – зубофрезерний верстат з ЧПК мод. LC80

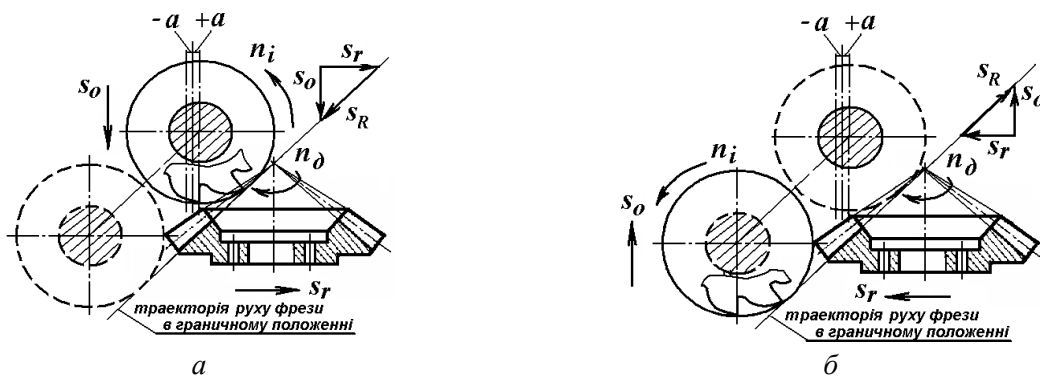


Рис. 3. Кінематичні схеми нарізання конічних коліс на зубофрезерному верстаті дисковою фрезою за неперервного обкочування на основі радіально-колового способу

*Розрахунок радіальної і осьової подачі та переміщення інструмента.* Від величини подач  $s_o$  і  $s_r$  залежить точність коліс і якість зубців, які нарізають дисковою фрезою. Значення  $s_o$  і  $s_r$  повинні бути підібрані так, щоб вектор їх геометричної суми  $s_R$  утворював з горизонтальною подачею кут, що дорівнює половині кута конуса западин між зубцями (рис. 3).

Для налаштування верстата необхідно розрахувати подачу та міжцентрову віддаль. Переміщення фрези повинно враховувати довжину врізання, а фреза під час різання за першою схемою повинна бути виведена в положення, яке відповідає початковій міжцентровій віддалі  $A_i$  (рис. 4). Якщо  $\delta_\omega$  – кут початкового конуса,  $2\delta_\omega$  – кут при вершині початкового конуса;  $R_e$ ,  $R_m$  і  $R_i$ , – відповідно, зовнішня, середня і внутрішня конусні віддалі, то  $A_i$  дорівнюватиме:

$$A_i = R_\phi \cdot \cos \delta_\omega + R_i \cdot \sin \delta_\omega,$$

де  $R_\phi$  – радіус фрези.

Для повного нарізання профілю зубців фреза повинна мати перебіг, а її положення щодо осі стола у кінці різання визначається міжцентрною віддаллю  $A_e$ :

$$A_e = R_\phi + R_e \cdot \sin d_w.$$

Повне переміщення фрези у русі різання дорівнюватиме:

$$L_p = \frac{A_e - A_i}{\sin d_w} = \frac{R_\phi \cdot (1 - \cos d_w)}{\sin d_w} + H,$$

де  $H$  – ширина вінця кінцевого колеса:  $H = R_e - R_i$ .

Ширину вінця можна визначити за величиною середньої конусної віддалі, яка дорівнює:

$$R_m = 0,42 \cdot m_{te} \cdot Z,$$

де  $m_{te}$  – зовнішній коловий модуль;  $Z$  – кількість зубців колеса.

Наприклад, якщо прийняти:  $R_\phi = 75$  мм;  $m_{te} = 5$  мм;  $Z = 26$ ;  $2\delta_\omega = 110^\circ$ ; половина ширини вінця 7,5 мм, то  $R_m = 54,6$  мм;  $R_e = 62,1$  мм;  $R_i = 47,1$  мм;  $H = 15$  мм;  $L_p = 54$  мм.

Періодичне радіальне переміщення фрези під кутом впливає на поверхню дна впадин між зубцями.

Гребінці на цій поверхні будуть більшими під час нарізання коліс і меншими – під час нарізання кінцевих шестерень, які мають менший кут діляльного конуса.

Залежно від налагодження верстата кінцеві колеса, нарізані РК-способом, можуть бути зі змінною по ширині вінця висотою або рівновисокими. Точність кінцевих коліс, нарізаних дисковою фрезою за один прохід, відповідає 10–11 ступеню точності, а за двохпрохідного нарізання можна забезпечити 9 ступінь точності. Достатньо висока якість зубонарізання зумовлена тим, що різання здійснюється великою кількістю зубців інструменту, що дає змогу значно зменшити силу різання і теплове навантаження на інструмент, пружні і температурні деформації фрези і деталі. Шорсткість зубців лежить у межах 1,5–2,5 мкм за параметром  $R_a$ .

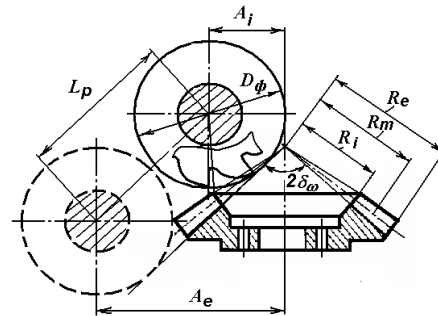


Рис. 4. Розміри налагодження верстата

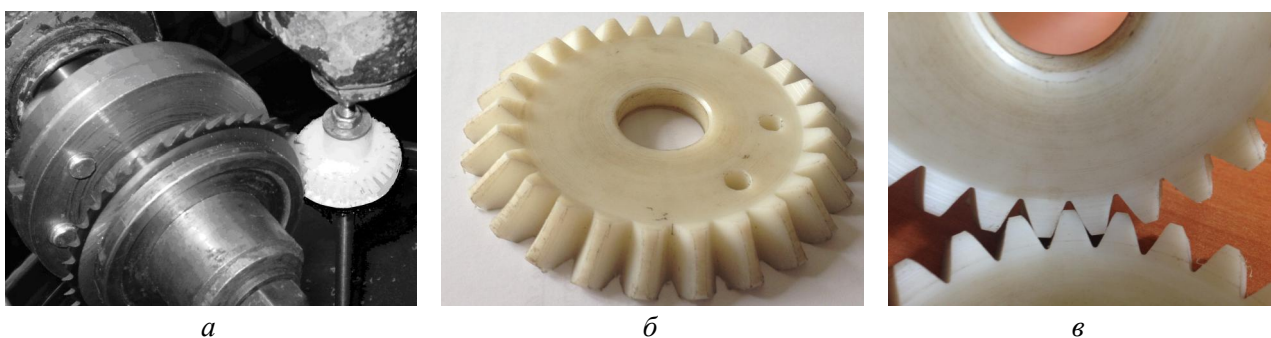


Рис. 5. Нарізання кінцевого колеса дисковою фрезою (а); синусоїдальне кінцеве колесо (б) і зачеплення кінцевих синусоїдальних коліс (в), нарізаних РК-способом

Процес зубонарізання забезпечує значне скорочення основного часу. Осьова подача фрези, що мала 46 зубців, дорівнювала 0,09 мм на оберт фрези, або 2,4 мм – на оберт заготовки. Радіальна подача за кута початкового конуса  $55^\circ$  становила 3,43 мм/об., а діагональна подача у напрямку твірної внутрішнього конуса – 4,18 мм/об. За частоти обертання шпинделя фрези  $57 \text{ хв}^{-1}$  основний час різання становить 5,6 хв.

На рис. 5, а показано процес нарізання дисковою фрезою РК-способом експериментального конічного колеса з поліпропілену; на рис. 5, б – конічне колесо з рівновисокими синусоїдальними зубцями, нарізане РК-способом, а на рис. 5, в – зубчасте зачеплення.

#### **Висновки:**

1. РК-спосіб для виготовлення конічних коліс є високоефективним процесом, який поєднує істотне скорочення технологічних витрат з одночасним досягненням якості зубчастих коліс і забезпеченням високої продуктивності процесів зубонарізання.

2. Розроблений спосіб нарізання конічних зубчастих коліс дає змогу використовувати універсальне обладнання – звичайний зубофрезерний верстат та найпростіший різальний інструмент – дискову багатозубчасту фрезу. Дослідження підтвердили можливість виготовлення прямозубих конічних коліс без дорогих спеціальних зубостругальних верстатів і спеціального оснащення та інструментів. За незначних витрат на модернізацію обладнання і технологічне спорядження, яке необхідне для радіально-колового способу зубонарізання, економічний ефект може бути значним. Здешевлення обладнання і технології дасть змогу значно зменшити собівартість конічних зубчастих коліс, які випускають у значних обсягах.

3. Розроблений спосіб рекомендується для використання, зокрема, в ремонтному виробництві редукторів, де він може бути особливо ефективним, даючи змогу ефективно виконувати завдання виготовлення пошкоджених конічних коліс і шестерень за відсутності спеціального обладнання.

4. За заміни в редукторі пари спрацьованих евольвентних конічних коліс новими конічними колесами, які нарізані РК-способом та мають синусоїдальний профіль зубців, буде забезпечена вища надійність передачі і редуктора за мінімальних витрат на ремонтні роботи.

1. Грицай І. Є., Громнюк С. І. Підвищення ефективності процесу нарізання зубчастих коліс на основі радіально-обертового методу в умовах обкочування [Текст] // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. Донбаської державної машинобудівної академії. – 2013. – Вип. 32. – Краматорськ, 2013. – С. 226–229. 2. Грицай І. Є., Литвиняк Я. М. Підвищення техніко-економічної ефективності процесів виробництва зубчастих коліс поєднанням традиційних та нових способів формоутворення [Текст] // Вісник Національного університету “Харківський політехнічний інститут”: зб. наук. пр. – Харків: Вид-во НТУ “ХПІ”, 2010. – № 26. – С. 30–35. 3. Громнюк С. І., Грицай І. Є. Концепція зубофрезерного верстату на основі радіально-колового способу зубонарізання [Текст] // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2014. – С. 142–152. 4. Громнюк С. І., Грицай І. Є. Зміна кінематики зубофрезерного верстата для нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом [Текст] // Вісник НТУ “Харківський політехнічний інститут”. Серія “Проблеми механічного приводу”. – № 34 (1143). – Харків, НТУ “ХПІ”, 2015. – С. 30–34. 5. Громнюк С. І. Розширення технологічних можливостей універсальних зубофрезерних універсальних верстатів введенням керованого приводу головного руху [Текст] / С. І. Громнюк // “Технологічний аудит та резерви виробництва”. – Харків, 2014. – №5/3(19). – С. 23–27. 6. Грицай І. Є., Ступницький В. В. Дослідження синусоїдальних зубчастих передач [Текст] // Підйомно-транспортна техніка – 2007. – № 4(24). – С. 55–64. 7. Грицай І. Є., Литвиняк Я. М. Синусоїдальні зубчасті передачі як альтернатива традиційним передачам та новий метод їх виготовлення [Текст] // Вісник Національного університету “Харківський політехнічний інститут”: зб. наук. пр. Тематичний випуск “Проблеми механічного приводу”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2009. – № 19. – 168 с. – С. 43–53. 8. Грицай І. Є. Обкочувально-радіальний спосіб нарізання зубчастих коліс та його перспективи для виготовлення приводів підйомно-транспортних машин: Підйомно-транспортна техніка. – 2013. – № 3 (39). – С. 35–39. 9. Грицай І. Є., Громнюк С. І. Підвищення ефективності процесу нарізання зубчастих коліс на основі радіально-обертового методу в умовах обкочування. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2013. – Вип. 32. – С. 226–229.