

М.: АН СССР, 1962. – С.254. 3. Дроздов Ю.Н. Обобщенные характеристики для оценки износостойкости твердых тел // Трение и износ. Т.1. – 1980. – N 3. – С.417–424. 4. Методика расчета узлов трения на износ на стадии проектирования изделий: Отчет по НИР / ТашПИ. № ГР 01.86.0105901; инв. № 02.90.0025963. – Ташкент, 1989. – 78 с. 5. Патент України № 31545 МПК (2006), С22С33/02 Антифрикційний композиційний матеріал на основі нікелю / Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, О.А. Гавриш, В.В. Холявко, Ю.Ю. Віцюк, опубл. 10.04.08, Бюл.№7. 6. Патент України № 40139 МПК(2009), С22С9/02, С22С9/00, С22С1/00, С22С1/04, С22С1/05 Антифрикційний композиційний матеріал / Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, О.А. Гавриш, В.В. Холявко, Ю.Ю.Віцюк, О.О. Мельник, опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6. 7. Гавриш А.П. Сучасні можливості магніто-абразивним обробленням важкооброблюваних матеріалів / [А.П. Гавриш, О.О. Мельник] // Вісник Київського Національного університету технології та дизайну. – 2008. – №3(41). – С. 22–28. 8. Патент України № 48386 МПК(2009), G11В5/127 Спосіб фінішної абразивної обробки внутрішніх циліндричних поверхонь деталей з високолегованих магнітно-м'яких сплавів / А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, П.О. Киричок, О.А. Гавриш, О.О. Мельник, Ю.Ю. Віцюк, П.О. Губар, опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5. 9. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.

УДК 621.914.5:621.9.015

І.Є. Грицай

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування

## ДОСЛІДЖЕННЯ СУМАРНОЇ ПОХИБКИ ПРОЦЕСУ НАРІЗАННЯ СИНУСОЇДАЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС В УМОВАХ ОБКОЧУВАННЯ

© Грицай І.Є., 2011

Наведені закономірності утворення зрізів зубцями дискового інструмента встановленого з ексцентриситетом на інструментальній оправці при нарізанні прямозубих зубчастих коліс методом обкочування для теоретичного визначення складових сил різання при прогнозуванні впливу конструктивно-технологічних факторів процесу на параметри стійкості інструмента та точності зубчастих коліс.

Conformities to the law of formation of cuts are resulted by the indents of disk instrument set with an eccentricity on instrumental setting at cutting of directing tooth's of gear-wheels by the method of rolling for theoretical determination of component forces of cutting at prognostication of influence of structurally technological factors of process on the parameters of firmness of instrument and exactness of gear-wheels.

**Актуальність проблеми.** Зубчасті колеса і зубчасті передачі як складові більшості сучасних механізмів і машин належать до найпоширеніших деталей машинобудування. Це деталі підвищеної складності, точність яких регламентується десятками часткових показників за трьома нормами точності та однією нормою бокового зазору. Технологія їх виготовлення є однією із найскладніших та найбільш працемістких порівняно із іншими деталями.

Серед відомих зубчатих передач за використанням і поширенням домінують евольвентні передачі, які використовують переважно у швидкісних і ділільних приводах. Вони мають низку переваг (як-от: несприйнятливність до коливання міжцентрової відстані, сталість передавального співвідношення, можливість висотної і кутової корекції зубців); технологічна універсальність полягає у використанні одного модульного інструмента для нарізання коліс з різною кількістю зубців.

Разом з тим, евольвентному зачепленню властиві істотні недоліки: обмежена навантажувальна здатність; лінійний контакт зубців у передачі, який в реальних умовах трансформується в точковий контакт, що призводить до нерівномірного розподілення навантаження на ширині зубців і збільшення контактних напружень; підвищений рівень шуму, зниження плавності роботи, значні коливання передавальних відношень під час інтенсивної експлуатації та роботи на граничних режимах.

Технологія виготовлення евольвентних зубчастих коліс теж має істотні недоліки, яких не вдалося уникнути попри тривалі наукові дослідження. Для цих процесів необхідна широка номенклатура спеціальних складних і дорогих верстатів та різальних інструментів: модульних черв'ячних фрез, шеверів, зубчастих хонів, черв'ячних або тарільчастих шліфувальних кругів тощо. Підвищена складність виготовлення середньошвидкісних і швидкохідних зубчастих коліс вимагає високого рівня організації та культури виробництва. Загалом, технологічне обладнання та спорядження для виробництва зубчастих коліс належить до найдорожчих. Внаслідок великих витрат праці, матеріалізованої в ці деталі машин, у парку технологічного устаткування підприємств зубобробні верстати за кількістю займають друге місце після обладнання для деталей – тіл обертання.

Зубчастим передачам Новикова, які поки що є незамінними у важконавантажених передачах, також властиві недоліки. Так, вони можуть бути тільки косозубчастими, з шириною вінця не меншою ніж шість модулів; мають підвищену чутливість до монтажних перекосів і зміни міжцентрової відстані; технологічно складні: черв'ячна фреза виготовляється тільки для одного модуля. Внаслідок нерівномірного розподілення навантаження на активній поверхні зубців передача Новикова працює з підвищеним шумом.

Більшості недоліків, характерних для евольвентних зубчастих коліс і коліс із зачепленням Новикова, не мають синусоїдальні зубчасті колеса та передачі. Це швидкісні передачі з профілями зубців, окреслених синусоїдою, які порівняно з евольвентними мають меншу швидкість удару в зачепленні, на 10–15 % нижчий рівень шуму, більший опір згину, підвищену зносостійкість зубців і вищу навантажувальну здатність.

У межах 1,2 величини розмаху синусоїди в цій передачі дотримується основний закон зачеплення. Завдяки вищій вантажній здатності синусоїдальних зубців при передаванні однакової потужності синусоїдальні передачі можуть мати до 1,5 раза менший модуль, ніж евольвентні, а, редуктори і коробки передач силових синусоїдальних трансмісій можуть мати на 20–30 % менші габарити та масу.

Переваги синусоїдальних передач підтверджені експериментальними дослідженнями [1] та обґрунтовані теоретично [мої стт]. Проте, незважаючи на вищі експлуатаційні характеристики, до цього часу ці передачі не використовуються у машинах. Основна перешкода – складність їх нарізання, якщо йдеться про традиційні методи зубобробки – фрезерування черв'ячними фрезами, або дисковими фрезами з одиничним поділом.



*Рис. 1. Нарізання зубчастого колеса дисковою фрезою на зубофрезерному верстаті обкочуванням*

Новий метод нарізання синусоїдальних коліс дисковою фрезою на зубофрезерному обкочувальному верстаті [2] та його технологія опрацьовані та удосконалені на кафедрі ТМБ [3–5] (рис. 1).

Встановлено, що цей метод можна використати також для нарізання евольвентних зубчастих передач, шляхом зміни закону зворотно-поступального руху дискової фрези, або керування цим рухом системою ЧПК зубофрезерного верстата. Проте, для впровадження цього методу потрібні додаткові дослідження, які мають значення для його метрологічного забезпечення. Для цього необхідно дослідити вплив технологічних та конструктивних чинників процесу зубообробки на точність виготовлення зубців.

**Теоретичні дослідження.** Завдяки працям Б.А. Тайца та Калашникова розроблено систему класифікації та аналізу початкових похибок процесу нарізання евольвентних зубчастих коліс модульними черв'ячними фрезами, проте процес нарізання зубчастих коліс дисковими фрезами в умовах обкочування має істотні відмінності. Для визначення сумарної похибки зубообробки дисковою фрезою та її складових необхідно класифікувати первинні (елементарні) похибки за частотно-амплітудними ознаками; виявити найістотніші з них, що найбільше впливають на зниження точності процесу; встановити закони перенесення первинних похибок на зубчасте колесо в процесі його виготовлення; привести первинні похибки до ліній верстатного зачеплення по обидвох системах профілів у функції від повороту оброблюваного колеса; встановити їх зв'язок із показниками кінематичної точності і плавності роботи передачі.

**Структура сумарної похибки у порівнюваних методах.** Первинні похибки, що впливають на точність зубонарізання, приведемо до двох груп – тих, які вносяться різальним інструментом, і тих, які надходять з боку оброблюваної заготовки. Деякі елементарні похибки однаково впливають на точність в обидвох процесах. До таких належать, зокрема, похибки фрези, що діють в осьовому напрямку заготовки, кутова похибка стола верстата, кінематична похибка внаслідок зазору в ділильній парі стола і кінематична похибка обкочування, тому їх вилучено з порівняння. У табл. 1 наведено ті початкові похибки, які змінюють величину і по-різному впливають на досягнену точність у порівнюваних методах.

Таблиця 1

| Складові сумарної похибки   | Метод нарізання   |                              |
|---|-------------------|------------------------------|
|   | Черв'ячною фрезою | Дисковою фрезою обкочуванням |
| Похибки, приведені до інструменту   |                   |                              |
| Неточності виготовлення та заточування  | +                 | –                            |
| Методичні похибки методу нарізання  | +                 | –                            |
| Похибки установки інструменту   | +                 | +                            |
| Похибки зубофрезерного верстата   | +                 | +                            |
| Похибки установки кута фрезерної каретки  | +                 | +                            |
| Похибки виготовлення та установки інструментального пристрою  | +                 | +                            |
| Пружні деформації та вібрації на осі інструменту внаслідок податливості гільки інструменту                          | +                 | –                            |
| Кінематична похибка ланцюга диференціалу  | +                 | +                            |
| Похибки, приведені до заготовки   |                   |                              |
| Неточності установки заготовки (включно з похибкою виготовлення та установки робочої оправи)                        | +                 | +                            |
| Кінематична похибка ланцюга обкочування   | +                 | +                            |
| Похибка налагоджування верстата   | +                 | +                            |
| Пружні деформації та вібрації на осі заготовки внаслідок податливості верстата та пристрою, приведеної до заготовки | +                 | –                            |








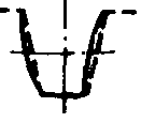

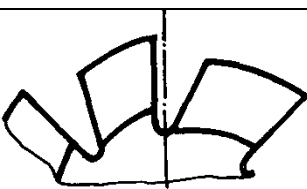


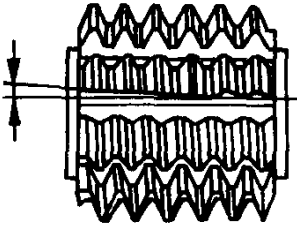


З порівняння випливає наступне.

1. З використанням другого методу низки початкових похибок немає. Так, першої похибки черв'ячного фрезерування не виникає під час дискового фрезерування, бо інструментальну виробничу поверхню черв'ячної фрези – рейку замінено точковим контактом вузької дискової фрези.

2. Методичної похибки черв'ячного фрезерування – утворення евольвентного профілю як сукупності послідовних огинаючих положень прямолінійного зубця в дисковому зубофрезеруванні немає.

3. У табл. 2 наведено можливі відхилення положення передньої поверхні рейки черв'ячної фрези, відповідні викривлення фактичної форми виробничої поверхні та зумовлені ними похибки профілів нарізаних евольвентних зубців. Такі відхилення у дисковій фрезі внаслідок іншої схеми формоутворення також не впливають на точність нарізаного колеса у зубофрезеруванні дисковим інструментом внаслідок іншої схеми різання та формоутворення.

Таблиця 2

| Відхилення площини передньої поверхні черв'ячної фрези |   | Похибка  |   |
|--|---|--|---|
| Назва  | Форма   | Виробничої поверхні  | Западни між зубцями евольвентного колеса  |
| Додатний передній кут рейки                            |    |    |    |
| Від'ємний передній кут рейки                           |    |    |    |
| Випуклість передньої поверхні рейки                    |   |  |  |
| Радіальне зміщення передньої поверхні рейки            |  |  |  |
| Нахил (перекос) осі черв'ячної фрези                   |  |  |  |

4. З використанням другого методу пружні деформації та вібрації і на осі заготовки, і на осі фрези є набагато меншими внаслідок участі в різанні значної кількості зубців. Так, під час використання мультиплікатора кількість активних зубців дискової фрези при зніманні припуску в одній западині може становити 150–180, тоді як у черв'ячних фрез кількість працюючих зубців в одній западині не більша ніж 20. Розподілення припуску у западині між великою кількістю зубців дискової фрези зменшує на порядок силу різання, а сам процес стає спокійним та відбувається без ударних навантажень, тому ця елементарна похибка практично не впливає на точність зубчастих коліс.

Загалом, у черв'ячному зубофрезеруванні коліс середніх модулів (2–5 мм) на ці групи похибок припадає до 30 – 37 % сумарної похибки обробки, тому за другим методом за їх відсутності точність процесу буде вищою, відповідно, на 30 – 37 %.

**Елементарні похибки у порівнюваних процесах.** У табл. 3 наведено залежності для розрахунку основних похибок процесу у двох порівнюваних методах. Елементарні систематичні похибки подано як гармонічні коливання, приведені до лінії верстатного зачеплення. Наведено графіки періодичних похибок для однакових початкових даних: діаметр фрез 100 мм; кількість зубців фрез: черв'ячної 10, дискової 30; модуль 2 мм, стандартний кут зачеплення  $20^0$ .

Таблиця 3

**Залежності для розрахунку основних похибок процесу у двох порівнюваних методах**

| № | Елементарна похибка  | Залежність для розрахунку  |  |
|---|--|--|--|
|   |  | Черв'ячна фреза  | Дискова фреза  |
| 1 | Похибка від радіального биття фрези на її осі похибка осі інструментального шпинделя | $\Delta f_{рад} = \pm \frac{e}{2} \sin(\varphi \pm \alpha_\omega)$                                       | $\Delta f_1 = \pm e_1 \cdot \cos(\varphi \cdot i) \cdot \sin \alpha_\omega;$<br>$\Delta f_2 = \pm e_2 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha_\omega;$<br>$\Delta f_{рад} = \sin \alpha_\omega \cdot$<br>$\sqrt{e_1^2 \cdot \cos^2(\varphi \cdot i) + e_2^2 \cdot \cos^2 \varphi};$ |
| 2 | Похибка при нахилі дискової фрези  | $\Delta f_{нах} = \Delta x \cdot \sin\left(\varphi_{фр} + \frac{\sin \alpha_\omega}{2} + \lambda\right)$ | $\Delta f_{нах} = \Delta x \cdot \sin(\varphi_{фр} i) \cdot \sin \alpha_\omega$  |
|   |  | де: $\Delta x = \frac{D_a - \phi_p}{2} \cdot \sin \Delta \varphi_{фр}$                                   |  |
| 3 | Похибка кута зачеплення  | $\Delta f_\alpha = \pi \cdot m \cdot \cos[(\alpha_\omega + \Delta \alpha_\omega) - \cos \alpha_\omega]$  | $\Delta f_\alpha = \pi \cdot \frac{2a}{\text{ctg} \alpha_\omega} \cdot [\cos(\alpha_\omega + \Delta \alpha_\omega) - \cos \alpha_\omega]$  |
| 4 | Похибка внаслідок осьового (вздовж осі фрези) зміщення фрези                         | $\Delta f_{oc} = \pm \delta \cos \alpha_\omega$  | $\Delta f_{oc} = \delta \sin\left(\frac{\varphi \cdot i}{z}\right)$  |

*Примітки:*  $e, e_1, e_2$  – радіальне биття, відповідно, на осі черв'ячної фрези, на осі інструментального шпинделя та на осі дискової фрези;  $\Delta \varphi, \Delta x$  – кутова похибка від нахилу (перекосу) фрези та лінійне зміщення на зовнішньому діаметрі фрези  $D_a$ ;  $i$  – передавальне співвідношення мультиплікатора дискової фрези;  $\alpha_\omega$  – кут профіля черв'ячної фрези (кут зачеплення);  $\lambda = 5^0$  – кут підйому гвинтової лінії черв'ячної фрези.

На рис. 2 показано гармонічні похибки синусоїдального колеса для передавального співвідношення на осі мультиплікатора 1, 2 і 3 від радіального биття на осі інструментального шпинделя та осі дискової фрези.

На рис. 3 показано гармонічні похибки синусоїдального колеса і евольвентного колеса внаслідок однакового радіального биття інструментів 100 мкм при передавальному співвідношенні на осі мультиплікатора дискової фрези  $i = 3$ . Величина розмаху гармоніки на лінії верстатного зачеплення, що відповідає сумарній похибці  $\Delta_{рад}$  на профілях нарізаних коліс, викликаних радіальним биттям для дискової фрези, дорівнює 102 мкм, для черв'ячної фрези 195 мкм; за другим методом похибка зубообробки зменшується удвічі.

Періодичні похибки коліс, які виникають внаслідок нахилу (перекосу) інструментів, наведено на рис. 4. При куті нахилу  $0,5^0$  похибка зубообробки дорівнює: для дискової фрези 255 мкм, для черв'ячної фрези – 847 мкм, тобто, похибка зменшується у 3,3 раза.

Розрахункове значення похибок зубчастих коліс, які виникають внаслідок відхилення кута зачеплення (кута профілю вихідного контура черв'ячної фрези), показано на рис.5. Як видно із

графіків, у діапазоні кута зачеплення  $\alpha_w = 10^\circ - 25^\circ$  у випадку різання дисковою фрезою похибка зубонарізання менша на  $0,08^\circ - 0,1^\circ$ , при цьому похибка профілю зубчастого колеса для стандартного кута зачеплення  $20^\circ$  становить 110 мкм. Істотним є також те, що кут зачеплення в дискової фрези, на відміну від черв'ячної, може змінюватися в широких межах – від  $15^\circ$  до  $40^\circ$ .

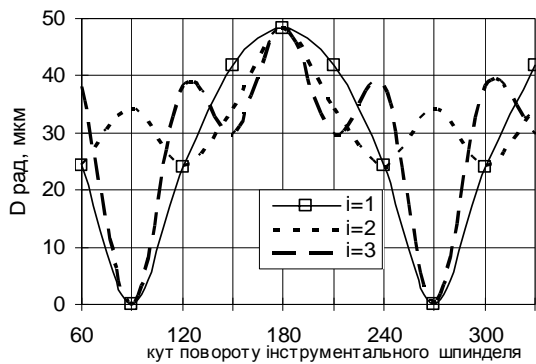


Рис. 2. Похибка синусоїдального колеса від радіального биття дискової фрези при передавальному співвідношенні мультиплікатора на осі фрези 1, 2 і 3 радіальне биття:  $e_1 = 100$  мкм;  $e_2 = 30$  мкм

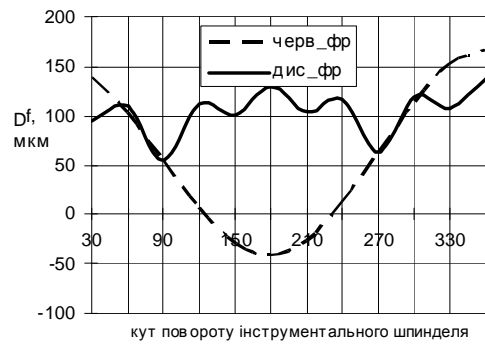


Рис. 3. Похибка колеса від радіального биття інструменту 100 мкм передавальне співвідношенні мультиплікатора на осі дискової фрези  $i = 3$

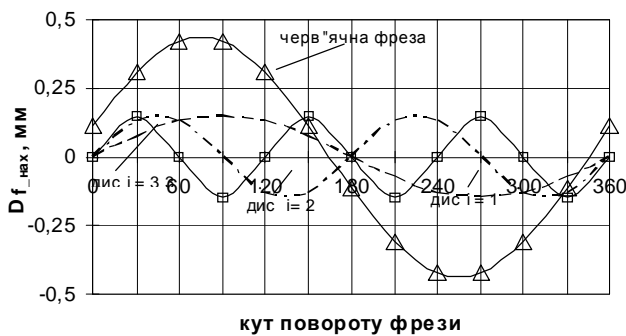


Рис. 4. Похибка колеса внаслідок нахилу (перекосу) інструментів  $D_{aф} 100$  мм;  $Z = 30$ ; кут зачеплення  $20^\circ$ ; передавальне співвідношенні мультиплікатора на осі дискової фрези 1, 2 і 3;  $\Delta f_{max} = 0,5^\circ$

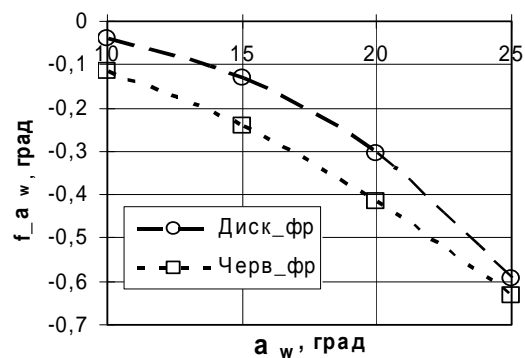


Рис. 5. Похибка зубчастого колеса внаслідок відхилення кута зачеплення інструменту

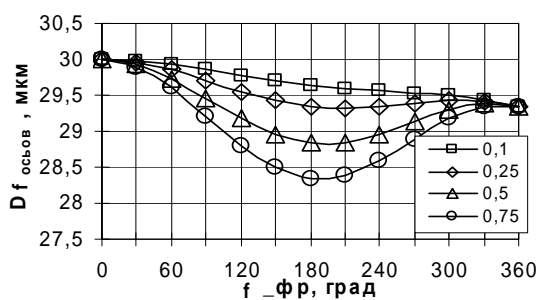


Рис. 6. Похибка зубчастого колеса внаслідок неточності установки фрези в осьовому напрямку при нарізанні дисковою фрезою

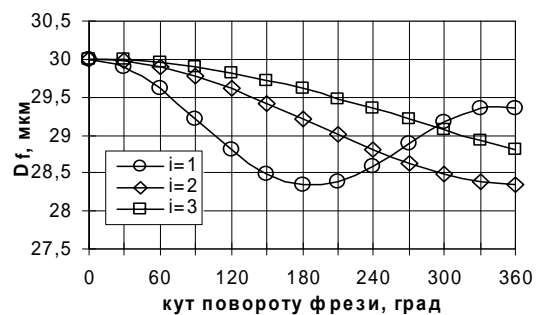


Рис. 7. Похибка зубчастого колеса внаслідок неточності установки фрези в осьовому напрямку при нарізанні дисковою фрезою для передавального співвідношення мультиплікатора 1,2 і 3 осьове зміщення фрези 0,75 мм

На рис. 6 та рис. 7 представлено гармонічні похибки профіля зубчастого колеса внаслідок осьового зміщення дискової фрези у межах 0,1 – 0,75 мм (рис. 6) та залежно від передавального співвідношення мультиплікатора (рис. 7).

**Висновки.** На основі наведених даних та результатів розрахунку елементарних похибок процесу нарізання зубчастих коліс двома методами – черв'ячною та дисковою фрезами обкочуванням – встановлено, що для однакових початкових умов і рівнозначних вихідних даних з використанням другого методу зубонарізання сумарну похибку можна зменшити загалом до 70 %. Це є результатом удосконаленої схеми різання, відсутності значної частини елементарних похибок, присутніх у традиційному процесі нарізання черв'ячними фрезами, а також значного зменшення величин тих елементарних похибок, які виникають за використання обох методів. Отримані результати свідчать про можливість значного підвищення точності нарізання зубчастих коліс дисковими фрезами в умовах обкочування, що є основною передумовою вищої експлуатаційної якості зубчастих передач.

1 Аникин Ю.В. Синусоидальное зацепление. – Воронеж, 1974. – 64 с. 2. Патент України №73550: МПК 7B23P15/14: Благут Е.М. Спосіб нарізки зубчастих коліс синусоїдальної передачі Благута. Бюл. № 8, 2005 р. 3. Грицай І.Є., Благут Е.М. Зубчатые эвольвентные передачи: достоинства, недостатки, традиции // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия – металлообработка – 2005. – №2. – С. 36–40. 4. Грицай І.Є., Литвиняк Я.М., Кук А.М. Застосування дискових фрез із рухомою віссю обертання для покращення техніко-економічних показників виготовлення циліндричних зубчастих коліс // Інструменти та інструментальне виробництво: Матеріали першої науково-практичної конференції. – Львів, 24–25 жовтня: Зб. наук. статей. – Львів, ЛвЦНТЕІ, 2007. – С. 31, 32. 5. Литвиняк Я.М., Грицай І.Є., Махоркін Є.М. Підвищення технологічної гнучкості операцій формоутворення зубців циліндричних зубчастих коліс в автоматизованому виробництві // Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні. Міжгалузевий збірник наукових праць. – 2008. – Вип. 42. 6. Литвиняк Я.М., Кусий Я.М., Арендар Л.А., Махоркін Є.М. Вплив конструктивних параметрів на формування характеристик синусоїдального зубчастого зачеплення // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Матер. VIII Междунар. промышлен. конф., п. Славское, Карпаты. – К.: УИЦ “Наука. Техника. Технология”. – 2008. – С. 215–218.