

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.83:621.9.06

С.І. ГРОМНЮК,

І.Є. ГРИЦАЙ, д-р техн. наук,

І.О. КОВАЛЬЧУК, Львів, Україна

КОНЦЕПЦІЯ ЗУБОФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТУ НА ОСНОВІ РАДІАЛЬНО-КОЛОВОГО СПОСОБУ ЗУБОНАРИЗАННЯ

Запропоновано концепцію зубофрезерного верстата на основі радіально-колового способу зубонарізання, що дає змогу значно спростити конструкцію верстата, істотно зменшити його масу та знизити споживану потужність. З цією метою в статті проаналізовано особливості використання радіально-колового способу зубофрезерування та виявлено його переваги порівняно з відомими методами, розроблено концепцію побудови та принципову схему зубофрезерного верстату на основі РК-способу формоутворення та різання, обґрунтовано переваги зубофрезерного верстата на запропонованій концепції.

Предложена концепция зубофрезерного станка на основе радиально-кругового способа зубонарезания, что позволяет значительно упростить конструкцию станка, существенно уменьшить массу и снизить потребляемую мощность. С этой целью в статье проанализированы особенности использования радиально-кругового способа зубофрезерования и выявлены его преимущества по сравнению с известными методами, разработана концепция построения и принципиальная схема зубофрезерного станка на основе РК-образа формообразования и резания, обоснованы преимущества зубофрезерного станка на предложенной концепции.

The concept of gear hobbing machine based on radial-circular gear cutting method is proposed. It allows to simplify significantly the design of the machine, to reduce significantly machine weight and to decrease significantly power consumption. For the purpose, the features of radial-circular hobbing technique application is analyzed, its advantages in comparison with the known methods are identified, the concept of development and schematic diagram of gear hobbing machine on the basis of the RC image of forming and cutting are worked out, advantages of gear hobbing machine on the proposed concept are proved.

Вступ. За останні роки в галузі технології зубчастих коліс *зубообробного обладнання* спостерігається значний прогрес, який *заторкнув усі аспекти процесів* зубообробки, компонентів верстатів і технологічного оснащення, у тому числі різальних інструментів. Так, сучасні високодинамічні зубообробні верстати з ЧПК працюють за технологією сухого високошвидкісного різання і забезпечують автоматизоване керування за 6 основними та 3-5-ма осями. Вони споряджені системами прямих приводів “серводвигун – електрошпindel” і “серводвигун – клинова пасова зубчаста передача – передача гвинт – гайка”; системою змащення з подаванням мастила до підшипників та рухомих елементів верстата під тиском; верстати мають ефективну систему відведення стружки, що виключає її тепловий вплив на його елементи, з низькою теплопровідністю і малою чутливістю до теплової дії; інтегровані та автоматизовані периферійні системи обслуговування, зокрема складування, подавання і автоматичної заміни деталей. Станини і стояки корпусів верстатів і основних конструктивних елементів виконані з максимально зрівноваженими масами та порожнинами для теплової стабілізації усєї конструкції. Привід інструментального шпинделя через зубчасту передачу дає змогу змінювати потужність від 10 до 22 кВт залежно від необхідної величини обертового моменту.

Удосконалення модульних черв'ячних фрез йде шляхом підвищення їх точності, розроблення нових інструментальних матеріалів з підвищеними різальними властивостями. Їх виготовляють із швидкорізальних інструментальних сталей, а також з карбідосталей, які мають твердість до 65-66 HRC, згинну міцність до 3 Гпа та теплостійкість до 700⁰С, що дає змогу вести обробку на підвищених швидкостях різання. Нанесенням надтвердих захисних зносостійких покриттів з кераміки, карбідів і нітридів титану, алюмінію, боридів титану і хрому товщиною до 15 мкм досягають підвищення стійкості черв'ячних фрез, яка наближається до стійкості інструментів з надтвердих інструментальних матеріалів, що дозволяє збільшити швидкість різання до 100 - 150 м/хв.

Разом з тим, у ринкових умовах продукція машинобудування, у т.ч. верстатобудування, повинна відповідати вимогам ринкової економіки, а її розвиток має підлягати загальній тенденції – зменшення ціни при одночасному підвищенні якості і технічного рівня. Однак, зміни і нововведення, які стосуються вдосконалення зубофрезерних верстатів не відповідають цим вимогам, оскільки з підвищенням їх технічного рівня та якості ціни на зубооброблювальне обладнання неухильно зростають.

Крім того, у розвитку цієї групи верстатів присутні також інші негативні тенденції – збільшення маси та енерговитратності. Як відомо, еволюція усіх без винятку машин йде шляхом зменшення їх матеріалоємкості та скорочення співвідношення між масою і певними експлуатаційними показниками, або показниками ефективності функціонування. В той же час підвищення жорсткості та вібростійкості сучасних зуборізних верстатах досягають збільшенням їх маси. Показовий приклад цього - зубохонінгувальні верстати мод. Synchro Fine («Prawema») і мод. K-300 («Fässler»), усі вузли яких змонтовано на гранітних основах. У простіших випадках основи для підвищення протидії вібраціям станин наповнюють бетоном.

Одночасно зі збільшенням матеріалоємності виробники зубообробного обладнання збільшують потужність головного приводу до 1,8 - 2,8 кВт на одиницю модуля зубчастих коліс. Зростання енергооснащеності цих верстатів веде до розриву між ефективною потужністю різання та потужністю приводу, внаслідок чого обладнання виявляється недовантаженими, а технологічні процеси зубообробки – занадто енерговитратними.

Аналіз літературних джерел та постановка задачі досліджень. Змінити таке становище в галузі зубооброблювального обладнання можна на основі нової схеми різання, що закладена в радіально-коловому способі зубонарізання з мультиплікатором на осі інструменту. Суть цього способу полягає у виготовленні зубчастих поверхонь дисковим інструментом – тонкою відрізною фрезою при неперервному обкочуванні, як це є у черв'ячному зубофрезеруванні та на аналогічному обладнанні. Проте, на відміну від черв'ячної фрези, яка повинна мати той же модуль, що й нарізувані нею зубчасті колеса, одну дискову фрезу можна використовувати для широкого діапазону модулів шляхом зміни ексцентриситету при її установці, тому цей спосіб є високоефективним, матеріало- та ресурсощадним [1-3].

Ще більше розширює можливості даного способу роз'єднання кінематичного зв'язку між головним та допоміжними кінематичними рухами. Вперше ідея розривання кінематичного зв'язку між обертанням інструменту і рухом обкочування для зубообробки запропонована

І.А.Когановим та розроблена для горизонтально-фрезерного верстата [4]. З допомогою механічної системи, утвореної на базі цього верстата забезпечується вирізання впадини між зубцями дисковою головкою, яка споряджена різцями з пластинами з твердого сплаву. Горизонтально - фрезерний верстат модернізують так, щоб забезпечити привід обертання заготовки зубчастого колеса на столі верстата. Столу додатково надають періодичний зворотно-поступальний поперечний рух, який забезпечується механічним слідкуючим пристроєм та відтворює рух копіру у впадині зубчастого колеса по двох еталонних колесах того ж модуля і числа зубців. Профільювання здійснюється на повну висоту зубця фрезою, встановленою в горизонтальному шпинделі, при цьому осьова, або радіальна подача не передбачені. Загалом, дана механічна система працює за багаточисельними кулачками-копірами, є складною та громіздкою.

У наш час ця ідея реалізовані як «контурне оброблення» на горизонтальному оброблювальному центрі з використанням сучасного програмного забезпечення [5-12] (рис. 1).

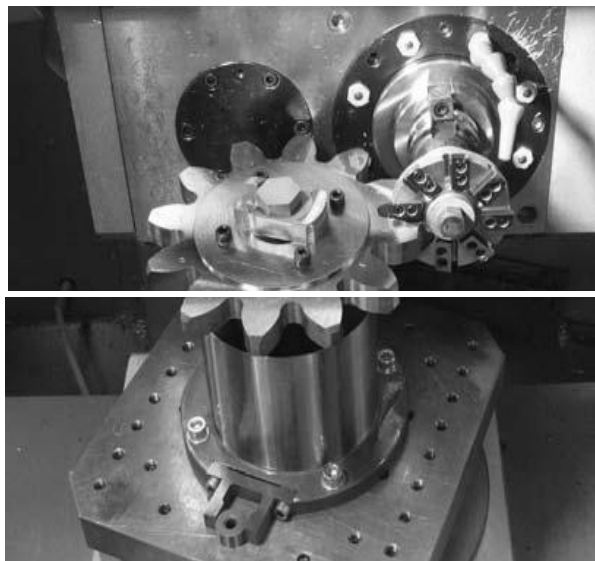


Рисунок 1 – Нарізання зубчастого колеса на горизонтальному фрезерному верстаті з ЧПК за методом контурного оброблення

Проте, необхідність багатокоординатних верстатів з ЧПК, на що розрахований цей метод, обмежує його використання лише одиничним виробництвом зубчастих коліс, оскільки експлуатувати настільки дороге та

універсальне обладнання для вищих типів виробництва вузького класу деталей економічно недоцільно. Крім того, контурне фрезерування поширюється лише на прямозубі колеса, при цьому основний час операції на ОЦ при тих же режимах різання, що й для черв'ячного зубофрезерування у 20-100 разів більший [6].

Мета і задачі досліджень.

Метою досліджень є підвищення ефективності зубофрезерного обладнання на основі нової концепції зубофрезерного верстату з керованими приводами.

Задачі досліджень:

- проаналізувати особливості використання радіально-колового способу зубофрезерування та виявити його переваги порівняно з відомими методами;
- розробити концепцію побудови та принципову схему зубофрезерного верстату на основі РК-способу формоутворення та різання;
- обґрунтувати переваги зубофрезерного верстата на запропонованій концепції.

Виклад основного матеріалу.

1. Переваги РК-способу.

На відміну від контурної обробки на багатокординатному фрезерному верстаті, РК- спосіб має значно вищу гнучкість і ширші технологічні можливості, які полягають у наступному:

- для його реалізації не потрібно дорогого та високоавтоматизованого обладнання з ЧПК, оскільки він базується на звичайному зубофрезерному обкочувальному верстаті;
- дає змогу нарізати і прямозубі і косозубі колеса;
- може бути використаний для будь-якої партії зубчастих коліс та в усіх типах виробництва;
- застосування тонкої дискової фрези дозволяє виготовляти колеса не лише з прямолінійними, але й з гвинтовими зубцями (рис.2).
- введення мультиплікатора на осі дискової фрези (рис.3), який може бути одноступеневим з передавальним числом 3, або двоступеневим, з передавальним числом до 9, дає змогу збільшити продуктивність процесу, відповідно, у 3-9 разів.

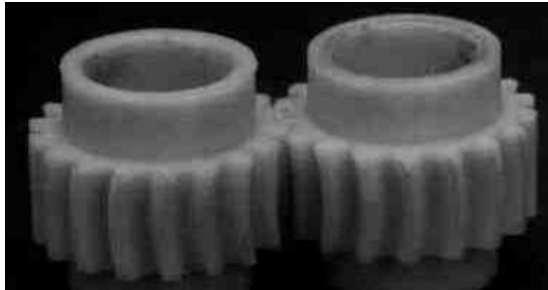


Рисунок 2 – Циліндричні колеса з гвинтовими зубцями, нарізані РК-способом

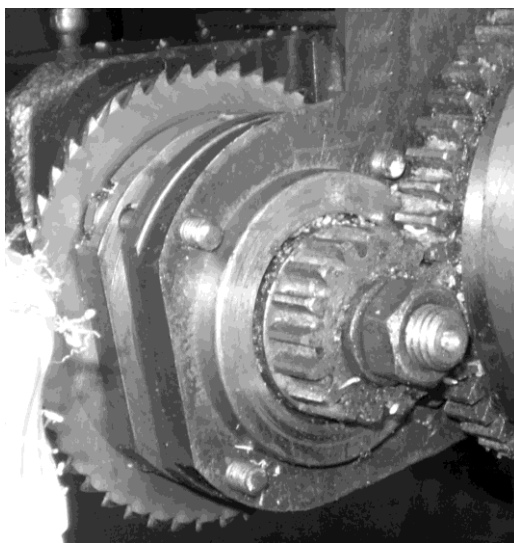


Рисунок 3 – Одноступеневим мультиплікатором зубофрезерного верстату в процесі зубонарізання РК-способом з, $i = 3$

2. Особливості радіально-колового способі зубофрезерування, на яких базується ідея кінематики і будови зубофрезерного верстата.

1. Внаслідок роз'єднання кінематичного зв'язку між рухами різання і формоутворення виникає можливість усунути усі кінематичні пари, зубчасті колеса, вали, підшипникові вузли та інші елементи, які вносять власні відхилення у сумарну похибку нарізуваного колеса в серійних зубофрезерних верстатах.

2. Різання дисковою фрезою, як і у випадку черв'ячної фрези є багатозубчастим, проте зубці дискової фрези розташовані в одній площині – радіальній площині інструменту, а їх кількість у багато разів більша, ніж відповідна кількість зубців на діаметрі черв'ячної фрези. Так, для дискової

фрези число зубців може бути рівним 60-100, а у черв'ячної фрези воно становить 10 (максимально -16, якщо верстат допускає значне збільшення зовнішнього діаметра фрези). Внаслідок цього силове поле дискової фрези є плоским, в той час, як у черв'ячної фрези воно об'ємне [13]. Збільшення кількості різальних елементів в РК-способі рівнозначне багатократному зменшенню сили різання, а вузько спрямоване силове поле означає зменшення бокових навантажень, що в підсумку призводить до істотного підвищення точності нарізання зубчастих коліс.

3. За умови збільшення частоти обертання дискової фрези при обробці однієї впадини у декілька разів, вказані вище силові фактори зводяться до мінімуму, а їх вплив на точність практично нівелюється.

4. Дослідження параметрів зрізів та сили різання показало, що при збереженні закону обкочувального руху черв'ячної фрези: поворот колеса на кутовий крок- один оберт дискової фрези в РК-способі теж присутня певна нерівномірність сили різання в одній впадині, а максимум сили різання припадає на середини висот лівих і правих профілів [14]. Разом з тим, перехід до модифікованої схеми різання та збільшення у 3-4 рази кількості обертів фрези теж зводить до мінімуму нерівномірність різання. Враховуючи цю обставину одночасно з істотним зменшенням сили зубофрезерування, процес різання в РК_способі відбувається плавно, без ударних навантажень.

3. Кінематична схема зубофрезерного верстата, скомп'юнованого на основі радіально-колового способу.

На рис. наведено принципову компоновальну схему зубофрезерного верстата, в якій враховано викладені вище положення. Періодичне зворотно-поступальне осьове переміщення дискової фрези з зубцевою частотою здійснюється з допомогою власного крокового двигуна. Рух інструментальної каретки скеровується і забезпечується парою «шліцевий вал – втулка». Можна використати також серійні напрямні з двома валиками на напрямних втулках з кульовими опорами, або втулках із бронзи (рис.4).

Обертання дисковій фрезі надається від власного приводу – серводвигуна, розташованого співвісно з інструментальним валом і керованого контролером, комп'ютером (в експериментальних

дослідженнях), або системою ЧПК. Вибір частоти обертів фрези залежить від матеріалу зубців і її діаметру та розраховується на основі моделі точності і якості зубчастих поверхонь, які утворюються з допомогою РК_способу.

Керування частотою зворотних ходів і величиною ходу осевого переміщення штока з фрезою також здійснюється від контролера, комп'ютера, або системою ЧПК. Одночасне числове програмне керування по двох осях – швидкістю різання і швидкістю осевого переміщення фрези дозволяє нарізати зубчасті поверхні будь-яких профілів – евольвентних, зачеплення Новикова, аркових та ін.

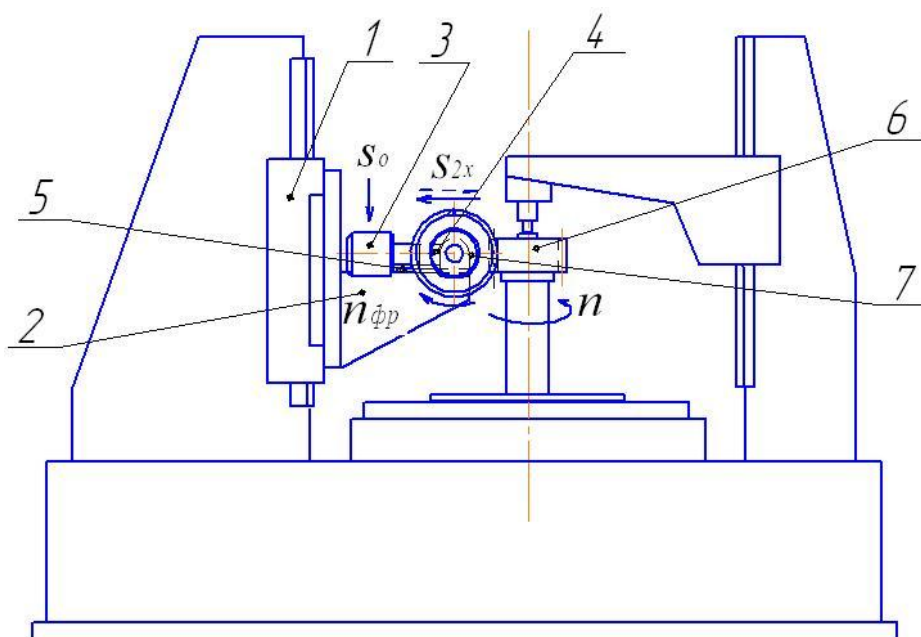


Рисунок 4 – Будова зуборезного верстату з керованими приводами на основі РК-способу

Рух колової подачі - обертання заготовки зубчастого колеса зі столом може здійснюватися від одного приводу – асинхронного двигуна і черв'ячної передачі. Цей рух відбувається з однією частотою для усіх нарізуваних коліс, а адаптація процесу до заготовки відбувається програмуванням рухів фрези – швидкості різання та швидкості осевого зворотно-поступального переміщення супорта.

Для забезпечення осевої подачі теж можна використати черв'ячну передачу з власним приводом. Тангенційне переміщення супорта при нарізанні косозубчастих коліс можна реалізувати з допомогою серводвигуна.

Висновки. Запропонована концепція зубофрезерного верстата на основі радіально-колового способу зубонарізання дає змогу:

1 – значно спростити конструкцію верстата на основі відмови від більшості кінематичних ланцюгів –головного руху, ділення і обкочування;

2 – істотно зменшити його масу внаслідок багатократного скорочення сили різання та практичного усунення динамічних навантажень;

3 – значно зменшити споживану потужність як результат зменшення сили різання і втрат потужності, які мають місце в традиційному обладнанні внаслідок тертя в кінематичних ланках;

4 – зменшення ціни зубофрезерних верстатів внаслідок запропонованих ідей супроводиться значним підвищенням їх продуктивності за рахунок збільшення швидкості різання, яка відповідає умовам роботи сучасних інструментальних матеріалів, а також підвищення осьової подачі у 5-10 разів.

Список використаних джерел: 1. Грицай І.Є., Благут Е.Н. Зубчатые передачи и технологии их изготовления: новое в традиционном. – Оборудование и инструмент: Международный информационно-технический журнал. – №2 (61) 2005. – С.36-40. 2. Литвиняк Я.М., Грицай І.Є., Махоркін Є.М. Підвищення технологічної гнучкості операцій формоутворення зубців циліндричних зубчастих коліс в автоматизованому виробництві // Автоматизація виробничих процесів у машинобуд. та приладобудув. Укр. міжвідомчий наук.-технічн. збірник. Львів.: Вид-во НУ “Лівівськ. політехіка”. Випуск №42. – 2008. С.157-163. 3. Грицай І.Є., Литвиняк Я.М. Синусоїдальні зубчасті передачі як альтернатива традиційним передачам та новий метод їх виготовлення. Зб.: Вісник Національного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». Х5арків: НТУ «ХПІ». – 2009, №19. – 168 с. – с. 4. Коганов І.А. Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей. – Тула: Приокское книжн. из-во, 1970. – 180 с. 5. Формоутворення зубчастих коліс різних класів вихідними дисковими формоутворювальними тілами / А.Кривошея, Ю.Данильченко та ін.: 8-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. - Тези доповідей. – 23-25 травня 2007 р., Львів. – С.101 6. Пастернак С.І. Економічне обґрунтування методу контурної обробки деталей з періодичними профілями дисковим інструментом / Пастернак С.І., Данильченко Ю.М., Сторчак М.Г., Кривошея А.В. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Проблемы механичного приводу №19 – Вестник НТУ "ХПИ", 2009. С. 118-126. 7. Пастернак С.І. Силові характеристики контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом / Пастернак С.І., Данильченко Ю.М.,

Сторчак М.Г., Кривошея А.В. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Проблемы механичного приво́ду №28 – Вестник НТУ "ХПИ", 2011. **8.** Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Пастернак С.І. Математичне моделювання законів руху дискового інструменту при обробці зубчастих коліс довільного профілю. //Вестник НТУУ «КПІ», сер. Машиностроение. – 2006. – № 49. – С. 104-108. **9.** Пастернак С.І., Данильченко Ю.М. та ін. Контурна обробка зубчастих коліс з довільним профілем зубів дисковими інструментами // Матеріали доповідей Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Прогресивні напрямки розвитку машино-приладобудівних галузей та транспорту". – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2007. – С. 90-91. **10.** Данильченко Ю.М., Пастернак С.І. Продуктивність контурної обробки зубчастих ланок дисковим інструментом // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. –2008. – №53. – С. 215-225. **11.** Пастернак С.І., Данильченко Ю.М., Сторчак М.Г., Кривошея А.В. Експериментальне дослідження контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом. //Вісник Національного Технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приво́ду». – Харків: НТУ «ХПІ». 2010. - № 26. – С. 94-101. **12.** Heisel U., Pasternak S., Storchak M., Stehle T.: Jede Verzahnung mit einem Werkzeug herstellbar. *dima*. 2009. Nr. 5, 44-45. **13.** Грицай І., Свізінський В., Новицький Я. Аналіз силового поля черв'ячної фрези на основі параметрів зрізів. В кн.: 4й міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові. Тези доповідей. Львів, 19-21 травня 1999 р. С.107. **14.** Грицай І.Є., Громнюк С.І., Кук А.М. Параметри поперечного перерізу зрізів в радіально-обкочувальному способі нарізання зубчастих коліс з осьовою подачею. Вісник НУ "Львів. політехніка» Оптимізація виробничих процесів і техн. контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – № 772. – Львів. - Вид-во НУ "Львів. політехніка". – 2014. – С.8-14.

Bibliography (transliterated): **1.** Gricaj I.E., Blagut E.N. Zubchatye peredachi i tehnologii ih izgotovlenija: novoe v tradicionnom. – Oborudovanie i instrument: Mezhdunarodnyj informacionno-tehnicheskij zhurnal. – №2 (61) 2005. – S.36-40. **2.** Litvinjak Ja.M., Gricaj I.E., Mahorkin Є.M. Pidvishhennja tehnologichnoї gnuchkosti operacij formoutvorennya zubciv cilindrichnih zubchastih kolis v avtomatizovanomu virobničtvi // Avtomatizacija virobničih procesiv u mashinobud. ta priladobuduv. Ukr. mizhvidomchij nauk.-tehnichn. zbirnik. L'viv.: Vid-vo NU "Livivs'. politehika". Vipusk №42. – 2008. – S.157-163. **3.** Gricaj I.E., Litvinjak Ja.M. Sinusoїdal'ni zubchasti peredachi jak al'ternativa tradicijnim peredacham ta novij metod ih vigotvlennja. Zb.: Visnik Nacional'nogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». Zbirnik naukovih prac'. Tematičnij vipusk «Problemi mehanichnogo privodu». H5arkiv: NTU «HPI». – 2009, №19. – 168 s. – s. **4.** Koganov I. A. Progressivnaja obrabotka zubchatyh profilej i fasonnyh poverhnostej. – Tula: Priokskoe knizhn. iz-vo, 1970. – 180 s. **5.** Formoutvorennya zubchastih kolis riznih klasiv

vihidnimi diskovimi formoutvorjuval'nimi tilami / A.Krivosheja, Ju.Danil'chenko ta in.: 8-j mizhnarodnij simpozium ukraïns'kih inzheneriv-mehanikiv u L'vovi. – Tezi dopovidej. – 23-25 travnja 2007 r., L'viv. – S.101

6. Pasternak S.I. Ekonomichne obruntuvannja metodu konturnoi obrobki detalej z periodichnimi profiljami diskovim instrumentom / Pasternak S.I., Danil'chenko Ju.M., Storchak M.G., Krivosheja A.V. // Sbornik nauchnyh trudov "Vestnik NTU "HPI" : Problemi mehanichnogo privodu №19 - Vestnik NTU "HPI", 2009. S.118-126.]

7. Pasternak S.I. Silovi karakteristiki konturnoi obrobki cilindrichnih zubchastih kolis diskovim instrumentom / Pasternak S.I., Danil'chenko Ju.M., Storchak M.G., Krivosheja A.V. // Sbornik nauchnyh trudov "Vestnik NTU "HPI" : Problemi mehanichnogo privodu №28 - Vestnik NTU "HPI", 2011.

8. Danil'chenko Ju.M., Krivosheja A.V., Pasternak S.I. Matematichne modeljuvannja zakoniv ruhu diskovogo instrumentu pri obrobci zubchastih kolis dovil'nogo profilju. //Vestnik NTUU «KPI», ser. Mashinostroenie. – 2006. – № 49. – S. 104-108.

9. Pasternak S.I., Danil'chenko Ju.M. ta in. Konturna obrobka zubchastih kolis z dovil'nim profilem zubiv diskovimi instrumentami // Materiali dopovidej Mizhnarodnoi naukovo-tehnicnoi konferencii studentiv, aspirantiv i molodih vchenih "Progresivni naprjamki rozvitku mashino-priladobudivnih galuzej ta transportu". – Sevastopol': V-vo SevNTU, 2007. – S. 90-91.

10. Danil'chenko Ju.M., Pasternak S.I. Produktivnist' konturnoi obrobki zubchastih lanok diskovim instrumentom // Vestnik Nacional'nogo tehniceskogo universiteta Ukrainy "Kievskij politehniceskij institut". Mashinostroenie. –2008. – №53. – S. 215-225.

11. Pasternak S.I., Danil'chenko Ju.M., Storchak M.G., Krivosheja A.V. Eksperimental'ne doslidzhennja konturnoi obrobki cilindrichnih zubchastih kolis diskovim instrumentom. //Visnik Nacional'nogo Tehnicnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Tematicnij vipusk «Problemi mehanichnogo privodu». – Harkiv: NTU «HPI». 2010. – № 26. – S. 94-101.

12. Heisel U., Pasternak S., Storchak M., Stehle T.: Jede Verzahnung mit einem Werkzeug herstellbar. dima. 2009. Nr. 5, 44-45.

13. Gricaj I., Svizins'kij V., Novic'kij Ja. Analiz silovogo polja cherv'jachnoi frezi na osnovi parametriv zriziv. V kn.: 4j mizhnarodnij simpozium ukraïns'kih inzheneriv-mehanikiv u L'vovi. Tezi dopovidej. L'viv, 19-21 travnja 1999 r. S.107.

14. Gricaj I.C., Gromnjuk S.I., Kuk A.M. Parametri poperechnogo pererizu zriziv v radial'no-obkochuval'nomu sposobi narizannja zubchastih kolis z os'ovoju podacheju. Visnik NU "L'viv. politehnika» Optimizacija virobnichih procesiv i tehn. kontrol' u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni. – № 772. – L'viv. Vid-vo NU "L'viv. politehnika". – 2014. – S.8-14.