

Список литературы: 1. ГОСТ 16530-70. Передачи зубчатые. Термины, определения и обозначения. – М.: Изд-во стандартов. – 1971. – 70с. 2. Грибанов В.М., Клипаков Н.В. и др. Качественные показатели зубчатых гиперболических передач Новикова внешнего зацепления, нарезаемых цилиндрическими косозубыми долбяками // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – 2002. – №10. – Том 4. – С.77-86. 3. Грибанов В.М. Теория гиперболических зубчатых передач. – Луганск: Изд-во Восточноукр. нац. ун-та им. В. Даля, 2003. – 272с. 4. Журавлев Г.А., Иофис Р.Б. Гипоидные передачи. Проблемы и развитие. – Ростов-на-Дону: Северо-Кавказ. науч. Центр высшей школы, Изд-во РГУ, 1978. – 147с. 5. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584с. 6. Мединцева Ю.В., Хмеловский Т.Г. Многокритериальный синтез исходного контура гипоидной зубчатой передачи Новикова // Вестник национального технического университета "ХПИ". – 2005. – №40. – С.187-195. 7. Мерцалов Н.И. Зубчатая передача между непересекающимися осями. – М.: Госмашметиздат, 1932. – 208с. 8. Писманик К.М. Гипоидные передачи. – М.: Машиностроение, 1964. – 227с. 9. Проектирование зубчатых конических и гипоидных передач. Инструкционные материалы фирмы "Глиссон" (США). – М.: Машгиз, 1963. – 274с. 10. Сопrotивление материалов: Учебник для вузов / Под общ. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Вища Школа. Головное изд-во, 1979. – 696с. 11. Stribek. Versuche mit Schneckengetriebe, Z. – VDI, 1897. -936s. 12. Strübler. Z. für Math. Und Physik. – В.60. – 1911.

Поступила в редколлегию 11.04.11

УДК 62-233.3+621.833

І.Є. ГРИЦАЙ, д.т.н., проф., зав. кафедри ТМБ НУ "Львівська Політехніка"
В.І. ВІЛЬШАНЕЦЬКИЙ, аспірант каф. ТМБ НУ "Львівська Політехніка"

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС НА ОСНОВІ НОВОГО МЕТОДУ ЗУБОНАРИЗАННЯ

Розглянуто нові способи виготовлення синусоїдальних зубчастих коліс, в основі яких – використання для формоутворення тонкої дискової (відрізної) багатозубчастої фрези. Розроблена порівняльна характеристика з найбільш застосовуваним методом виготовлення евольвентних коліс. Проведене співставлення евольвентних і синусоїдальних профілів.

Рассмотрены новые способы изготовления синусоидальных зубчатых колес, в основе которых – использование для формообразования тонкой дисковой (отрезной) многозубой фрезы. Разработана сравнительная характеристика с наиболее применяемым методом изготовления эвольвентных колес. Проведено сопоставление эвольвентных и синусоидальных профилей.

A new ways of making sinusoidal gears which are based on using for forming a thin disk (cutting) many pronged mills was considered. Comparative characteristic was developed by the most used method of manufacturing evolvent gear wheels. Comparison of sinusoidal and evolvent gears profiles was held.

Актуальність задачі. Зубчасті коліс є невід'ємними деталями сучасних машин, що на найближчу перспективу у більшості галузей застосування не мають альтернативи. Вони становлять багаточисельну групу деталей серед-

ньої складності і працездатності, які виготовляють значними річними обсягами в усіх галузях машинобудування.

Серед великої різноманітності цих передач найбільшого застосування набули евольвентні передачі і евольвентне зачеплення. Порівняно з іншими видами передач (циклоїдними, арковими, зачепленням Новикова та ін.) евольвентні зубчасті передачі є найуніверсальнішими і найширше освоєними.

У технології виготовлення редукторів і коробок швидкостей операції нарізання зубців є найбільш складними і працездатними. Загалом, на виготовлення зубчастих коліс припадає 10-12% загальної працездатності машин, а за окремими групами обладнання та з врахуванням виробництва запасних частин – до 35-40%.

Основним методом попереднього прорізання впадин та півчистої обробки зубчастих коліс модулем 1-25мм є зубофрезерування модульними черв'ячними фрезами; протягом тривалого часу його використовують також для чистої обробки загартованих зубчастих коліс замість шліфування. Показником цього стану є факт, що більше половини парку зубонарізних верстатів складають зубофрезерні верстати, що працюють в умовах обкочування [1].

Черв'ячні фрези належать до найскладніших у виготовленні та найбільш вартісних різальних інструментів, які потребують також значних затрат на переагострення за повний період стійкості. За даними [2], витрати на зубонарізний інструмент виносять не менш, ніж 50% собівартості усього процесу зубообробки. а на собівартість зубонарізання припадає 50-60% витрат на механічну обробку зубчастих коліс.

Процесам нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами належить ключове місце у технології виготовлення цих деталей. Продуктивність, якої досягають на вказаних операціях визначає продуктивність технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс загалом; витрати засобів та часу зубофрезерування становлять основну частку затрат на їх механічну обробку, а точність виготовлення коліс та експлуатаційна якість передач залежить від точності, якої досягають на операціях попереднього зубонарізання.

Історія цього методу налічує понад півтора століття. Протягом цього часу неперервно удосконалювалися процес, обладнання та інструменти. Піку свого розвитку метод обкочувального зубофрезерування черв'ячними фрезами набув у наш час, коли його технологія базується на засадах високошвидкісного різання, її реалізують на зубофрезерних верстатах з укороченими кінематичними ланцюгами, підвищеної жорсткості, точності і потужності (1,8-2,8кВт на модуль), які обладнані сучасними системами програмного керування багатокординатними переміщеннями робочих органів.

Проте, незважаючи на усі впровадження, прогресивні тенденції та нововведення можна стверджувати, що метод зубообробки черв'ячними фрезами не відповідає вимогам сучасного виробництва. Високу якість на операціях попереднього зубофрезерування досягають внаслідок значних зусиль та великих матеріальних витрат. Причина полягає в недоліках процесу різання черв'ячною фрезою, які не можна подолати. Черв'ячна фреза є недосконалим різальним інструментом,

а сам процес різання нею супроводиться низкою негативних явищ, а саме [3]:

- нерівномірне розподілення об'єму припуску між зубцями. При участі у формуванні впадини 10-15 зубців на гвинтовій поверхні в одному циклі осьового переміщення приблизно 50% матеріалу, що усувається, припадає на 2-3 зубці, стійкість яких регламентує час роботи фрези між переагостреннями;

- нерівномірне розподілення припуску між лезами кожного з активних зубців: більша частина припуску усувається боковими вихідними лезами, 30-35% – вершинними, а вхідні леза є найменш завантаженими. Дія обидвох чинників призводить до високої нерівномірності процесу різання, ударних навантажень і вібрацій під час обробки;

- неперервна зміна параметрів зрізів по куту повороту фрези (на гвинтовій поверхні) і на зубцях інструментальної рейки (в торцевій площині колеса і по осі фрези), внаслідок чого відбувається неперервна зміна сили різання, розподіленої між усіма різальними елементами, що створює об'ємне "силове поле", яке періодично змінюється з частотою одного оберту фрези;

- присутність невеликого різання на вершинах зубців внаслідок того, що у формоутворенні приймає участь три леза; результатом цього є збільшення елементарних сил, що діють на передніх поверхнях і сумарної сили різання;

- з сумарного потенційно можливого периметра усіх різальних лез активними є не більш, ніж 30%, внаслідок чого не використовуються повною мірою потенційні можливості цих інструментів і не виправдовуються значні витрати на їх виготовлення;

- методична похибка формоутворення, коли профіль зубця утворюється як огинаюча прямолінійних ділянок виробничої поверхні.

У 50-60-х роках минулого ст. робилися спроби "обійти" ці недоліки шляхом зміни схеми різання черв'ячної фрези. Відомі з багаточисельних джерел різноманітні фрези з прогресивними та вершиннонавантаженими схемами різання, параболічні черв'ячні фрези, фрези т.зв. "рівномірного різання", "рівного зношування", фрези з "постійною товщиною зрізів на вході" і з "постійною товщиною зрізів на виході", проте вони базувалися на хибних теоретичних положеннях про параметри зрізів, надмірній схематизації процесу різання, невірному описанні складних явищ та процесів, що супроводять зубонарізання, внаслідок чого не дали очікуваних результатів і не знайшли практичного використання.

Загалом, можна підсумувати, що черв'ячні фрези використовуються на межі їх технічних можливостей, компроміс між продуктивністю процесу, якістю обробки і витратами не відповідає вимогам сучасного виробництва, а метод черв'ячного зубофрезерування вичерпав можливості і резерви подальшого удосконалення та підвищення ефективності.

Виходом з такого становища можуть бути лише революційні рішення в технології зубонарізання. Істотного прориву у вирішенні проблем зубообробки, багатократного підвищення ефективності процесів нарізання зубчастих коліс можна досягти впровадженням принципово нової технології нарізання зубчастих коліс, який розробляється на кафедрі технології машинобудування НУ "Львівська

політехніка". Це ресурсоощадний, високоефективний, простий у технічному відношенні і універсальний метод нарізання зубчастих коліс дисковою фрезою та шліфування їх профілів дисковим абразивним кругом. зі зміщеними геометричною і кінематичною осями. Його суть, достатньо описана у багаточисельних публікаціях І. Грицяя, полягає в нарізанні зубчастого колеса на звичайному зубофрезерному верстаті з допомогою тонкої (дискової) фрези, встановленої на інструментальну оправку замість черв'ячної фрези, а процес здійснюється в умовах неперервного обкочування, як у звичайному черв'ячному зубонарізанні. Конструктивне переміщення гвинтової поверхні черв'яка в цьому методі замінено періодичним зворотньо-поступальним радіальним переміщенням фрези, яке забезпечується зміщенням її геометричної і кінематичної осей, тобто, геометричним ексцентриситетом при установці (рисунок 1).

Цей метод має найширшу з можливих універсальність, яка полягає у наступному.

1. Дає змогу одним інструментом нарізати колеса не тільки з будь-якою кількістю зубців, як черв'ячна фреза, але також будь-якого модуля, при цьому зміна величини ексцентриситету, який рівнозначний еквівалентному модулю і певному куту зачеплення, може змінюватися у широкому діапазоні безперервно. Крім цього, для даного методу відсутнє поняття "підрізання профілю", тому мінімальна кількість зубців, які можна нарізати, дорівнює 3.

2. Одним інструментом на одному зубофрезерному верстаті можна нарізати колеса практично усіх відомих типів: циліндричні, конічні, черв'ячні (в т.ч. глобоїдальні), одновінцеві і шевронні, прямо- і косозубі, з прямолінійними і гвинтовими зубцями (в т.ч. гіпоїдальні). Нарізані цим методом дослідні колеса з пластмаси показані на рисунку 2. (Як відомо, передачі з гвинтовими зубцями мають набагато вищу навантажувальну здатність і менший рівень шуму, ніж передачі з прямолінійними зубцями, проте практично не використовуються, оскільки для їх виготовлення необхідні спеціальні складні та дорогі верстати).

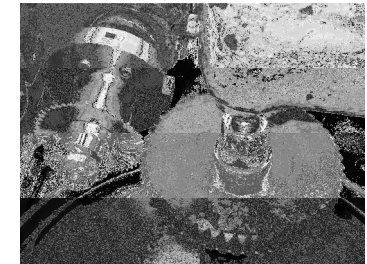


Рисунок 1 – Нарізання зубчастого колеса на зубофрезерному верстаті дисковою фрезою з ексцентриситетом

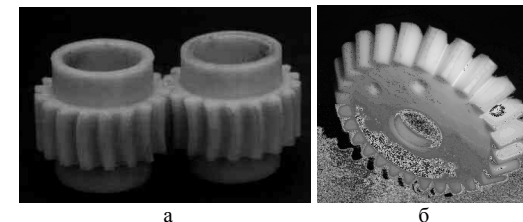


Рисунок 2 – Циліндричні колеса з гвинтовими зубцями (а) і конічне прямозубе колесо (б), нарізані дисковою фрезою на зубофрезерному верстаті

При нарізанні конічних коліс на верстаті з ЧПК формоутворення забезпечується осьовою подачею інструменту і радіальною подачею стола з заготовкою. В усіх випадках необхідне додаткове порівняно нескладне змінне технологічне спорядження.

3. Для удосконалення цього методу розроблені конструкції додаткових пристроїв, що дозволяють передати обертання від інструментального шпинделя верстата на вісь дискової фрези через додаткову передачу-мультиплікатор. Це дає змогу підвищити частоту обертання дискової фрези у 3-5 разів порівняно з черв'ячною фрезою (рисунок 3) та відповідно, підвищити швидкість різання до 180-250м/хв. На таких швидкостях вже можуть працювати інструменти з твердим сплавом, а продуктивність обробки зростає порівняно з різанням швидкохідними черв'ячними фрезами зростає в декілька разів. Зубофрезерування обкочуванням з допомогою складеної дискової фрези з зубцями з твердого сплаву показано на рисунку 4.

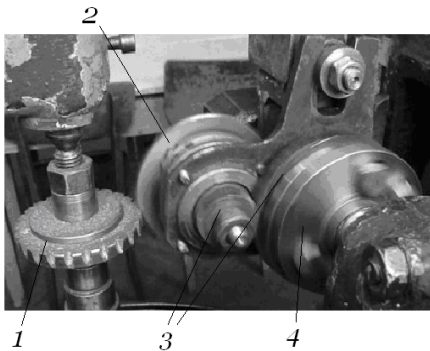


Рисунок 3 – Нарізання зубчастого колеса за допомогою мультиплікатора
1 – заготовка; 2 – інструмент; 3 – мультиплікатор; руху; 4 – механізм зворотно-поступального руху

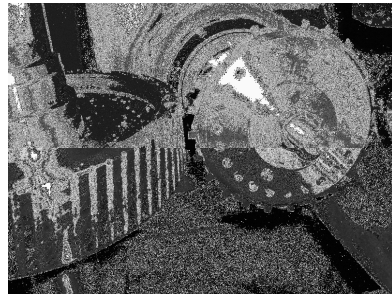


Рисунок 4 – Нарізання зубчастого колеса твердосплавною дисковою фрезою в умовах обкочування

4. Використання мультиплікатора змінює кінематику обкочувального зубофрезерування. При нарізанні зубчастих коліс черв'ячною фрезою треба виконати умову: поворот оброблюваного колеса на один кутовий крок має відповідати одному оберту черв'ячної фрези (осьовому переміщенню витка черв'ячної фрези на крок підйому гвинтової лінії).

Для дискової фрези мультиплікатор дає інше кінематичне співвідношення: поворот оброблюваного колеса на один кутовий крок відбувається при 3-5 обертах дискової фрези (рівне передавальному співвідношенню між віссю шпинделя і віссю фрези). Така зміна дає процесу зубофрезерування принципово нові якісні характеристики, зокрема, збільшує кількість зубців, що різуть. Як результат цього досягається наступне:

- розподілення припуску між більшим числом зубців, зменшення сили різання, зменшення пружних деформацій і динамічних навантажень, підви-

щення точності обробки і якості поверхонь зубців;

- можливість виконувати за тою ж схемою, на тому ж зубофрезерному верстаті і з тою ж оснасткою шліфування зубчастих коліс після їх гартування з допомогою тонкого шліфувального круга, товщина якого рівна товщині дискової фрези;

- можливість значного підвищення осьової подачі і продуктивності процесу зубооброблення;

На рисунку 5 наведено графіки, що характеризують похибку профілю зубців – огранювання, нарізаних черв'ячною фрезою (а) та дисковою фрезою обкочуванням (б), на тому ж верстаті. Величина похибки для аналогічних умов (модуль 1мм, зовнішній діаметр фрез 60мм, осьова подача 2,5мм/об) зменшується більш, ніж у 10 разів.

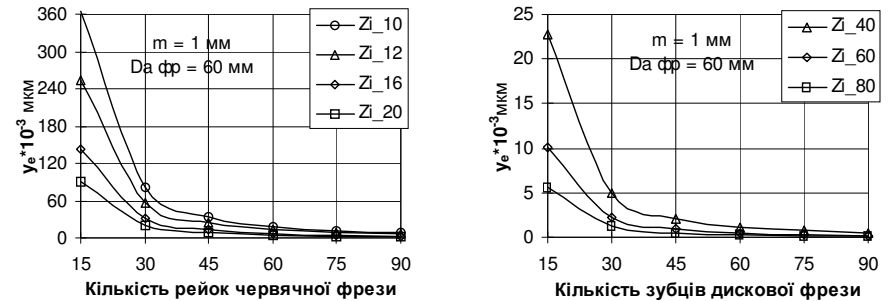


Рисунок 5

На рисунку 6 показано значення головної складової сили різання черв'ячною фрезою (а) та дисковою фрезою (б) для тих же початкових умов. Сила P_z у нашому випадку зменшується у 100 разів.

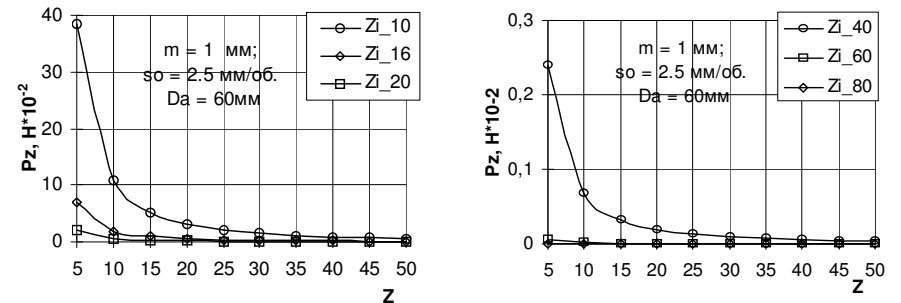


Рисунок 6

У більшості стандартних черв'ячних фрез кількість торцевих зубців (рейок) дорівнює 10 (іноді – 9). У дискової фрези ця кількість може становити от 20 до 60 (обмежується тільки розміром зубця і максимально допустимим з по робочому розміру верстата діаметром фрези). При однаковій подачі на зуб, наприклад, 0,015 мм/зуб, отримуємо:

- осьова подача черв'ячної фрези : $S_0 = 0,015 \cdot 10 = 0,15$ мм/об.;

- осьова подача дискової фрези з урахуванням передавального співвідношення: $S_0 = 0,015 \cdot (20 \dots 60) \cdot (3 \dots 5) = 1,5 \dots 4,5$ мм/об.,

тобто, можливе збільшення осьової подачі у 10–30 разів, у стільки ж разів можливе зменшення основного часу обробки.

Співставлення евольвентних і синусоїдальних профілів. Кінематика методу, який розглядається забезпечує утворення профілів, відмінних від евольвентних, а саме – синусоїдальних профілів. У цьому зв'язку виникає закономірне питання, як співставляються між собою ці профілі, чи існують умови, за яких вони можуть спрягатися і чи можливо використання змішаної передачі на основі цих зачеплень.

Для цього на основі аналітичного описання профілів отримано функцію їх різниці на куті, що відповідає куту розгорнуті евольвенти. Активна ділянка синусоїдального зубця становить $\pm 0,6a$, де a – величина ексцентриситету фрези, амплітуда коливань вісі. Встановлено, що похибка синусоїдального профілю є функцією числа зубців колеса, а в межах $20 \leq z \leq 60$ для модулів 1...6мм відхилення профілів лежить в межах від 60мкм ($m=1$ мм) до 360мкм для $m=6$ мм. Похибка на вершині зубців при максимальному куті розгорнутості евольвенти рівна:

$$\Delta = a \cdot \left[\frac{z}{\text{ctg } \alpha_\omega} + \sin(\varphi_a \cdot z) \right] \cdot \sin \alpha_\omega - R_b \cdot \text{tg } \alpha_\omega;$$

$$\varphi_a = \text{inv } \alpha_a - \text{inv } \alpha_\omega,$$

де α_ω – кут зачеплення; R_b – радіус основного кола; z – кількість зубців колеса; a – вершина точка профілю зубця.

Залежність відхилення синусоїдального профілю від евольвентного на максимальному куті розгорнутості евольвенти на лінії зачеплення в межах робочої висоти від кількості зубців колеса наведена на рисунку 7.

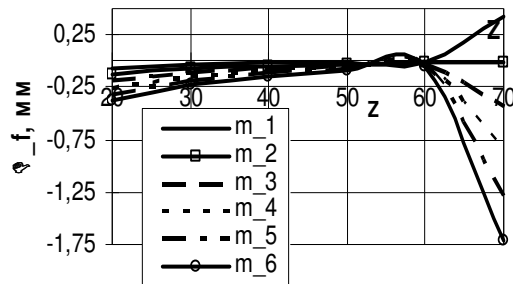


Рисунок 7 – Відхилення синусоїдального профілю від евольвентного на максимальному куті розгорнутості евольвенти в межах робочої висоти

Як видно з графіків, різниця між профілями на лінії зачеплення для кількості зубців 54 і 60 рівна нулю, в межах $z=35-60$ є незначною і різко зростає при $z>60$. Для модулів коліс 2мм і близьких до цього значення похибка профілів рівна нулю практично в усьому діапазоні кількості зубців.

Використання нового методу в процесах ремонту редукторів. Технічна простота розробленого методу нарізання синусоїдальних коліс будь-якого типу, мінімальні засоби для впровадження технології, а також наведені вище переваги нового методу в порівнянні з традиційними становлять передумову для його використання в процесах ремонту зубчастих передач.

При ремонті коробок швидкостей після їх розбирання аналізують стан усіх елементів та визначають можливість повторного використання старих деталей, їх відновлення, або повної заміни. Серед зубчастих коліс найчастіше з ладу виходять шестерні, які піддаються найбільшим навантаженням і найшвидше підлягають спрацюванню. Виготовлення нових евольвентних зубчастих коліс усталеними методами (нарізання черв'ячними фрезами, дисковими модульними фрезами тощо) ускладнено внаслідок багатьох причин. Зокрема, евольвентні зубчасті колеса механізмів найчастіше виготовляють модифікованими по профілю, ширині зубця і куту зачеплення, а для виготовлення їх повних відповідників необхідно корегувати різальні інструменти. Проте, параметри корекції після тривалого часу експлуатації редукторів невідомі. З іншого боку, навіть якщо будуть забезпечені усі вимоги до нового колеса, то не буде компенсовано збільшений зазор внаслідок спрацювання парного колеса.

Встановлено, що синусоїдальні зубчасті колеса можуть працювати в парі з евольвентними. Доведено, що в межах активної ділянки синусоїдального зубця $\pm 0,6a$ (a – ексцентриситет фрези) похибка синусоїдального профілю залежить тільки від кількості зубців колеса. В межах $20 \leq z \leq 60$ для модулів 1...6мм відхилення профілів на вершині зубців при максимальному куті розгорнутості евольвенти не перевищує 60мкм для $m=1$ мм та 360мкм для $m=6$ мм (рисунок 5).

Незначні відхилення профілів синусоїди і евольвенти дають підстави для впровадження в практику ремонту силових редукторів і коробок швидкостей гібридних синусоевольвентних передач, в яких одне з коліс евольвентне, а друге – синусоїдальне. Дослідний зразок гібридного зачеплення наведено на рисунку 8.

В розробленому методі зубонарізання можливість плавної зміни ексцентриситету в широкому діапазоні дає змогу підібрати довільне значення еквівалентного модуля синусоїдального колеса. Це значення повинно задовольняти вимогам: забезпечення заданої міжосьової віддалі, збереження передавального співвідношення між валами, а також має врахувати стан парного колеса і витримати допуск бокового зазору в передачі з урахуванням спрацювання зубців парного колеса. Значення еквівалентного модуля замінюваного колеса може не відповідати стандартному або нормалізованому ряду, наприклад дорівнювати 3,19мм або 5,78мм.



Рисунок 8 – Синусоевольвентне зачеплення

Таким чином, нова технологія дає змогу спростити процеси ремонту редукторів, а часто є єдиною можливим способом виготовлення дорогих деталей, якими є зубчасті колеса.

Висновки:

1. Традиційна технологія зубонарізання черв'ячними фрезами вичерпала резерви подальшого покращення і удосконалення.
2. Розроблено новий високоефективний метод нарізання зубчастих коліс практично усіх типів і видів, який є широкоуніверсальним, високоефективним та матеріалоощадним, він дозволяє у разі підвищити продуктивність зубонарізання, зменшити витрати і собівартість процесу зубообробки.
3. Розроблений метод створює передумови для впровадження синусоїдальних передач як таких, що мають вищі експлуатаційні властивості, в трансмісії сучасних машин та заміни у багатьох випадках традиційних евольвентних передач.
5. Метод спрощує, а в окремих випадках уможливує ремонт коробок швидкостей і редукторів на основі гібридних синусоевольвентних зубчастих передач.

Список літератури: 1. Сахаров А.З. Исследование процесса зубофрезерования косозубых колес многозаходными червячными фрезами // Прогрессивные процессы машиностроения: Межвед. сб. науч. трудов ВолгПИ. – Волгоград, 1982. – С.31-38. 2. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1972. – 368с. 3. Грицай І.Є. Теоретико-прикладні основи комплексних наукових досліджень процесу нарізання зубчастих коліс. – Львів: Сполом, 2009. – 254с.

Надійшла до редколегії 30.04.11