

І.С. ГРИЦАЙ, д.т.н., професор, зав. кафедри ТМБ НУ „Львівська політехніка”
Я.М. ЛИТВИНЯК, к.т.н., доцент. каф. ТМБ НУ „Львівська політехніка”

СИНУСОЇДАЛЬНІ ЗУБЧАСТІ ПЕРЕДАЧІ ЯК АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ ПЕРЕДАЧАМ ТА НОВИЙ МЕТОД ЇХ - ВИГОТОВЛЕННЯ

Дана характеристика синусоїдальних зубчатих колес і передач, особливості їх побудови і переваги порівняно з традиційними передачами. Описано новий універсальний висококоefficientний спосіб нарізання синусоїдальних профілів, забезпечуючий виготовлення більшості відомих типів зубчатих колес одним інструментом на одному станку.

The sine type gears and transmissions takes many advantages in the comparison with the standard transmissions. The new universal high-efficiency method of sine curve cogs cutting, providing makes the most known types of gear-wheels by one instrument on one machine-tool, is described.

Актуальність проблеми. Зубчаті колеса і передачі, як обов'язкові компоненти сучасних механізмів і машин, належать до найпоширеніших деталей машинобудування, які виготовляють великими обсягами незважаючи на те, що протягом останнього часу галузь їх розповсюдження дещо звужилася. Зменшується використання традиційних зубчастих передач у верстатобудуванні, де є тенденція до максимального спрощення передач і скорочення кількості їх ланок. У приводах металорізальних верстатів зубчасті передачі витісняються електродвигунами, кроковими та лінійними електродвигунами, керованими мікропроцесорними системами управління верстатом, пасовими передачами для передач обертання від головного двигуна прямо на шпindel. В окремих випадках в приводах шпindelів і системах подач використовують спрощені зубчасті передачі з обмеженою кількістю зубчастих коліс. Такі нововведення дали змогу забезпечити безвібраційну і безшумну роботу шпindelів на частотах обертання 30000 – 100000 хв.⁻¹ (в окремих випадках – до 180000 хв.⁻¹), а також прискорені переміщення їх робочих елементів зі швидкістю до 100 м/хв. і прискорень до 30 м/с² навіть за великих габаритів і мас рухомих частин [1].

Проте, такі рішення можливі лише для машин, що живляться від стаціонарного джерела енергії. Тому в рухомих засобах – автомобілях, літаках, гелікоптерах, суднах, комбайнах, будівельних і гірничих машинах та ін. редуктори і короби зміни швидкостей на найближчу перспективу залишаються безальтернативними.

Особливості традиційних передач. Серед відомих зубчатих передач за застосуванням і розповсюдженням домінують евольвентні передачі, які використовують переважно в швидкісних і ділільних приводах. В порівнянні з більшістю відомих передач вони мають певні переваги, зокрема: несприйнятливність до коливання міжцентрової відстані, сталість передавального відно-

шення, можливість висотного і кутового корегування зубців; відносна технологічна універсальність, що полягає у використанні одного модульного - інструменту для нарізання коліс з різною кількістю зубців.

Разом з тим, евольвентному зачепленню, передачам і технології виготовлення зубчастих коліс властиві істотні недоліки, яких не вдалося позбутись, незважаючи на багаточисельні наукові дослідження, що були виконані за тривалий час їх використання. Ці недоліки полягають у наступному:

1. Радіус кривизни евольвентних профілів, величина якого істотно впливає на контактну міцність зубців і вантажну здатність передачі, залежить від діаметра колеса і кута зачеплення. Для передавання підвищеного навантаження потрібно збільшувати радіуси кривизни профілів зубців, чого можна досягти або збільшенням кута зачеплення, або ж збільшенням зовнішнього діаметра зубчастого колеса. Проте, корегування профілів несуттєво підвищує вантажну здатність передачі, а збільшення діаметрів зубчатих коліс призводить до збільшення габаритів трансмісії.

2. Контакт зубців в евольвентному зачепленні передачі лінійний, внаслідок чого похибки виготовленні і монтажу валів, похибки відхилення напруги зубців при виготовленні, геометричні неточності в процесі складання передач, а також пружні деформації валів і підшипникових вузлів під час роботи редукторів призводять до нерівномірного розподілення навантаження на ширині зубців і до збільшення контактних напружень.

3. Обмеження числа зубців шестерні, кількість яких без підрізання не може бути меншою ніж 17. Як наслідок, ряд передавальних відношень цієї передачі обмежений, тому лімітується значення мінімальної частоти обертання та величина вихідної потужності зубчастої передачі.

Сучасні трансмісії, які передають значні обертові моменти, працюють в умовах підвищених силових і теплових навантажень при неухильному зростанні швидкостей, тому ці недоліки погіршують експлуатаційні характеристики передач. Зокрема, при інтенсивній експлуатації і роботі на граничних режимах спостерігають підвищення рівня шуму, зниження плавності роботи тощо.

4. Точність евольвентних зубчастих передач регламентують три групи норм точності та норм бокового зазору в передачі, при чому, в кожній із норм існує значна кількість показників, що значно ускладнює технологію та ставить високі вимоги до процесів виготовлення евольвентних зубчастих коліс і передач.

5. Недоліком евольвентних зубчатих коліс і передач є значна працездатність їх виготовлення, істотні витрати матеріальних засобів для нарізання і чистової обробки зубців. Для реалізації цих процесів необхідна широка номенклатура спеціальних складних і дорогих верстатів та дорогих різальних інструментів – модульних черв'ячних фрез, шеверів, зубчастих хонів, черв'ячних або тарілчастих шліфувальних кругів тощо. Внаслідок цього - зубчасті деталі машин, верстати та пристрої для їх виробництва належать до найдорожчих, а в парку технологічного устаткування машинобудівних під-

приємств зубообробні верстати за кількістю займають друге місце після обладнання для деталей класу тіл обертання.

Відомі зубчасті передачі, в яких застосовується зачеплення Новікова, використовуються лише для важко навантажених тихохідних передач і не є альтернативою евольвентному зачепленню. Цим силовим передачам також властиві істотні недоліки. Так, вони можуть бути тільки косозубими, з шириною вінця не меншою від шести модулів; мають підвищену чутливість до монтажних перекосів і зміни міжцентрової відстані; технологічно складні: черв'ячна фреза виготовляється тільки для одного модуля. Зубчасті колеса Новікова не піддають викінчувальним методам оброблення, тому точність таких коліс невисока, а ці передачі є низькошвидкісними. Внаслідок нерівномірного розподілу навантаження по ширині вінця передача Новікова працює з більшим шумом, ніж евольвентна косозуба передача. Крім цього, у передачі Новікова навантажувальна здатність лімітується зламною міцністю зубців, тому ці колеса застосовують за відсутності перевантажень і ударних навантажень.

Нове у вирішенні проблеми. Досвід виготовлення та експлуатації зубчастих передач з різноманітними зачепленнями спонукає до створення нових видів швидкісних і силових зубчастих коліс і передач. Передачею, яка має всі підстави стати альтернативою евольвентній передачі та передачі Новікова, а у багатьох випадках замінити їх, є синусоїдальна зубчаста передача. В цій передачі профілі зубців окреслені синусоїдальними кривими. Особливості цього профілю та відмінності синусоїдального зачеплення від евольвентного можна побачити на рисунку 1, де для порівняння наведено відповідні зубчасті колеса однакових еквівалентних модулів.

Розробники цієї передачі, проф. Гавриленком В.А. та інж. Анікіним С.В. підтвердили задовільний коефіцієнт перекриття і збереження основного закону зачеплення – постійності передавального відношення та виявили такі переваги синусоїдального зачеплення перед евольвентним зачепленням [2]:

- нижча швидкість удару в зачепленні, і, як наслідок, значно нижчий (на 4 – 6 децибелі) рівень шуму;
- нижчий питомий тиск на поверхнях зубців, які перебувають в контакті;
- нульове значення коефіцієнта ковзання в полюсі та в крайніх точках активного профілю, що зумовлює збільшення зносостійкості зубців.

Крім цього, будова синусоїдальних зубців і умови їх контакту в зачепленні зумовлюють такі переваги синусоїдальної передачі над евольвентною.

1. Ніжка синусоїдального зубця окреслена синусоїдою, яка відіграє роль галтелі, внаслідок чого значно зменшується концентрація напружень в основі зубця. Товщина синусоїдальних зубців від головки зубця до його западин монотонно збільшується, чим забезпечується вища міцність синусоїдальних зубців на згин. Завдяки цьому синусоїдальна передача в 1,5 – 2,0 рази має більшу вантажну здатність, тобто здатність до передачі більших обертових моментів. При передачі однакової потужності синусоїдальні колеса можуть мати в

1,5 рази менший модуль, ніж евольвентні. Тому механізми, редуктори, коробки передач та інші складові синусоїдальних трансмісій на 20 – 30% можуть мати менші габарити, а отже, меншу масу, та менші витрати у виготовленні. В той же час, при однакових з евольвентною передачею габаритах та модулем, синусоїдальна передача може передати більшу потужність.

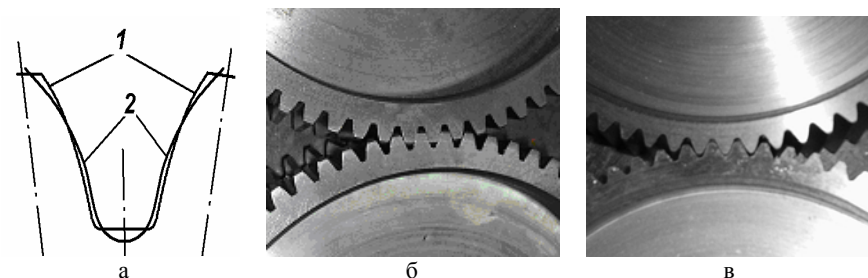


Рисунок 1 – Схема евольвентного (1) і синусоїдального (2) профілів, (а) евольвентне (б) і синусоїдальне (в) зубчасті колеса однакового модуля ($m = 4,5$ мм)

2. В синусоїдальній передачі на всій довжині лінії контакту випукла поверхня одного зубця взаємодіє з ввігнутою поверхнею спряженого профілю. Плавне переспряження зубців, при якому у передачі взаємодія робочих поверхонь відбувається не по лінії, як це спостерігається в евольвентному зачепленні, а по поверхні, призводить до зменшення контактних напружень. Як наслідок – збільшується вантажна здатність передачі, зменшується тиск і контактне тертя. Внаслідок цього синусоїдальна передача має вищу зносостійкість та кращу експлуатаційну якість.

3. При однакових з евольвентною передачею габаритах і меншому модулі синусоїдальна передача має більшу кількість зубців і вищий коефіцієнт торцевого перекриття, що додатково забезпечує їй підвищену навантажувальну здатність і вищу плавність роботи.

4. В синусоїдальній передачі число зубців шестерні може бути дуже малим, мінімальна кількість зубців (z_{\min}) може бути рівною 6, в той час як в евольвентній передачі $z_{\min}=17$. Це дає змогу виконувати передачі з набагато - більшим передавальним відношенням, ніж в евольвентній, та при незначних габаритах всієї конструкції. До того, навіть при малій кількості синусоїдальних зубців вони, на відміну від евольвентних, не мають підрізання, тому поняття "корегування" профілю зуба в синусоїдальному зачепленні відсутнє.

Як бачимо, синусоїдальні колеса і передачі мають ряд важливих переваг в порівнянні з традиційними евольвентними передачами. Вони поєднують в собі можливості використання як швидкісних і ділильних так і силових передач з підвищеною навантажувальною здатністю передачі більших обертових моментів і енергій.

Перешкоди промислового використанню синусоїдальних передач. У

70-х роках ХХ ст. синусоїдальні зубчасті колеса виготовляли та використовували на Московському автозаводі ім. Ліхачова. Це дозволило перевірити і підтвердити на практиці перелічені вище переваги цих передач.

В той час нарізання синусоїдальних коліс здійснювали черв'ячною фрезою з синусоїдальним початковим контуром рейки. Ця технологія не виправдала себе і виявилась неефективною через складність профілювання синусоїдальних фрез і формування їх криволінійних різальних лез, втрату початкової форми, розмірів та геометрії фрези після перешліфування. Складність у виготовленні, збереженні геометричних параметрів під час перезагострення і затилування, висока вартість виготовлення черв'ячних фрез з синусоїдальним початковим контуром стали основними перешкодами широкому впровадженню синусоїдальних передач.

Створення альтернативної технології. На кафедрі технології машинобудування Національного університету "Львівська політехніка" досліджуються способи зубонарізання синусоїдальних зубчастих коліс, які альтернативні способу зубофрезерування черв'ячними фрезами, з метою використання переваг та доведення до широкого практичного використання синусоїдальних зубчастих передач. Результати отримані на основі використання принципу отримання побудови синусоїди, як поєднання проекції зворотньо-поступального руху виробничої інструментальної поверхні при точковому контакті з обертовим рухом заготовки зубчастого колеса. Спосіб нарізання зубців, що використовує цей принцип, базується на зубофрезеруванні в умовах обкочування та неперервного ділення і реалізований на стандартному зубофрезерному верстаті. Різальним інструментом є стандартна дискова фреза, зубці якої шліфуються по вершині і по бокових поверхнях з певним профільним кутом.

Нарізання прямозубих і косозубих синусоїдальних коліс здійснюється при використанні налагодження кінематичних ланцюгів зубофрезерного верстата, аналогічних типовим налагодженням, що застосовуються для циліндричних евольвентних зубчастих коліс. Дисковій фрезі одночасно з неперервним обертовим рухом різання додатково надають зворотньо-поступове переміщення в площині, перпендикулярній до осі обертання фрези. Для цього фрезу встановлюють із зміщенням її геометричної осі відносно кінематичної осі технологічної оправки (ексцентрично). Величина ексцентриситету e пов'язана з модулем, кутом зачеплення евольвентної передачі та деякими параметрами різальної частини дискової фрези [2–8].

Схема взаємодії дискової фрези з заготовкою циліндричного зубчастого колеса у цьому методі зображена на рисунку 2. Дискова фреза, разом з рухомою інструментальною системою координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, переміщається по колу радіусом e навколо осі O , та одночасно обертається навколо осі O_1 . Точки O та O_1 в торцевій площині інструмента є проекціями осі технологічної оправки та осі інструмента.

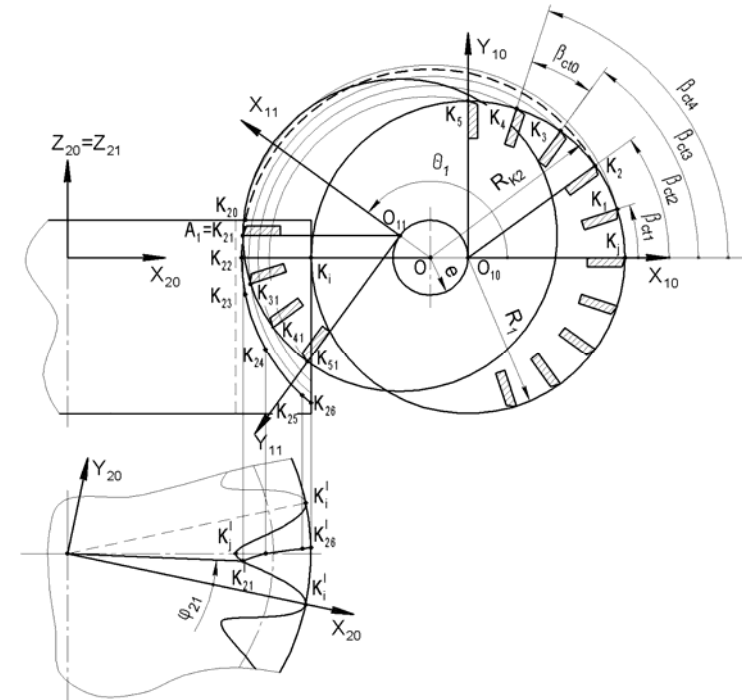


Рисунок 2 – Схема нарізання синусоїдальних зубців способом неперервного ділення при коловому русі дискового інструмента з ексцентриситетом

Кожна вершина зубця інструмента $K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_j$ в центральній торцевій площині інструмента відносно центра обертання технологічної оправки O рухається по круговій траєкторії певного радіуса. Відстані від вершини відповідного зубця до осі дискового інструмента та до осі технологічної оправки, або до точок O_1 та O – різні, тобто, $R_1 \neq R_{K_j}$. Радіуси R_{K_j} колових траєкторій вершин зубців інструмента радіуса R_1 в його торцевій площині залежать від ексцентриситету e , кутової координати першого зубця β_{ct1} , центрального кута β_{ct0} між сусідніми зубцями і порядкового номера Z_{ctj-1} зубця інструмента та визначаються за виразом $R_{K_j} = \sqrt{e^2 + R_1^2 + 2 \cdot e \cdot R_1 \cdot \cos(\beta_{ct1} + (Z_{ctj-1}) \cdot \beta_{ct0})}$.

Відносні траєкторії руху вершин кожного зубця $K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_j$ дискової фрези різні. Розрахунки показують, що профіль зубців зубчастого колеса не залежить від радіуса R_1 дискової фрези, тобто однаковий синусоїдальний профіль зубців колеса можна отримати дисковими інструментами з різним зовнішнім діаметром. Геометричні параметри зубців синусоїдальних зубчастих коліс

визначаються в основному двома факторами – ексцентриситетом e дискової фрези та ширини 2δ головного різального її ребра.

Процес нарізання синусоїдального колеса на стандартному зубофрезерному верстаті дисковою фрезою зображено на рисунку 3.

Розроблена конструкція технологічної інструментальної оправки, яка дозволяє плавно регулювати величину ексцентриситету e в достатньо широких межах (для коліс середніх модулів – в інтервалі 0,5–5 мм). Плавна зміна ексцентриситету e забезпечує отримання відповідного модуля, що дає змогу на одному зубофрезерному верстаті однією дисковою фрезою нарізати зубчасті колеса різних модулів, а зміною профільного кута фрези – нарізати колеса з певним кутом зачеплення передачі.



Рисунок 3 – Нарізання синусоїдального зубчастого колеса дисковою фрезою на універсальному зубофрезерному верстаті при неперервному обкочуванні

Використання дешевих і конструктивно простих дискових фрез замість складних і дорогих модульних черв'ячних фрез, а також заміна великої кількості черв'ячних фрез різного модуля однією дисковою фрезою і одним верстатним пристроєм дає змогу в десятки разів зменшити витрати на різальні інструменти, скоротити собівартість процесу зубонарізання і ціну зубчастих коліс.

Технологічні можливості нового методу зубонарізання. Новий метод і технологія зубонарізання набагато продуктивніший і ефективніший, ніж обробка черв'ячною фрезою. Участь більшої кількості зубців та лез в процесі різання, ніж це є в модульних черв'ячних фрезах, зумовлює високу плавність роботи і покращення динаміки процесу різання, відсутність ударних навантажень, дає можливість використовувати більшу осьову подачу і підвищити продуктивність зубообробки в 2-3 рази.

Цим методом і дисковою фрезою з певним кутом профілю можна нарізати також звичайні евольвентні зубчасті колеса, а установкою двох дискових

фрез відносно міжосьової лінії (центра заготовки) можна нарізати синусоїдальні зубці точкового зачеплення (аналогічно зачепленню Новикова).

Оскільки синусоїдальні зубці, завдяки своїй формі менше піддаються термічним деформаціям, для передач з невисокою точністю можна виключити зубошліфування. Разом з тим, оскільки форма дискового шліфувального круга та дискової фрези є ідентичні, то шліфування синусоїдальних зубчастих коліс принципово нічим не відрізняється від зубофрезерування та може виконуватися за тією ж кінематичною схемою на зубошліфувальному верстаті, який працює за методом неперервного (центроїдного) обкочування.

Універсальність розробленого нового методу підтверджується можливістю застосування для нарізання практично усіх відомих зубчастих коліс:

- шевронні колеса мають у декілька разів менший зазор між шевронами, ніж це можливо при нарізанні таких коліс черв'ячною фрезою (рисунок 4, б);
- для нарізання конічних коліс необхідні одночасно дві подачі – вертикальна подача фрези і горизонтальна подача стола з заготовкою. Синусоїдальні конічні прямозубі колеса (рисунок 4, в) по всій твірній мають однакову висоту зуба, але змінний модуль і кут зачеплення. Синусоїдальні конічні косозубі колеса нарізаються комбінуванням вертикальної і горизонтальної подачі з підключенням диференціала верстата. За своїми якісним і експлуатаційним показникам – рівнем шуму, плавністю зачеплення, навантажувальною здатністю, довговічністю ці колеса не поступають конічним евольвентним зубчастим колесам і повністю можуть їх замінити;
- синусоїдальні колеса з криволінійними (гвинтовими) зубцями, як циліндричні, так і конічні (в тому числі гіпоїдні), можна нарізати на тому ж верстаті з додатковою різцевою голівкою в обертовому пристрої, що має можливість повертатись навколо осі шпинделя на певний кут. Особливий інтерес викликають циліндричні колеса з дуговими зубцями, нарізані як нульові (форма "Зерол"), які можуть застосовуватись замість циліндричних шевронних або коліс з арковими зубцями;
- глобоїдальні черв'ячні колеса. Глобоїдальні черв'ячні передачі завдяки великому куту охоплення колеса черв'яком та підвищеній навантажувальній здатності і можливості самогальмування широко використовують у приводах підйомно-транспортних машин і механізмів, насамперед у редукторах приводу ліфтів. У порівнянні зі звичайним способом нарізання глобоїдальних черв'ячних коліс глобоїдальною черв'ячною фрезою розроблений спосіб має істотні переваги: відсутнє підрізання бокових поверхонь зубців біля вершини; відсутня залежність товщини нарізуваних зубців від повторних переточувань дискової фрези, зменшується кількість проходів; спрощується налагодження верстата. Глобоїдальне черв'ячне колесо, нарізане за допомогою даного способу відображене на рисунку 4, д.

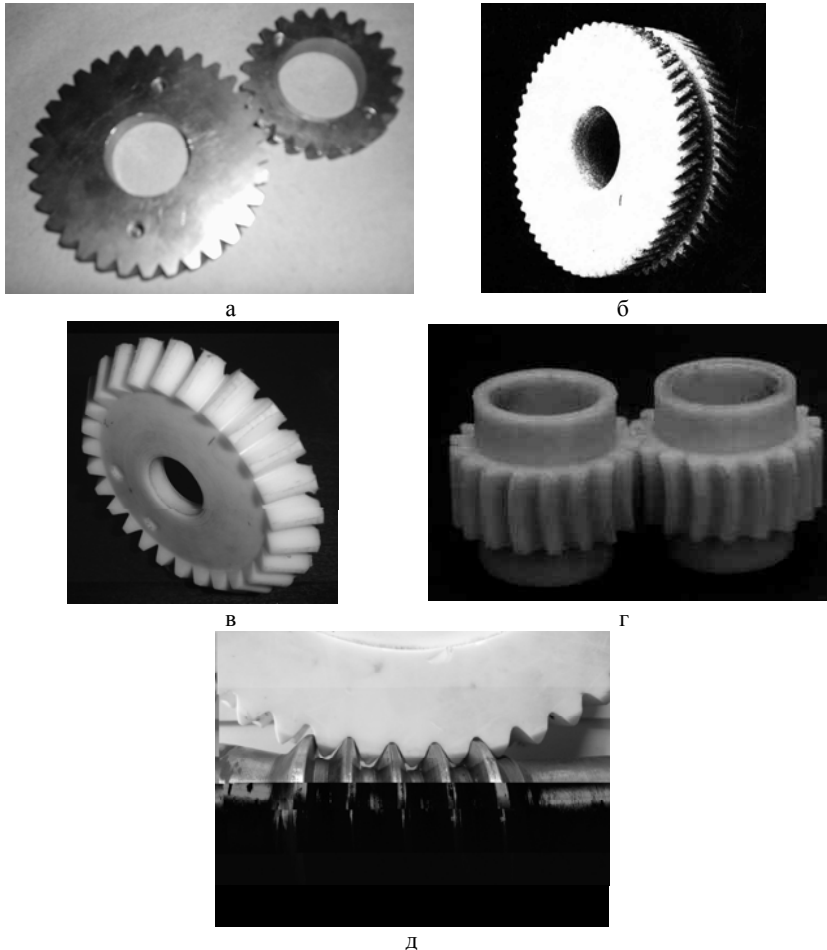


Рисунок 4 – Прямозубі циліндричні колеса (а); шевронне колесо (б); конічне колесо (в); циліндричні колеса з гвинтовими зубцями (г); глобоїдальне черв'ячне колесо (д) з синусоїдальними зубцями, що нарізані на одному зубофрезерному верстаті в умовах обточування однією дисковою фрезою

Висновки.

1. Синусоїдальні передачі порівняно з традиційними евольвентними передачами мають на 20–30% вищу вантажну здатність, на 15–18% нижчий рівень шуму, більшу працездатність і довговічність. Використання цих передач замість традиційних евольвентних дозволяє зменшити до 30% масу і габарити редукторів транспортного, автомобільного, сільськогосподарського машинобудування і підвищити їх експлуатаційну якість.

При однакових габаритах з евольвентними, синусоїдальні передачі дозволяють підвищити величину потужності, що передається приводами машин.

2. Широке використання синусоїдальних передач стало можливим завдяки новому високоефективному методу і новій технології їх нарізання. Цей метод характеризується унікальною універсальністю за технологічним обладнанням, різальним інструментом та спорядженням: дає змогу на одному стандартному зубофрезерному верстаті з допомогою однієї дискової фрези нарізати практично усі відомі типи зубчастих коліс: циліндричні, конічні, черв'ячні (у т.ч. глобоїдальні) і шевронні, прямо-і косозубчасті (у т.ч. гіпоїдні), з прямолінійними і гвинтовими зубцями як з евольвентним, так і синусоїдальним профілем. Крім того, однією дисковою фрезою можна нарізати колеса не тільки з різною кількістю зубців, але й колеса різних модулів.

3. Новий метод нарізання та чистової обробки синусоїдальних зубчастих коліс дає змогу в 1,5-2 рази підвищити продуктивність зубонарізання, скоротити потребу в дорогому спеціальному зубообробному обладнанні і інструментах, у декілька разів зменшити витрати і собівартість процесу зубообробки та відповідно ціну редукторів, коробок передач тощо. Розроблений метод створює реальні передумови для найширшого застосування синусоїдальних передач в трансмісіях сучасних машин та заміни у багатьох випадках традиційних евольвентних передач.

4. Можливість виготовляти нові глобоїдальні черв'ячні колеса на заміну спрацьованих і непридатних до подальшого використання глобоїдальних черв'ячних коліс та ремонтувати редуктори приводу ліфтів дозволяє вирішити важливу народногосподарську проблему, яка існує в житлово-комунальному господарстві України.

Список літератури: 1. Мелехов Р.К., Грицай І.С. Сучасне металорізальне обладнання з ЧПК та інструментальні системи: Навч. посібник / під ред. І.С.Грицай. – Львів: вид-во "Растр-7", 2008. – 240с. 2. Аникін Ю.В. "Синусоїдальное зацепление". – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1975. – 56с. 3. Спосіб нарізування синусоїдальних зубчастих коліс. Пат. на корисну модель №24957 // Грицай І.С., Кук А.М., Посполітак В.А., заявка № u2007 01105 від 02.02.2007, опубл. 25.07.2007, бюл. №11. 4. Спосіб нарізання циліндричних синусоїдальних зубчастих коліс. Пат. на корисну модель №24173 // Грицай І.С., Кук А.М., Франт Ю.В., заявка № u2007 00138 від 04.01.2007, опубл. 25.06.2007, бюл. №9. 5. Грицай І.С. Підвищення технічного рівня передач приладів на основі зубчастого зачеплення синусоїдального профілю // 36. Тези допов. 6-ї науково-технічної конференції "Приладобудування 2007: стан і перспективи", 24-25 квітня 2007 р., м.Київ. – С.108–109. 6. Грицай І.С., Ступницький В.В. Дослідження синусоїдальних зубчастих передач // Підприємство-транспортна техніка – 2007. – №4(24). – С.55–64. 7. Литвиняк Я.М. Закономірності формування перетинів зрізів під час нарізання прямозубих зубчастих коліс дисковим інструментом методом обточування // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні й приладобудуванні". – Львів, 2008. – №613. – С.31–38. 8. Литвиняк Я.М., Грицай І.С., Махоркін Є.М. Підвищення технологічної гнучкості операцій формування зубців циліндричних зубчастих коліс в автоматизованому виробництві // Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні. Міжгалузевий збірник наукових праць. – 2008, вип.42. – С.157–163.

Поступила в редколлегию 10.04.09