

СХІДНО-УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРКІВСЬКИЙ ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

ЯГУДІН Шаміль Сергійович

УДК 621.833

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ  
ЗУБЧАТОЇ ПЕРЕДАЧІ НОВІКОВА ДЛЗ

05.02.02 – Машинознавство та деталі  
машин

05.03.05 – Процеси та машини обробки  
тиском

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Луганськ, Харків 1993

18-1700

Робота виконана в Східно-українському державному університеті на кафедрі "Вища математика" та в Харківському Інженерно-педагогічному Інституті на кафедрі "Нарисна геометрія та графіка"

Науковий керівник - кандидат технічних наук,  
професор ПАВЛЕНКО А.В.

- доктор технічних наук,  
професор ГРИБАНОВ В.М.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,  
професор КИРИЧЕНКО А.Ф.

- кандидат технічних наук,  
доцент ГЛАДУШИН В.В.

Провідне підприємство - Луганський Інститут ДІПРОМАШ  
вуглезбагачення

Захист відбудеться *29 лютого* 1993 р. в *10* годин  
на засіданні спеціалізованої ради в Східно-українському державному університеті за адресою: 348034, м. Луганськ, квартал Молодічний, 20 а.

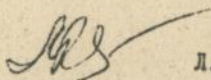
Довідки по телефону: (0642) 46-32-70.

Спеціалізована рада К 068.44.02.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотечі Східно-українського державного університету.

Автореферат розіслано *29 травня* 1993 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради,  
кандидат технічних наук



Л.А. РЯБИЧЕВА

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00753667 (Y)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. У зв'язку з широким використанням зубчатих передач в машинах та агрегатах до них ставляться високі вимоги. Ці вимоги виражаються у подальшому підвищенні вантажної можливості, збільшення ресурса, зменшення габарита.

Одним з шляхів реалізації поставлених вимог є застосування циліндричних зубчатих передач Новікова з двома лініями зчеплення (ДЛЗ). Результати промислового використання цих передач показали, що вони можуть витримати великі навантаження, а також дозволяють знижувати масу та габарити редукторів.

У даний час для передач Новікова розроблено геометричний розрахунок, розрахунки на міцність та спрацьованість. При визначенні допусків на технологічні та монтажні похибки у виготовленні передач застосовують Керівний документ (КД) по нормах точності ("Передачі Новікова зубчаті циліндричні з двома лініями зчеплення. Допуски"), розроблений в НПО НДІредуктор (м. Київ) в 1990 р. Але положення цього КД носять рекомендаційний характер та потребують подальшого уточнення, що визнають і ті, хто працює над розробкою КД та спеціалісти.

Так як похибки виготовлення є причиною підвищеного шуму, вібрації та передчасної спрацьованості при експлуатації передачі, то розробка норм точності для циліндричної передачі Новікова ДЛЗ є актуальним завданням.

Для передачі Новікова також по суті практично не розроблено і не застосовується в виробництві методи фінішної обробки (зубшліфування, конінгування, гисінгування, холодна накатка і таке інше), які, як доводить досвід виробництва експлуатації евольвентних зубчатих передач, покращують якість передачі та помітно збільшують її ресурс.

Таким чином, дослідження та розробка методики фінішної обробки циліндричної передачі Новікова ДЛЗ також є актуальним завданням.

Мета роботи - визначення шляхів підвищення точності циліндричної зубчастої передачі Новікова ДЛЗ.

Завдання дослідження - Реальна передача - носій первісних похибок  $f_{xz}$  і  $f_{yz}$  - відхилення від паралельності та перекіс осей коліс,  $T_{Hz}$  зміщення початкового контура і т.д. Первіс-

ні похибки являються причиною повторних похибок: похибка  $\Delta\alpha^{(2)}$  кута повороту колеса, похибка  $\Delta u$  передаточного відношення та похибка контакту, який проявляється в утворенні первісного зазору величиною  $\Delta$ . Очевидно, повторні похибки залежать також від значення геометричних параметрів передачі: кута  $\beta$  нахилу зуба, нормального модуля  $m_n$ , чисел  $z_1$  та  $z_2$  зуб'їв, ширини  $b_n$  зубчатого вінця, а також типу первісного контура.

Визначення норм точності (полів допусків на первісні похибки) - складна проблема, при роз'язанні якої необхідно враховувати одночасно багато факторів, в тому числі і характер залежності повторних похибок від геометричних параметрів та типу первісного контура передачі, що і являється частиною завдання дослідження.

В роботі роз'язувались також наступні завдання:

1) розробка методики вибору раціональних значень геометричних параметрів на стадії проектування передачі, яка враховує повторні похибки  $\Delta\alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$  передачі;

2) дослідження процесу вигладжування поверхонь зуб'їв колес Новікова реверсуемого черв'ячною фрезой на зубофрезерній верстаті.

Методи та методика дослідження. У роботі використано аналітичну теорію реального (з технологічними та монтажними похибками) зачеплення, розроблену у працях Л. Эйлера, Х. Тохмана, Н.Л. Чебишева, та пізніше розвинена та доповнена в працях Н.І. Колчина, Ф.Л. Литвина, Т.І. Шевельової, м.Л. Ерихова, В.М. Грибанова та інших. Вибір раціональних значень параметрів передачі Новікова здійснювалися методом ЛП-пошука (метод багатокритеріальної оптимізації), розробленого академіком І.І. Артоболевським, його учнями та співробітниками. Розрахунок ПЦД зуб'їв проводився на основі методик розрахунку пружино-пластичних деформацій, авторами яких є Ішлінський А.Д., Кудрявцев І.В., О. Нейль, Пономарьов С.Д., Дрозд М.С. та інші.

Наукова новизна. Визначені закономірності впливу геометричних параметрів передачі на величини  $\Delta\alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$  повторних похибок. Проведено порівняння перспективних первісних контурів передачі Новікова по критеріям точності, в ролі яких були розглянуті повторні похибки  $\Delta\alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$ . На основі методу багатокритеріальної оптимізації розроблена методика вибору раціональних значень геометричних параметрів передачі,

в якій за критерії якості прийняті величини повторних похибок  $\Delta\alpha^{(e)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$ . Розроблена технологічна схема обробки зубчатого колеса Новікова методом ПЦД зуб'ів.

Практична цінність та реалізація роботи. Визначення закономірностей впливу геометричних параметрів на величини повторних похибок передачі Новікова - розв'язання частини більш загальної проблеми: визначення норм точності. Методика вибору раціональних значень геометричних параметрів дозволяє априори зменшувати повторні похибки та по критерію точності вибирати найкращий первісний контур для проектувальної передачі. Обробка зубчатого колеса методом ПЦД зуб'ів збільшує ресурс передачі.

Результати роботи впроваджені в розрахункову практику ОТТ ПО верстатобудівного заводу (м. Луганськ) при оцінці кінематичної точності та плавності роботи, проєктованих зубчатих передач. Економічний ефект від впровадження складає 22060 карбованців на рік (розрахунок економічного ефекту було проведено у 1988 р.). Результати роботи по обробці зубчатих коліс Новікова методом ПЦД зуб'ів використано також на ПО Волзькорезинотехніці (м. Волзьк, Волгоградської області Російської Федерації).

Апробація роботи. Основні положення дисертації доводилися та обговорювалися на науково-технічних конференціях "Забезпечення надійності та довговічності зубчатих передач на стадії проєктування та виготовлення" (Севастополь, 1988р.), "Удосконалення методів розрахунку, конструювання та зубообробки циліндричних та конічних зубчатих, спіроїдних, гіпоїдних та черв'ячних передач" (Іжевськ, 1989 р.), "Досвід галузей машинобудування та науки дослідження - тракторобудування" (Севастополь, 1989 р.), "Досвід досліджень, проєктування, виготовлення та експлуатації зубчатих передач Новікова" (Ірмала, 1989 р.), "Зубчаті передачі: сучасність та прогрес" (Одеса, 1990 р.), "Наукові досягнення та досвід галузей машинобудування - народному господарству" (Севастополь, 1990 р.).

У повному об'ємі дисертація була доведена та схвалена на спільному засіданні кафедр "Деталі машин" та "Зв'язки математика" Луганського машинобудівного Інституту у 1991 р., на кафедрі "Нарисної геометрії та графіки" Харківського Інженерно-педагогічного Інституту у 1992 році та на кафедрі "Машини та технологія

обробки металів тиском" Луганського машинобудівного Інституту у 1993 році.

Дублікації. За темою дисертації опубліковано п'ятнадцять робіт.

Об'єм роботи. Дисертацію викладено на 239 сторінках машинописного тексту та складається з вступу, п'яти розділів та загальних висновків, має 30 рисунків, список літератури із 766 найменувань та додатки.

### Частина I. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД. МЕТА, ЗАВДАННЯ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

I.1. Проаналізовано становище проблеми нормування точності, синтезу та фінішної обробки зубчатих передач, з точечним зачепленням, розробленим вперше російським вченим М.Л. Новіковим, та розвинутим у першу чергу російськими та українськими вченими Р.В. Редякіним, В.А. Часниковим, В.М. Грибановим, Г.А. Журавльовим, К.І. Заблєнським, М.Я. Ітнісом, А.Ф. Кириченко, Н.Н. Краснощокоским, В.Н. Кудрявцевим, А.В. Павленко, В.І. Печеним, В.Н. Севрюком, В.Г. Шишовим, А.С. Яковлевим та ін.

В даний час для циліндричних передач Новікова ДЛЗ у НВО НДІ редуктор (м. Київ) використовується КД "Передачі Новікова зубчаті циліндричні з двома лініями зачеплення. Допуски". Проте, положення цього КД мають рекомендаційний характер та мають потребу в подальшому уточненні.

Синтез геометричних параметрів циліндричної передачі Новікова ДЛЗ на стадії проектування здійснюється на підставі проєктованих та перевічених розрахунків згідно з умовами зігнутої та контактної витривалості, в яких недостатньо повно враховуються похибки виготовлення та монтажу.

I.2. Досліджуванні повторні похибки  $\Delta d^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$  моделювались відрізками степеневих рядів

$$\left. \begin{aligned} \Delta d^{(2)} &= \sum_i d_i^{(2)} \cdot \varepsilon_i, \quad \Delta u = \sum_i u_i \cdot \varepsilon_i, \\ \Delta &= \sum_i (\varphi_i^{(1)} - \varphi_i^{(2)}) \cdot \varepsilon_i \end{aligned} \right\} (7)$$

в яких  $\varepsilon_i$  - величини первинних похибок. Коефіцієнти  $d_i^{(2)}$ ,  $\varphi_i^{(n)}$  (тут і далі значення  $n=1$  відноситься до шестерні, а  $n=2$  - до колеса) визначаються з рішення зворотньої задачі. Рішення зворотньої задачі визначають координати  $\varphi^{(n)}$ ,  $\psi^{(n)}$  точок контактування, кут  $U = d^{(2)}/d^{(1)}$  повороту колеса та передаточне відношення  $U = d^{(2)}/d^{(1)}$  (  $d^{(n)}$  - кут повороту шестерні в зачепленні) також в виду відрізків степеневих рядів:

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{(n)} &= \varphi_0^{(n)} + \sum_i \varphi_i^{(n)} \cdot \varepsilon_i, & \psi^{(n)} &= \psi_0^{(n)} + \sum_i \psi_i^{(n)} \cdot \varepsilon_i, \\ d^{(2)} &= d_0^{(2)} + \sum_i d_i^{(2)} \cdot \varepsilon_i, & U &= U_0 + \sum_i u_i \cdot \varepsilon_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

в яких  $\varphi_0^{(1)} = d$ ,  $\varphi_0^{(2)} = d \cdot d_1/d_2$  ( $d_n$  - діаметри діляльних циліндрів),  $\psi_0^{(1)} = \psi_0^{(2)} = d_{\kappa}$  ( $d_{\kappa}$  - кут тиску в номінальній точці контакту)

$$U_0 = d_1/d_2, \quad u_i = d d_i^{(2)}/d d^{(1)}$$

Аналіз повторних похибок (визначених по формулам (1)) як функції геометричних параметрів передачі можливий, якщо первинні похибки  $\varepsilon_i$  мають визначені значення. Як і ж? В цьому питанні, очевидно, треба шукати з найхудшого для практики варіанту, коли похибки  $\Delta d^{(2)}$ ,  $\Delta U$  та  $\Delta$  мають найбільші значення. Тому в формулах (1) при досліджуванні первинних похибок  $\varepsilon_i$  апріорі назначались такі значення (які вибирались із діючого КД по нормам точності), при яких похибки  $\Delta d^{(2)}$ ,  $\Delta U$ ,  $\Delta$  приймали найбільші значення.

Тут треба також зазначити, що 3-я рівність системи (1) визначає не фактичну величину початкового зазору передачі, а тільки величину  $\Delta$ , яка прямо пропорційна величині фактичного зазору (проведений експеримент підтвердив це припущення). Таким чином, для мети дослідження подібне моделювання первісного зазору можна считати досить справедливим.

При заданих значеннях міжосової відстані  $a_w$  передавального числа, та ширина  $b_w$  зубчатого вінця (відхилення їх від номіналу припущено у межах 1-2%), параметри  $m_n$ ,  $z_1$  можна розглядати як координати 3-х мірної

точки з простору параметрів синтезованої передачі Новікова. Величини похибок  $\Delta \alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$  можна розглядати, як критерії якості передачі. За допомогою засобу ЛП-пошуку з простору параметрів передачі можна вибрати таку точку  $(\beta, m_n, z_1)$  (або групу точок), котрій відповідають найменші значення (в сукупності) похибок  $\Delta \alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$ .

Обробку активних поверхонь зуб'їв циліндричної передачі Новікова ДЛЗ засобом ППД зуб'їв можна здійснити слідуєчим засобом. Перш ніж робити операцію зубофрезерування (методом обкатки на зубофрезерному верстаті) номінальна міжосева відстань  $a_w$  поміж осями черв'ячної фрези та заготовки збільшується на розмір  $\Delta a_w$  (припуск). Після закінчення операції зубофрезерування міжосеву відстань між осями фрези та зубчатого колеса треба зменшити на таку ж саму величину  $\Delta a_w$  припуска, та реверсувати фрезу. При цьому, очевидно, поверхні зуб'їв колеса будуть вигладжуватися затилованою частиною ріжучої кромки фрези під визначеним зусиллям, величина якого залежить від припуска  $\Delta a_w$ .

1.3. По результатам, викладених у розділах 1.1 та 1.2, робляться висновки.

1.4. Згідно викладеного у розділах 1.1 - 1.3 ставиться мета роботи: визначення шляхів підвищення точності циліндричної зубчатої передачі Новікова ДЛЗ. Формулюються завдання, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети.

## Частина 2. ОСНОВНІ АНАЛІТИЧНІ ВІДНОШЕННЯ

2.1. Розв'язання (2) зворотної задачі визначається із системи матричних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \Omega_1 P_1 \vec{r}_1 &= \Pi \Phi \Omega_2 P_2 \vec{r}_2, \\ \Omega_{01} P_{01} \vec{e}_1 &= \Pi_0 \Phi_0 \Omega_{02} P_{02} \vec{e}_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

в якій матриці  $\Omega_n$  моделюють обертання коліс в зачепленні; матриці  $P_n$  моделюють радіальне биття коліс пари; матриця  $\Phi$  моделює похибки  $f_{rx}$ ,  $f_{rz}$ ,  $f_{ax}$ ;  $\Pi$  - допоміжна матриця;  $\vec{r}_n$  - радіусвектори сполучених поверхностей зуб'їв (координати цих векторів визначаються рівняннями поверхонь

зуб'ів I в них закладена інформація про останні початкові похибки:  $(F_{0z}, \delta_{0z}, T_{0z}, F_{0x})$ ;  $E_n$  - орти нормалей поверхонь зуб'ів; матриці  $\Omega_{0n}, P_{0n}, P_0, \Phi_0$  одержуються із матриць  $\Omega_n, P_n, P$  та  $\Phi$  відповідно шляхом викреслення в них 4-ому ряді та 4-му стовпці.

Рівняння (3) в нерухомій прямокутній системі координат виражає знайому умову: в точках контакту сполучених поверхонь зуб'ів повинні збігатися їх радіус-вектори та орти нормалей.

2.2. За допомогою метода малих параметрів система рівнянь (3) замінюється на системи лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\sum_{j=1}^5 a_{kj} x_j = b_k^{(i)} \quad (4)$$

( $K = 1, 2, \dots, 5$ ;  $i$  - номер початкової похибки  $E_i$ ).  
 Із якої визначаються коефіцієнти  $\varphi_i^{(n)}, \psi_i^{(n)}, \alpha_i^{(a)}$  рішення (1) зворотньої задачі. Тут же описуються алгоритми розрахунку коефіцієнтів  $a_{kj}, b_k^{(i)}$  системи (4) та програма рішення систем рівнянь (3).

2.3. Описуються алгоритми та **FORTRAN** -програми розрахунку похибок  $\Delta \alpha^{(2)}, \Delta u$  та  $\Delta$

### Частина 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ РЕАЛЬНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ НОВІКОВА ДЛЗ

В розділах 3.1 - 3.5, 3.7, 3.8 поставлено машиний експеримент. В цьому експерименті по розроблених алгоритмах та **FORTRAN**-програмам похибки  $\Delta \alpha^{(2)}, \Delta u$  та  $\Delta$  обчислювались за допомогою ЕОМ при різних значеннях геометричних параметрів передачі та для різних типів початкових контурів. В результаті цього експерименту виявлені закономірності, які вказують на характер впливу геометричних параметрів передачі на величини  $\Delta \alpha^{(2)}, \Delta u$  та  $\Delta$  похибок. На мал. 1,2 представлена частина результатів досліджування (тут величини  $\Delta f_{xz}, \Delta \delta_{xz}, \Delta F_{0z}$ ,

$\Delta f_{xz}$  - складаючі повтормої похибки  $\Delta$ , відповідні початковим похибкам  $f_{xz}$ ,  $f_{yz}$ ,  $f_{xz}$ ,  $f_{yz}$ ).

Розділ 3.6 присвячений експериментальним дослідженням відносно повтормої похибки  $\Delta$ . В експерименті по товщині свинцевої фольги, прокочуванної між контактуючими зуб'ями передачі, визначалась фактична величина  $\delta$  початкового зазору. При обробці результатів вимірювань величини  $\delta$  була застосований метод математичної статистики. Якщо  $x_i$  - результати вимірювань та  $n$  - число вимірювань, то емпіричне середнє  $\bar{x}$  вимірювальної величини визначалось по формулі

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5)$$

а степінь розкидання результатів  $x_i$  біля  $\bar{x}$  характеризується емпіричною дисперсією  $S^2$

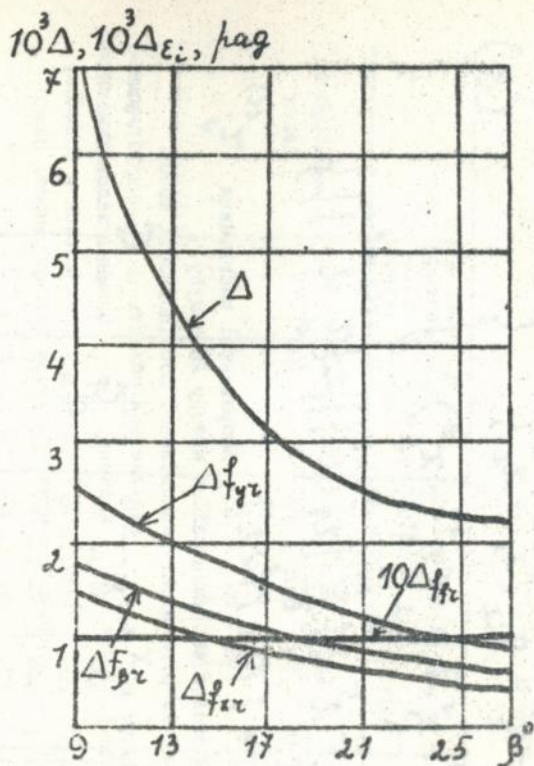
$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

Формули (5), (6) відображають реальний процес, якщо  $n \geq 25$ , а власне це мало місце в проведеному експерименті.

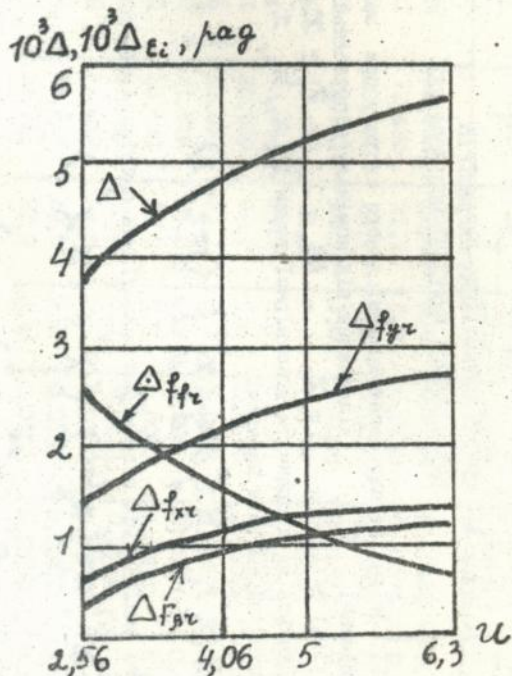
Експеримент підтвердив адекватність математичного описання початкового зазору досвідним даним (відміна теоретичних даних від експериментальних не перевищує 5%).

По результатам досліджень 3-ої частини робляться висновки. При зміні  $\beta$  від 9 до 21°  $\Delta d^{(2)}$  зберігає постійне значення, а  $\Delta u$  та  $\Delta$  зменшується відповідно на 32% та 70%. При збільшенні  $Z_1$  від 10 до 22 величини  $\Delta d^{(2)}$  та  $\Delta u$  зменшуються відповідно на 50% та 11%, а величина  $\Delta$  не залежить від  $Z_1$ . При зміні передаточного числа від 2,55 до 6,38 величини  $\Delta d^{(2)}$  та  $\Delta u$  зменшуються в середньому на 54% та 35%, а величина  $\Delta$  збільшується на 3%. Якщо  $m_n$  збільшується від 2,5 до 16 мм, величини  $\Delta d^{(2)}$  та  $\Delta u$  зменшуються відповідно на 69% та 47%, а величина  $\Delta$  зменшується на 10% (якщо  $m_n$  збільшується від 2,5 до 6,3).

При порівнянні перспективних початкових контурів встановлено, що по критерію точності  $\Delta$  найкращим являється початковий



Мал. 1. Первісний зазор та  $\mu\tau$  нахилу зуба



Мал. 2. Первісний зазор та передаточне число

контур ДЛЗ-0,7-0,15, а по критеріям  $\Delta \alpha^{(2)}$  та  $\Delta u$  - ДОСТ 15023-76.

Частина 4. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ НОВІКОВА ДЛЗ

4.1. Згідно методу багатокритеріального синтезу при заданому значенні  $\alpha_u$  (відхилення від номіналу допускається в межах 1-2%) параметри  $\beta = x_1$ ,  $m_n = x_2$ ,  $z_1 = x_3$  розглядаються як координати трьохмірної точки  $X(x_1, x_2, x_3)$  із площини параметрів передачі:

$$P = \{X(x_1, x_2, x_3) \mid x_j^* \leq x_j \leq x_j^{**}\}, \quad (j=1, 2, 3) \quad (7)$$

Із якого виділяється рівномірно розподілена послідовність точок

$$X_i(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}) \quad (2^1 \leq i \leq 2^{20}) :$$

$$\left. \begin{aligned} x_1^{(i)} &= x_1^* + \rho_{i1} (x_1^{**} - x_1^*), \\ x_2^{(i)} &= x_2^* + \rho_{i2} (x_2^{**} - x_2^*), \\ x_3^{(i)} &= x_3^* + \rho_{i3} (x_3^{**} - x_3^*) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де 
$$\rho_{ij} = \sum_{\kappa=1}^m 2^{\tau-\kappa} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \sum_{\ell=\kappa}^m [2\{i 2^{-\ell}\}] [2\{z_j^{(c)} 2^{-\ell}\}] \right\}$$

$m = 1 + [\ln i / \ln 2]$ , направляючі чисельники  $z_j^{(c)}$  табульовані в керівництвах по методу ШІ-пошуку.

Далі із рівномірно розподіленої послідовності точок  $X_1, X_2, \dots, X_n$  виділяється область  $G$  існування передачі. Точки  $X$  множини  $G$  повинні задовольняти обмеженням: 1) міжосева відстань  $\alpha_u$  змінюється в заданому діапазоні; 2) повинна виконуватися умова безперервності зацеп-

Таблиця 1

$i$	$\beta^\circ$	$Z_1$	$m_n$ , мм	$\Delta$ , мм	$\Delta d^{(2)}$ , мм	$\Delta u$
124	19,093	22,4	3,6	0,0104	0,05588	0,00047
211	12,484	21,1	3,9	0,0158	0,05574	0,00056
280	20,861	24,7	3,2	0,0095	0,05592	0,00044
532	20,113	24,1	3,4	0,0098	0,05591	0,00045
623	10,457	22,1	3,6	0,0187	0,05570	0,00060
1036	19,744	24,4	3,3	0,0101	0,05590	0,00045
1384	20,939	22,1	3,6	0,0095	0,05593	0,00043
1423	10,673	23,1	3,7	0,0183	0,05571	0,00059
1792	21,959	23,8	3,4	0,0090	0,05570	0,00040
2180	20,450	21,9	3,7	0,0097	0,05591	0,00045
2342	17,286	23,6	3,5	0,0115	0,05584	0,00049
3508	19,858	23,0	3,5	0,0100	0,05590	0,00045
3884	19,518	20,5	3,9	0,0102	0,05589	0,00044
4002	18,721	23,9	3,4	0,0106	0,05588	0,00047

Таблиця 2

	№ випробуваного зразку	$f_{\text{фр}}$ , мм	Поверхня твердість НКС після термообробки	$\bar{\chi}_{HV}$ кгс/мм <sup>2</sup>	
Необроблена колесо	1	23 ... 25	25 ... 39	260	2,24
	2	22 ... 24	24 ... 27	261	2,30
	3	24 ... 26	24 ... 27	248	2,34
	4	21 ... 23	23 ... 26	254	2,37
	5	22 ... 24	22 ... 25	245	2,30
Колесо, оброблене методом ШД	1	7 ... 9	22 ... 25	238	1,37
	2	8 ... 10	23 ... 26	252	1,39
	3	8 ... 10	24 ... 27	263	1,43
	4	9 ... 11	24 ... 27	256	1,41
	5	6 ... 8	25 ... 28	271	1,38

лення і т.п. Потім в точках  $X_i$  множини  $G$  обчислюються повторні похибки  $\Delta \alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$ . По даним обчислення одержуємо таблицю випробувань, аналіз якої дозволяє вибрати раціональні значення параметрів  $\beta$ ,  $m_n$  та  $Z_1$ , які відповідають найменші значення похибок  $\Delta \alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$  в проектуемій передачі.

В розділі 4.2 описані алгоритми, **FORTRAN**-програми розрахунку похибок  $\Delta \alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$  в точках рівномірної розподіленої послідовності  $X_1, X_2, \dots, X_n$  допустимої множини  $G$  параметрів передачі.

Приведений приклад розрахунку (табл. 1) 1-го ступеня редуктора ЩНД-400 з параметрами:  $Z_1 = 20$ ,  $Z_2 = 97$ ,  $m_n = 4$  мм,  $\beta = 16^\circ 15' 38''$ ,  $a_w = 250$  мм,  $v_w = 68$  мм, початковий контур по ГОСТ 15023-76. Найбільші значення повторних похибок при даних значеннях параметрів складають:  $\Delta \alpha^{(2)} = 0,056$  рад,  $\Delta u = 0,0009$ ,  $\Delta = 0,019059$  рад. Розрахунки методом ЛП-пошука показали, що найбільші значення повторних похибок можна зменшити до значення  $\Delta \alpha^{(2)} = 0,055$ ;  $\Delta u = 0,0004$ ;  $\Delta = 0,009$ , якщо в проектувальній передачі вибрати наступні значення параметрів:  $\beta = 21,959045^\circ$ ;  $Z_1 = 24$ ;  $m_n = 3,15$  (не змінюючи останні параметри передачі).

#### Частина 5. ОБРОБНО-ЗМІЦНУВАЧІЙ ОБРОБИТОК ЗУБ'ІВ ЗУБЧАТИХ КОЛІС З ЗАЧЕПЛЕННЯМ НОВІКОВА МЕТОДОМ ПОВЕРХНЕВОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

На початку розділу зроблено огляд існуючих технологічних схем оброблення деталей методом ПІД, показані їх переваги та недоліки.

В розділі 5.1 описана технологічна схема обробки зуб'їв коліс Новікова ДМЗ методом ПІД на зубофрезерній верстаті методом реверса черв'ячної фрези та її подачі (зменшення відстані між осями фрези та колеса на величину  $\Delta a_w$  (величина  $\Delta a_w$  і є подача фрези)).

Розділи 5.2 - 5.6 присвячені розрахунку параметрів пружно-пластичного контакту реверсуючої черв'ячної фрези та обробка зуба колеса.

Теоретичний розрахунок параметрів пружнопластичного контакту (глибина  $h$  пластичної вмятини, глибина  $h_s$  розповсюдження пластичної деформації) та режиму ППД (допускаючі значення інтенсивності впровадження Ідентора в оброблюване тіло зуба І т.д.) – складна задача не вирішена математично до кінця по цей день. Тому дослідження в цій частині опиралися на нині діючу методику, яка опробована та перевірена на експерименті (Дрозд М.С., Матлін М.М., Сідякін В.И. Інженерні розрахунки пружнопластичної контактної деформації. – М.: Машинобудування, 1986. – 224 с., ил.).

Розділи 5.7-5.9 присвячені експериментальному дослідженню процесу ППД зуб'яз коліс Новікова. В експерименті розглядалися зубчаті колеса з різними параметрами, які оброблялися методом ППД при різних режимах. При цьому контролювалися шорохуватість поверхні зуба, його поверхнева твердість та похибка профіля зуба.

Експериментальні дослідження в цій частині проводилися по методиці, яка описувалась в розділі 3.6.

В табл. 2 представлені дані дослідження, які відносяться до зубчатого колеса та черв'ячної фрези, які мають слідуєчі параметри. Зубчате колесо: початковий контур по ГОСТ 13023-76; число  $Z = 63$ ;  $m_n = 4$  мм;  $\beta = 18^\circ 11' 40''$ ,  $b_w = 40$  мм. Матеріал заготовки зубчатого колеса – штамповочна сталь марки 45. Перед операцією зубофрезерування заготовка піддавалась термічному обробленню методом поліпшення твердості до 280 НВ (зубчате колесо з такими параметрами використовується як ведуча шестерня 1-го ступеня редуктора ЦНД-400, яке випускається серійно на заводі ім. А.Я. Мархоменко в м. Луганську). Параметри черв'ячної фрези: фреза виготовлена із сталі марки Р6М5 з твердістю 63...66 НРС; модуль  $m = 4$  мм; клас точності А; кут підйома витка складає  $2^\circ 55'$ ; хід винтової стружкової канавки 4 852 мм; осьовий крок  $p = 12,583$  мм; зовнішній діаметр  $d_{a0} = 90$  мм; діляльний діаметр  $d_{m0} = 76,65$  мм; 10 стружкових канавок; передній кут становить  $0^\circ$ .

Припуск  $\Delta a_w$  фрези (зменшення номінальної відстані між осями фрези і заготовки) при обробці зубчатого колеса методом ППД становить 0,14 мм.

У обробленому методом ШЦД зуб'ів колеса  $R_a = 0,63$   
 ... і мкм, у необробленого  $R_a = 2...2,5$  мкм. Дані дослід-  
 ження відносяться до 7-го класу точності по ГОСТ 2789-73 при ба-  
 зовій довжині  $l = 0,8$  мм.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Для циліндричної передачі Новікова ДЛЗ установлені закономірності, яким підчиняються величини повторних похибок  $\Delta \alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta$  в залежності від значень геометричних параметрів передачі та типу початкового контура.

2. Розроблена розрахункова схема вибору раціональних значень геометричних параметрів та типу початкового контура передачі на стадії проектування, яка дозволяє апріорі зменшувати значення повторних похибок  $\Delta \alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$  в виготовленні передачі.

Запропонована та досліджена технологія фінішної обробки зубчатого колеса з допомогою реверсувальної черв'ячної фрези на зубофрезерній верстаті, в результаті чого активні поверхні зуб'ів обробляються методом ШЦД.

4. Експериментально підтверджено, що обробка зубчатих коліс методом ШЦД на 1...2 класа зменшується шорхуватість  $R_a$ , похибка профіля  $f_{pr}$  зменшується в 2,4...3 рази та в 1,63...1,68 раз зменшується неоднорідність поверхневої твердості зуб'ів.

Установлені закономірності, яким підчиняються величини повторних похибок  $\Delta \alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$  як функції геометричних параметрів передачі, можна розглядати як одну з теоретичних передумов при розв'язанні більш загальної проблеми: визначення норм точності для циліндричної зубчатої передачі Новікова ДЛЗ.

Розроблена на основі ЛІІ-пошука методика вибору раціональних значень геометричних параметрів на стадії проектування дозволяє апріорі зменшувати найбільші значення повторних похибок  $\Delta \alpha^{(2)}$ ,  $\Delta u$  та  $\Delta$  в виготовленні передачі.

Обробка зуб'ів зубчатих коліс з допомогою реверсувальної черв'ячної фрези помітно зменшує шорхуватість, похибки профіля зуба, неоднорідність поверхневої твердості зуб'ів та отже збільшує ресурс передачі.

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних роботах.

1. В.М. Грибанов, Ш.С. Ягудін. Порівняльне дослідження точності та розрахунок допусків шевронних зубчатих передач з різноманітними початковими контурами / Ворошиловград. машинобуд. Інститут. - Ворошиловград, 1985. - 13 с. - Деп. в УкрНДІНТІ 2.09.86, № 2045 - Ук 86.

2. Ш.С. Ягудін. Порівняльне дослідження впливу технологічних та монтажних похибок на кінематику зубчатих передач // Удосконалення методів та заходів метрологічного забезпечення - важливий фактор підвищення якості зубчатих передач та редукторів: Тез. допов. респ. конф., Севастополь. 1987. С. 16.

3. В.М. Грибанов, Ш.С. Ягудін. Порівняльне дослідження впливу технологічних та монтажних похибок на положення точок контакту, кінематику та плавність роботи зубчатих передач // Перспективні напрямлення створення нових та удосконалення існуючих конструкцій важконавантажених редукторів та прогресивна технологія їх виготовлення: Тез. допов. на наук.-техн. конф. - Краматорск, 1987 - С. 14.

4. А.В. Павленко, Ш.С. Ягудін. Нормальний модуль зачеплення та умови контактування зуб'їв циліндричних передач Новікова // Забезпечення надійності та довговічності зубчатих передач на стадії проектування та виготовлення: Тез. допов. наук.-техн. конф., Севастополь, 1988. - С. 28.

5. А.В. Павленко, Ш.С. Ягудін. Початковий контур та порушення двохточечного контакту в циліндричній передачі Новікова ДЛЗ // Досвід дослідження, проектування, виготовлення та експлуатації зубчатих передач Новікова: Тез. допов. наук.-техн. конф., Рига, 1989. - С. 35.

6. В.М. Грибанов, Ш.С. Ягудін. Вплив геометричних параметрів та похибок на контакт зуб'їв циліндричних передач Новікова ДЛЗ / Ворошиловград. машинобуд. Ін-т, - Ворошиловград, 1989. - 23 с. - Деп. в УкрНДІНТІ 21.08.89, № 1920 - Ук 89.

7. А.В. Павленко, В.М. Грибанов, Ш.С. Ягудін. Оптимізація кута нахилу зуба циліндричної передачі Новікова // Зубчаті передачі: сучасність та прогрес: Тез. допов. наук.-техн. конф., Одеса, 1990. - 15 с.

8. В.М. Грибанов, Ш.С. Ягудін, В.Д. Зайцев. Точність циліндричних передач Новікова ДЛЗ // Стандартизація та уніфікація в області зубчатих передач: Тез. допов. наук.-техн. конф., Харків, 1990. - С. 18.

9. Ш.С. Ягудін, А.В. Павленко. Вплив деяких похибок виготовлення на умови контактування зуб'їв циліндричних передач // Досвід галузей машинобудування та наукові досягнення - виробництву тракторів та сільгоспмашин, Севастополь, 1990. - С. 20.

10. В.М. Грибанов, А.В. Павленко, Ш.С. Ягудін. Методи синтезу циліндричної передачі Новікова ДЛЗ з обліком похибок виготовлення та складання // Наукові дослідження та досвід галузей машинобудування - народному господарству, Севастополь, 1991. - С. 8.

11. Ш.С. Ягудін, М.В. Клиш, В.Д. Зайцев. Багатокритеріальний синтез оптимальних параметрів зубчастої передачі Новікова ДЛЗ // Наукові досягнення - народному господарству: Тез допов. респ. конф. - Севастополь, 1991. - С. 65.

12. В.М. Грибанов, Ш.С. Ягудін. Початковий контур та порушення двохточечного контакту зуб'їв в циліндричній передачі Новікова ДЛЗ // Удосконалення методів розрахунку зубчатих передач: Тез. допов. респ. наук.-техн. конф. - Іжевск, 1989. - С. 68.

13. В.М. Грибанов, А.В. Павленко, Ш.С. Ягудін. Оптимізація кута нахилу зуба циліндричної передачі Новікова ДЛЗ - В зб.: Деталі машин. Випуск 51-й. Вид-во Вища школа, Одеса, 1990 р.

14. В.М. Грибанов, Ш.С. Ягудін. Розрахунок точності шевронних зубчатих передач Новікова. - В зб.: Конструювання та виробництво транспортних машин. Випуск 19-й. Вид-во Вища школа, Харків, 1987 р.

15. В.Д. Зайцев, О.П. Швед, Ш.С. Ягудін. Оптимізація кута нахилу зуба циліндричної передачі Новікова ДЛЗ // Наукові досягнення та досвід галузей машинобудування - народному господарству: Тез. допов. наук.-техн. конф., Севастополь, 1990. - С. 32.

*К. С. С. С.*  
Підписано до друку 20.05.93. Формат 60 x 84 I/16.Обсяг I д.а.  
Заказ 257. Тираж 100.

348034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20 а, РОТАПРИНТ СУДУ



AB 27.788

**AB 27.788**