

УДК 629.735.45

DOI: 10.25140/2411-5363-20209-1(19)-18-31

Олег Пилипенко, Денис Колесник, Анатолій Березняк

**ТОЧНІСТЬ ТА ПОГРІШНОСТІ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ  
ВЕРТОЛЬОТНИХ РЕДУКТОРІВ**

**Актуальність теми дослідження.** Якість робочих поверхонь зубчастих коліс формується під впливом конструктивних факторів (модуля, числа зубців і матеріалу коліс, твердості матеріалу заготовок та їх фізико-механічних властивостей) і технологічних факторів (швидкості та глибини різання, подачі, ступеня зношуваності інструменту). Зубчасту передачу можна виконати тільки з деяким наближенням до функціонально точної, оскільки елементи зубчастої передачі не можуть бути виготовлені без відхилень. Рівень цих відхилень визначається не тільки технічною, але й економічною доцільністю, а також можливостями виробництва.

**Постановка проблеми.** Виявлення можливості збільшення ресурсів зубчастих передач, зокрема головного, проміжного і хвостового редукторів вертольотів Ми-8 та їх модифікацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що основними факторами, що формують якість робочих поверхонь зубчастих коліс, є конструктивні та технологічні. Сучасні досягнення у сфері конструювання та виробництва сприяють підвищенню точності та зменшенню погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Виявити основні причини виникнення погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів, взаємозв'язок факторів виробництва й параметрів точності зубчастих коліс та можливості керування точністю поверхонь зубців ще на стадії проектування.

**Мета статті.** Розглянути точність та погрішності зубчастих передач вертольотних редукторів.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянуті показники точності зубчастих коліс за нормами кінематичної точності, плавності, контакту зубців та бокового зазору, вплив технології виробництва на якість зубчастих коліс. Функціональна точність забезпечується двома шляхами – конструктивним і технологічним. Приведені основні причини виникнення погрішності операції зубофрезерування, можливості керування точністю та якістю поверхонь зубців ще на стадії проектування, взаємозв'язок факторів виробництва й параметрів точності зубчастих коліс.

Наведені приклади кінематограм показують неприйнятність кінематичного принципу нормування і контролю точності напружених зубчастих передач та передач з модифікованими поверхнями зубців. Тому нормування та оцінювання точності авіаційних зубчастих коліс здійснюють виключно за елементними показниками точності.

Показано, що колеса необхідно контролювати по накопиченій погрішності кроку, а не по биттю. Розглянуто контроль за допомогою плям контакту для конічних передач із прямими і круговими зубцями.

**Висновок відповідно до статті.** Збільшення ресурсу передач здійснюється, поза іншими способами, підвищенням точності виготовлення зубчастих коліс, яка у високоресурсних і високонапружених передачах досягає 4-го ступеня точності за нормами плавності та контакту.

У багатьох випадках подальше підвищення точності при збільшенні ресурсу не є доцільним, оскільки висока навантаженість коліс на всіх режимах роботи забезпечує статичний розподіл навантаження між спряженими зубцями, що призводить до зменшення динамічного зусилля. Тут прослідковується основний принцип призначення точності авіаційних передач: точність призначається з урахуванням фактичної навантаженості та жорсткості спряжених зубців і всієї пружної системи загалом.

**Ключові слова:** зубчасті передачі та колеса вертольотних редукторів; показники точності; погрішності.

Рис.: 11. Табл.: 1. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Якість робочих поверхонь зубчастих коліс формується під впливом конструктивних факторів (модуля, числа зубців і матеріалу коліс, твердості матеріалу заготовок та їх фізико-механічних властивостей) і технологічних факторів (швидкості та глибини різання, подачі, ступеня зношуваності інструменту).

Зубчасту передачу можна виконати тільки з деяким наближенням до функціонально точної, оскільки елементи зубчастої передачі не можуть бути виготовлені без відхилень. Рівень цих відхилень визначається не тільки технічною, але й економічною доцільністю, а також можливостями виробництва.

Зубчасті колеса передач повинні володіти достатньо високою міцністю, зносостійкістю і поверхневою твердістю, щоб забезпечити надійну роботу зубчастої передачі при найменших габаритах і масі.

**Постановка проблеми.** Виявлення можливості збільшення ресурсів зубчастих передач, зокрема головного, проміжного і хвостового редукторів вертольотів Ми-8 та їх модифікацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що основними факторами, що формують якість робочих поверхонь зубчастих коліс, є конструктивні та технологічні. Сучасні досягнення у сфері конструювання та виробництва сприяють підвищенню точності та зменшенню погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Виявити основні причини виникнення погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів, взаємозв'язок факторів виробництва й параметрів точності зубчастих коліс та можливості керування точністю поверхонь зубців ще на стадії проектування.

**Мета статті.** Розглянути точність та погрішності зубчастих передач вертольотних редукторів.

**Виклад основного матеріалу. Показники точності.** За ГОСТ 1643-81 регламентується контроль 34 параметрів, які характеризуються 42 відхиленнями: кінематична точність, плавність роботи, контакт зубців, бічний зазор (таблиця) [1].

Таблиця

Показники точності циліндричних зубчастих коліс (ГОСТ 1643-81)

Показники	Позначення	Ступінь точності	Об'єкт	
			Шестерня і колесо	Зубчаста пара
<b>За нормами кінематичної точності</b>				
Найбільша кінематична погрішність зубчастого колеса	$F'_{ir}$	3 ... 8	*	
Накопичена погрішність кроку зубчастого колеса	$F_{pr}$	3 ... 8	*	
Накопичення погрішності до $k$ кроків	$F_{pkr}$	3 ... 8	*	
Погрішність обкату	$F_{cr}$	3 ... 8	*	*
Радіальне биття зубчастого вінця	$F_{rr}$	3 ... 12	*	
Коливання довжини загальної нормалі	$F_{Uwr}$	5 ... 8		*
Коливання вимірювальної міжосьової відстані за оберт колеса	$F''_{ir}$	5 ... 12		*
<b>За нормами плавності</b>				
Місцева кінематична погрішність	$f'_{ir}$	3 ... 8		
Циклічна погрішність зубцевої частоти	$f_{zzr}$	3 ... 8	*	*
Відхилення кроку зубчастого колеса	$f_{pb}$	3 ... 12	*	
Відхилення кроку зачеплення	$f_{ptr}$	3 ... 12	*	*
Погрішність профілю зуба	$f_{fr}$	3 ... 8	*	
Коливання вимірювальної міжосьової відстані на одному зубі	$f''_{ir}$	5 ... 12		*
<b>За нормами контакту зубців</b>				
Погрішність напрямку зуба	$F_{\beta r}$	3 ... 12	*	*
Сумарна погрішність контактної лінії колеса	$F_{kr}$	3 ... 12		*
Відхилення відносних розмірів сумарної зони дотику	$F'_{shr}$	4 ... 12		*
Відхилення відносних розмірів сумарної плями контакту передач	$F_{shr}$	3 ... 11		*
<b>За нормами бічного зазору</b>				
Гарантований бічний зазор	$J_{n, min}$	Усі види спряжень		*
Найменше додаткове зміщення початкового контуру і допуск	$E_{Hs}, T_H$			*
Найменше відхилення середньої довжини загальної нормалі і допуск	$E_{Wms}, T_{Wm}$			*
Найменше відхилення довжини загальної нормалі і допуск	$E_{Ws}, T_W$			*
Найменше відхилення товщини загальної нормалі і допуск	$E_{cs}, T_c$			*
Граничне відхилення вимірювальної міжосьової відстані	$E''_{as}, E''_{ai}$			*
Найменше відхилення розміру по роликах і допуск	$E_{Ms}, T_M$		*	
Відхилення міжосьової відстані	$f_{ar}$			*

Для прикладу виконання авіаційного зубчастого колеса на рис. 1 показане креслення з характеристиками точності за матеріалами швейцарської фірми «Рейсхауер» [2].

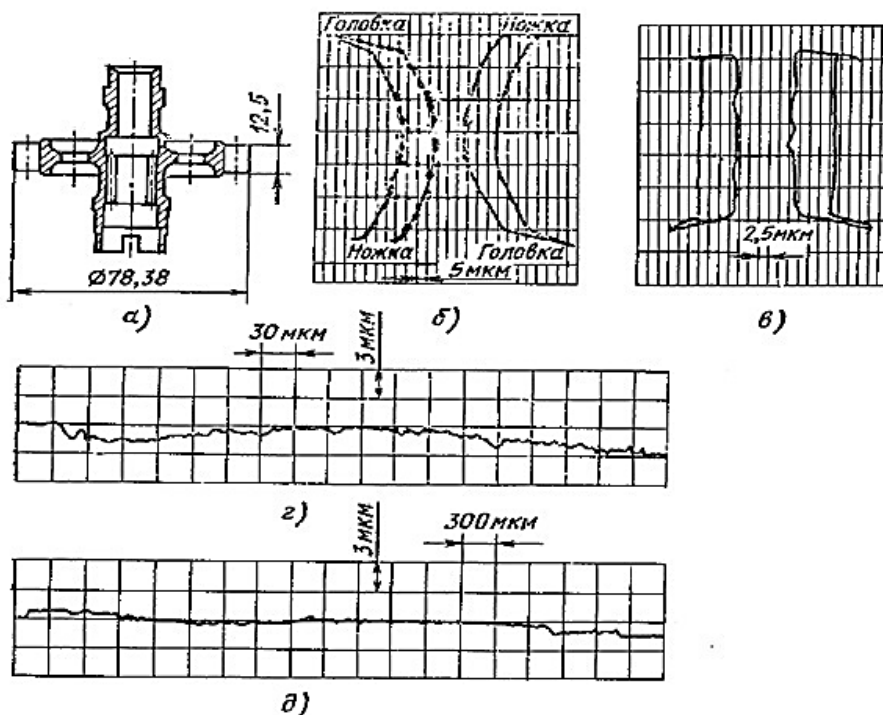


Рис. 1. Зубчасте колесо з модифікованим профілем ( $t = 3,06$  мм,  $z = 23$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ) та його параметри якості:

а – креслення колеса; б – діаграма профілю зубців; в – діаграма напрямку зубців;  
г – діаграма шорсткості по профілю; д – діаграма шорсткості по напрямку

Як видно з рис. 1, профіль такого колеса не являє собою евольвенту, тобто він підданий повній модифікації, що під час зачеплення не забезпечує кінематично точного обертання, але добре компенсує шкідливий вплив деформацій, які виникають під експлуатаційним навантаженням.

Всі зубчасті колеса із заданою якістю виготовлення, незалежно від розміру зуба і модуля зачеплення, мають приблизно однаковий розмір погрешностей передачі, що робить порівняння відносно простим (зазвичай близько 5 мікрометрів) [3]. Похибка передачі переважно приймається як незалежна від розміру зубчастої передачі, що робить діаметр зубчастої передачі несуттєвою змінною, яку можна за необхідності відрегулювати. Щоб мати уявлення про діапазон значень ПЗ (Похибка зачеплення передачі), очікуваних від зубчастої пари, з літературних джерел [3; 4] можна резюмувати, що значення погрешності передачі від піку до піку (ПППЗ) вище 10 мікрометрів вважаються типовими для грубих і дуже погано спроектованих передач. На другому кінці спектра для високоточної зубчастої пари ПППЗ в 1 мікрометр було б дуже добре, але в дійсності рідко досягається [3]. Середні та дрібні зубчасті колеса здебільшого будуть цілком задовільними: при ПППЗ менше 3–4 мікрометрів на 1 зуб, і цей рівень досягається за допомогою якісних зубчастих коліс. Похибка передачі – це різниця між теоретичним вихідним кутовим обертанням і фактичним, і може бути записана алгебраїчно, з погляду кутового обертання, як  $ПЗ(\mu\text{м}) = r_1 p \omega_1 - r_2 p \frac{z_2}{z_1} \omega_2$  [3]. Похибка відсутня, коли  $r_1 \omega_1 = r_2 \omega_2$ .

На рис. 2, 3, 4, 5 показані графіки залежності статичної похибки зачеплення від частоти обертання, передаточного числа, вплив частоти обертання на динамічну похибку зачеплення, а також залежність кутової швидкості від кута повороту.

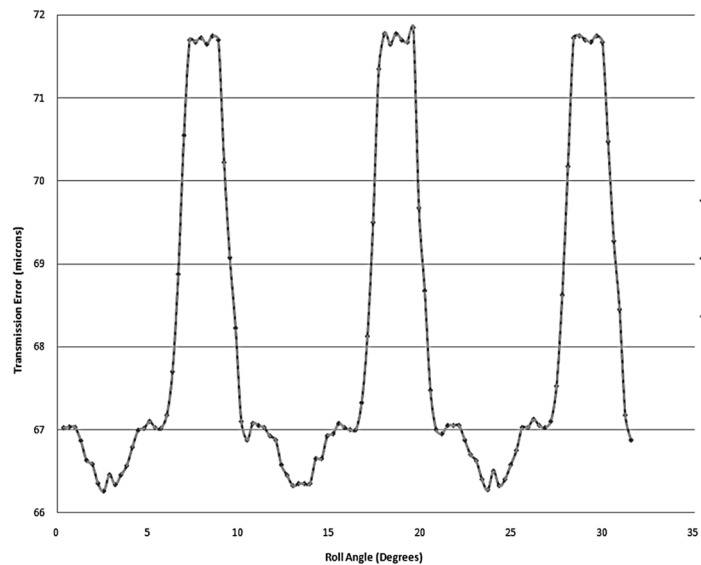


Рис. 2. Статична похибка зачеплення при частоті обертання  $1000 \text{ хв}^{-1}$

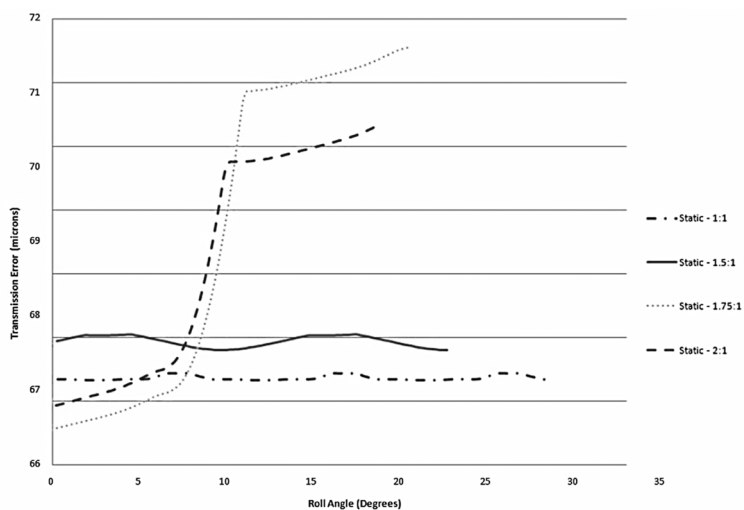


Рис. 3. Залежність статичної похибки зачеплення від передаточного числа

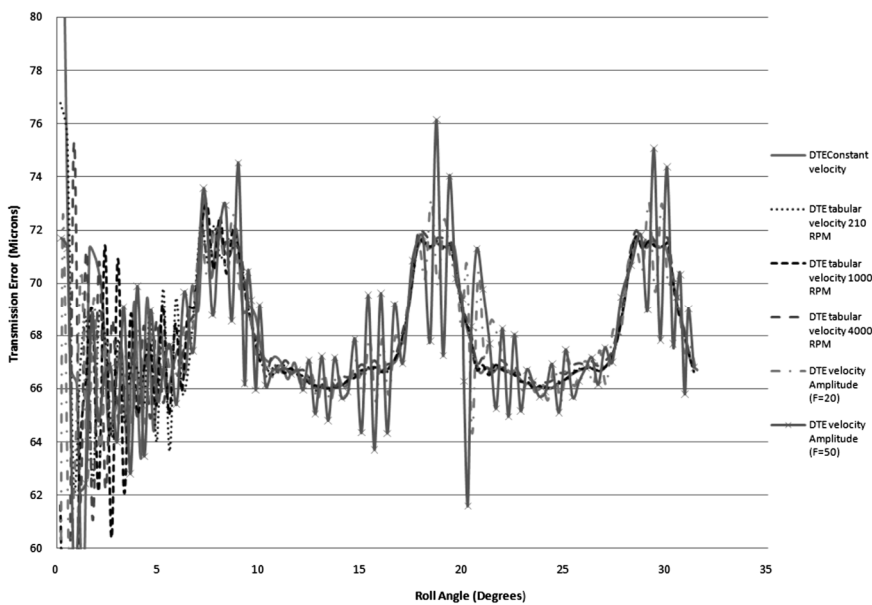


Рис. 4. Вплив швидкості на динамічну похибку зачеплення

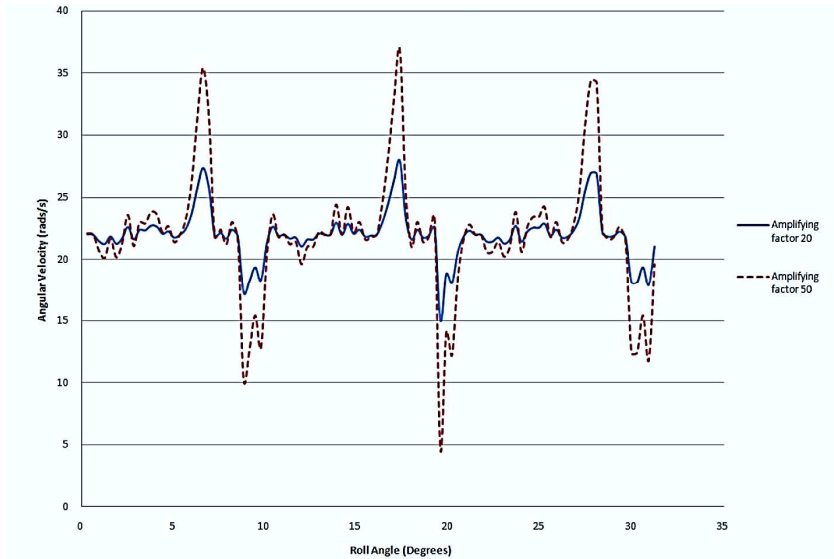


Рис. 5. Кутова швидкість в залежності від кута повороту

Загальною тенденцією є підвищення якості робочих поверхонь і підвищення вимог до точності формоутворення (рис. 6).

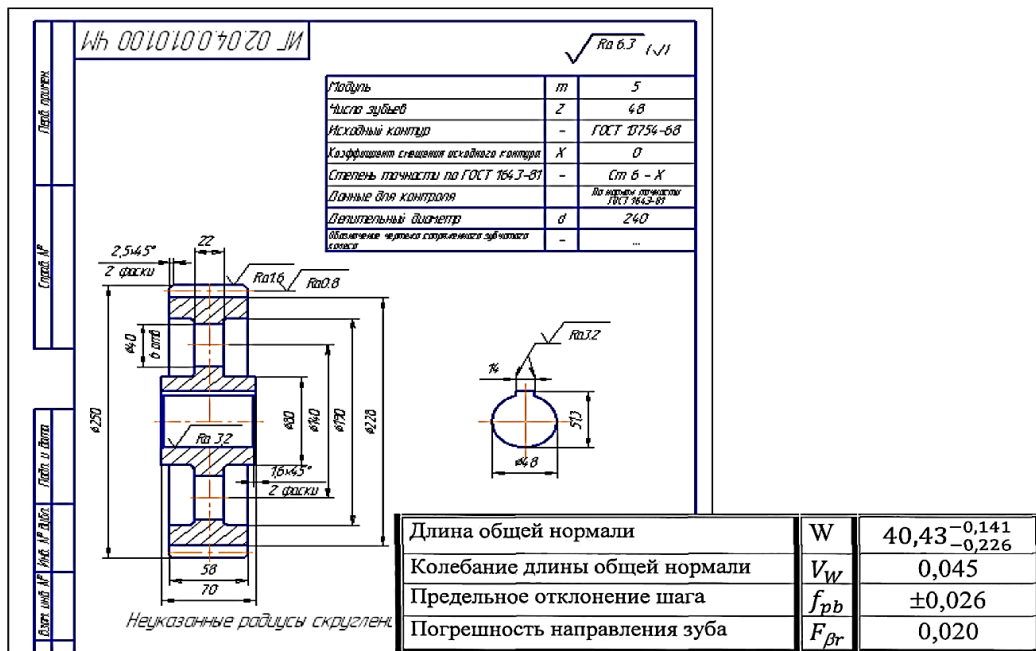


Рис. 6. Креслення зубчастого колеса з параметрами контролю

Кінематична точність зубчастого колеса – величина повної погрішності його повороту за один оберт, виникає в результаті непостійності радіального положення осей заготовки та інструменту, а також у результаті погрішностей обкату зубооброблювального верстату [5].

Плавність роботи передачі визначається похибками профілю і кроку зубців, що залежать від точності зуборізного інструменту і зубооброблювального обладнання.

Бічний зазор зубчастої передачі – відстань між бічними поверхнями зубців зубчастих коліс, яка визначає вільний поворот одного з зубчастих коліс при нерухомому парному зубчастому колесі. Залежить від точності багатьох параметрів зубчастих коліс (кроку зачеплення, профілю робочої поверхні зуба, ексцентриситету діляльного кола та ін.), а також від неточності монтажу передачі і температури в зоні контакту [5].

**Вплив технології виробництва.** Важливими показниками якості виготовлення зубчастих коліс також є фізико-механічні властивості матеріалів (твердість робочої поверхні, хімічний склад, глибина цементації, мікро- і макроструктура), вимоги до геометричної точності деталі та якості поверхні – шорсткість поверхні, величини наклепу, залишкових напружень.

Таким чином, точність і якість робочих поверхонь зубчастих коліс формуються протягом всього технологічного процесу обробки, тобто залежать від окремих характеристик якості, придбаних на різних операціях обробки. Великий вплив на точність зубчастих коліс спричиняє технологічна система, тобто стан зубооброблювального устаткування, призначення режимів обробки, вибір оснащення і різального інструменту [6]:

- зношування зуборізного інструменту, збільшує погіршеність профілю зуба і висоту мікронерівностей;

- не оптимальні режими різання впливають на висоту нерівностей оброблюваного матеріалу;

- нерівномірною схемою різання (наприклад, при роботі стандартною черв'ячно-модульною фрезою, у якій одночасно працюють дві або три різальні крайки, які зрізають шари різної товщини) породжує різне зношування різальних крайок;

- велика подача різального інструменту сприяє виникненню на оброблюваній поверхні хвилястості і гребінців – виникає відхилення евольвентного профілю зуба по висоті;

- при великій товщині зрізаного шару збільшуються інтенсивність зношування різального інструменту, сили різання і нарост;

- точність елементів технологічної системи операцій зубообробки впливає на: радіальні погіршеності, що залежать від розташування заготовки та інструменту; тангенціальні погіршеності, що залежать від порушення обкату інструменту і заготовки або від неточності ділення; осьові погіршеності, що залежать від порушення точності переміщення інструменту вздовж осі заготовки, від погіршеності робочої поверхні різального інструменту (похибки його проектування, виготовлення і заточки) та ін. [6].

Функціональна точність забезпечується двома шляхами: конструктивним і технологічним, які слід застосовувати одночасно. Конструктивне рішення, що забезпечує функціональну точність, – це модифікація поверхонь зубців. Модифікація полягає в умисних відхиленнях поверхні зуба від евольвентної поверхні, дозволяє покращити експлуатаційні характеристики передачі за рахунок компенсації впливу погіршеностей виготовлення і деформації зубців під навантаженням. Нині модифікацію профілів зубців застосовують у високошвидкісних, важконавантажених зубчастих передачах, якими є зубчасті передачі авіаційних редукторів.

Технологічні рішення – раціональна побудова технології на базі високоточного обладнання та інструменту, широке застосування зубошліфування, зубохонінгування, що забезпечують точність виконання форми і розмірів деталей. Наприклад, за допомогою даних про погіршеності профілю зуба (рис. 7) [7] можна визначити наступні основні причини виникнення погіршеності операції зубофрезерування:

- радіальні погіршеності, що характеризуються зміною радіальної відстані між заготовкою та інструментом: биття фрези на оправці (може бути викликано дефектами різального інструменту, дефектами оправки);

- погіршеності робочої поверхні різального інструменту – похибки проектування, виготовлення, неправильна заточка фрези (може бути викликана установкою фрези на оправку з перекосом або неправильною установкою оправки в заточний верстат);

- тангенціальні погіршеності, що характеризуються неточністю ділення або порушенням обкатування інструменту та виробу;

- осьові погіршеності, що характеризуються порушенням точності переміщення інструменту вздовж осі виробу (великий люфт шпинделя фрези зубофрезерного верстату);

- погрішності розташування базового торця деталі, погрішності центрування деталі, погрішності вивірки пристосування – дефекти оправки (слабе закріплення оправки у верстаті або знос оправки), погрішності стола верстату (великий люфт стола зубофрезерного верстата).

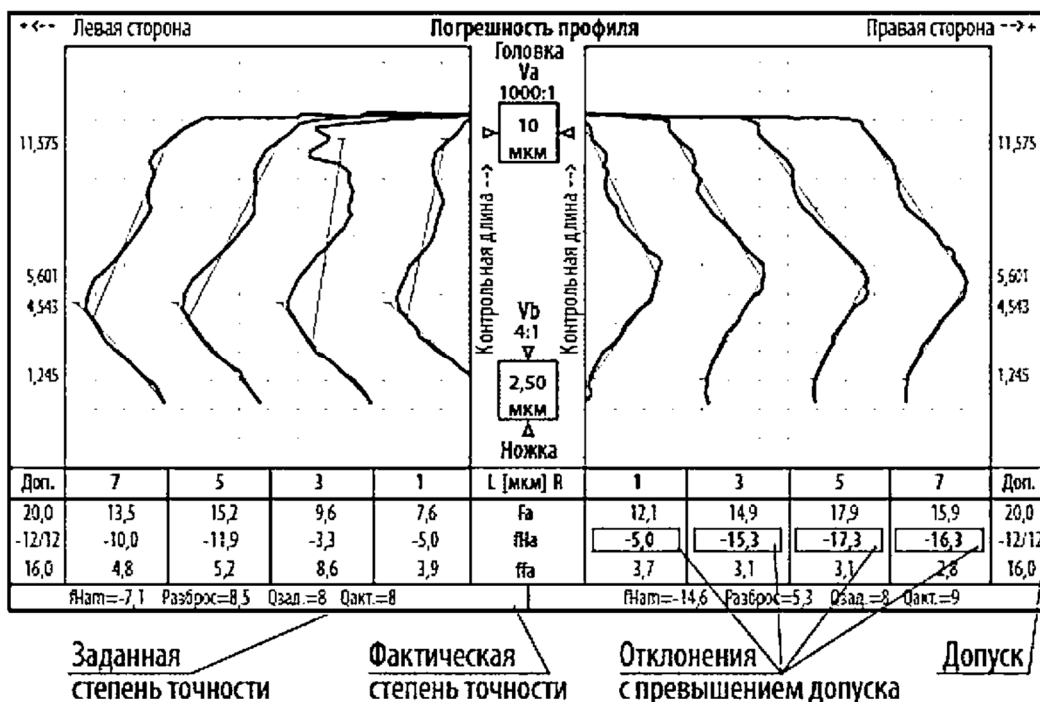


Рис. 7. Приклад протоколу вимірювання погрішності зуба

Результати досліджень показали [7], що ще на стадії проектування зубчастих коліс можна керувати їх точністю та якістю поверхневого шару. Для цього в кожному конкретному випадку за допомогою моделювання технології виготовлення треба знаходити найбільш прийнятний варіант зменшення розмаху погрішностей (кінематичної погрішності – допуск на коливання довжини загальної нормалі  $F_{Uwr}$  і плавності роботи – граничне відхилення кроку  $f_{pb}$ ) [8], а також забезпечити необхідний параметр шорсткості робочих поверхонь  $R_a$ , глибини дефектного шару  $X_M$ , оскільки шорсткість робочих поверхонь зубців має великий вплив на стійкість проти заїдання.

При цьому необхідно прогнозувати параметри точності та якості поверхневого шару при різних методах обробки, призначати режими механічної обробки, що забезпечуватимуть отримання заданих параметрів, причому з найбільшою продуктивністю (рис. 8) [7].

На рис. 8  $f_{pb}$  – відхилення зубчастого колеса;  $f_f$  – допуск на погрішність профілю зуба;  $f_{pt}$  – граничне відхилення кроку;  $F_\beta$  – допуск на погрішність напрямку зуба;  $F_r$  – допуск на радіальне биття зубчастого вінця;  $H$  – бічний зазор;  $F_i$  – допуск на коливання вимірювальної міжосьової відстані за оберт зубчастого колеса;  $f_i$  – допуск на коливання вимірювальної міжосьової відстані на одному зубі.

За останні 30 років суттєво змінилася технологія обробки зубчастих коліс, яка дозволяє реалізувати більш високі вимоги до точності коліс і суттєво збільшити продуктивність. Застосування цифрових систем управління дозволяє напряму використати результати виміру: при виготовленні на верстатах з ЧПУ вводяться коректори значення погрішності обробленої деталі та при обробці наступної деталі погрішності вже будуть скомпенсовані. Відмінною особливістю цих верстатів є комп'ютерне управління, вбудована вимірювальна система і гнучка система управління геометрією зубчастих коліс.

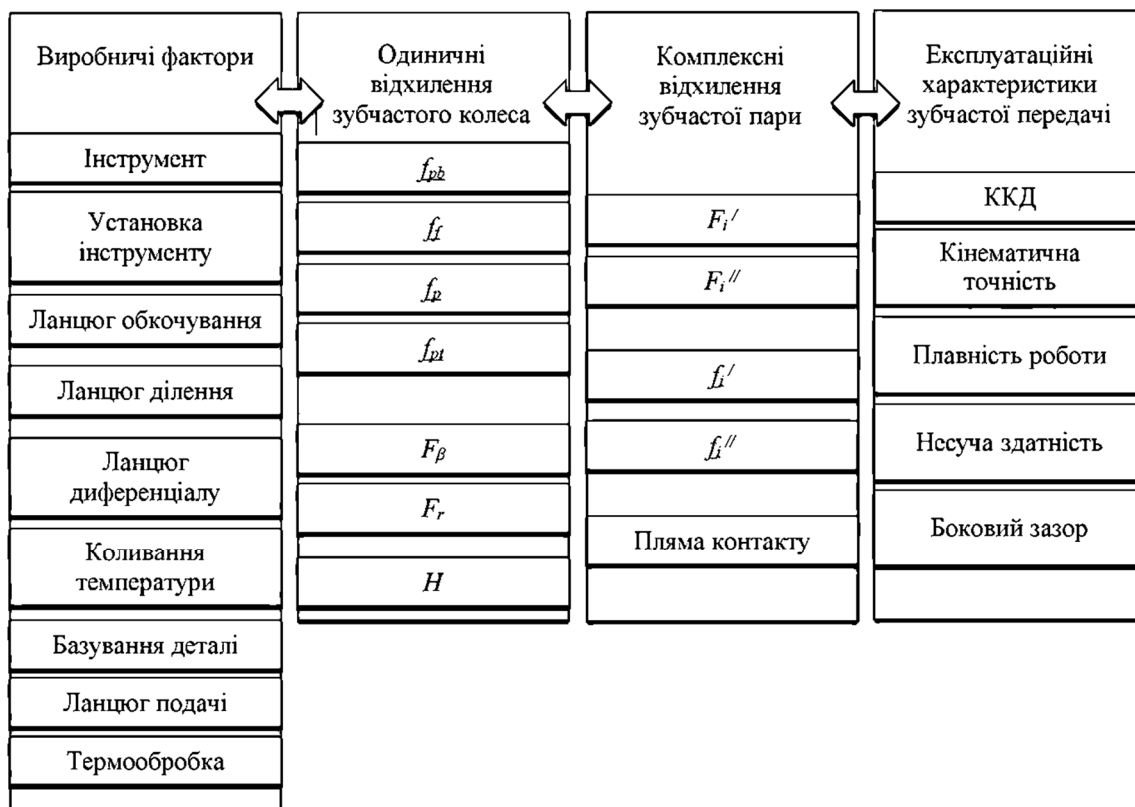


Рис. 8. Взаємозв'язок факторів виробництва і параметрів точності зубчастих коліс

Виробничий процес організовується так, щоб можливо було отримувати не тільки готові зубчасті колеса, але і інформацію про зміну погрішностей, на основі якої можна було б вводити в процес механічної обробки відповідне коректування і приймати оптимальні технологічні рішення. При цьому, паралельно з розрахунком геометричних параметрів зубчастих коліс пари, здійснюється розрахунок базових налагоджувальних установок верстатів для зубонарізання та зубошліфування і розрахунок математичного еталону для контрольно-виміральної машини. Застосування зубовимірвальних машин, які є засобами аналітичного контролю відхилень зубчастого вінця, дозволяє отримати інформацію про причини виникнення погрішностей і дає можливість також швидко здійснити коректування технології виготовлення, внести корективи в налагоджувальні установки верстату.

У [7] показано, що в процесі зубофрезерування черв'ячною фрезою відхилення радіусів евольвент по висоті профілю зуба  $V_{pfr}$  залежать від: погрішностей інструменту, геометричного ексцентриситету різальних граней фрези, торцевого ексцентриситету фрези, коливання величини радіальних і тангенціальних відтиснень.

Технологічний процес зубообробки містить в своєму складі багатократну зміну технологічних баз, що призводить до виникнення великих погрішностей зубчастого вінця. Базовими поверхнями (в залежності від конструктивних особливостей зубчастих коліс) при обробці заготовок циліндричних зубчастих коліс можуть бути: для коліс з маточиною – отвір (подвійна напрямна база) і базовий торець (опорна база); для плоских зубчастих коліс – базовий торець (установочна база) і отвір (подвійна опорна база).

Конструкція колеса (вінці, з маточиною або колеса-вали) суттєво впливає на послідовність обробки і підбір необхідного обладнання. Технологічні процеси виготовлення зубчастих коліс (шевінгування, обкочування, зубохонінгування), що використовують метод вільного обкату відрізняються особливою нестабільністю вихідних параметрів точності внаслідок складних механізмів утворення, спадкування і перерозподілу погрішностей.



Для забезпечення і підвищення точності технологічних систем зубообробки необхідно виявити фактори, що суттєво впливають на величину погрішності при обробці, встановити механізми формування погрішностей, виявити технологічні джерела їх утворення, застосовуючи метод технологічного наслідування. Такий аналіз призводить, як правило, до вирішення багатоваріантної технологічної задачі й до багатократною зміни раніше прийнятих рішень.

Задача забезпечення необхідної точності зубчастих коліс в процесі їх виготовлення є найбільш складною задачею, що впливає на надійність зубчастої передачі, водночас необхідна точність коліс впливає на технологію їх обробки (головним чином на технологію обробних операцій, що визначають можливі погрішності виготовлення робочих поверхонь).

**Кінематограми і кінематична точність.** Звичайно точною за кінематикою і плавністю вважається та передача, кінематична погрішність якої являє собою пряму, яка співпадає з віссю абсцис. Такий графік показаний в довіднику [2] на рис. 10.2, *а*, тобто під час контролю така передача повинна обертатись ідеально плавно, забезпечуючи заданий закон руху без відхилень.

В авіаційній передачі під час роботи завдяки деформаціям зубців відбувається порушення ідеального закону руху, передача буде працювати не плавно, будуть мати місце шкідливі крайкові удари та контакти. Кінематограма, яка показана в довіднику [2] на рис. 10.2, *б*, віддзеркалює ці явища. Таким чином, передача, яка оцінена за ГОСТ 1643-72 та іншими державними стандартами під час контролю як точна, у роботі буде проявляти себе як неточна.

Обернена картина спостерігається на рис. 10.3 [2]. Якщо прийняти конструктивні заходи, що компенсують деформації зубців під час роботи, наприклад, різноконтурність (умисна різниця кроків зачеплення), то під час контролю у відповідності, наприклад, з ГОСТ 1643-72 і СТ СЭВ 186-75 передача буде оцінена як неточна (рис. 10.3, *а*) [2], але під час роботи виявить себе як ідеально точна (рис. 10.3, *б*). Передачі з повністю модифікованими поверхнями зубців (наприклад, кіничне зачеплення) завжди будуть оцінюватися як неточні.

Наведені приклади показують неприйнятність кінематичного принципу нормування і контролю точності напружених зубчастих передач та передач з модифікованими поверхнями зубців. Цей принцип прийнятний для оцінки й нормування точності малонапружених зубчастих передач, наприклад, для передач загального машинобудування з робочими поверхнями зубців невеликої твердості.

Тому нормування і оцінку точності авіаційних зубчастих коліс здійснюють виключно за елементними показниками точності. Розвитком поелементної системи точності та контролю є введення поняття про перервну кінематичну погрішність (рис. 10.4, 10.5 [2]).

Для евольвентного прямозубого колеса – це евольвентограми однойменних профілів зубців, розташовані послідовно згідно з їх дійсним положенням на колесі. За графіком перервної кінематичної погрішності можна прослідкувати всі складові та їх взаємодію, по якому можна судити найбільш повно про ступінь точності виконання зубчастого колеса або пари зубчастих коліс з будь-якими формами профілів і ліній зубців на всій їх активній довжині:

$f_{ir}$  – погрішність профілю на всій активній довжині; для пари зубчастих коліс сумарна погрішність профілів двох зубців, що знаходяться у зачепленні, віддзеркалює показник  $f_{ior}$ .

Для косозубих коліс з  $\varepsilon_{\beta} > 1,25$  (які досить рідко застосовуються в авіатехніці) функцію передачі руху здійснюють в основному лінії зубців внаслідок «Ефекту косозубості» [6], тому введені показники  $f_{br}(f_{bor})$  – кінематична погрішність лінії зуба (пари зубців). Взаємодія зубців у зонах переспряження (плавність, робота крайок)

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

відображається показниками  $f_{ir}(f_{iOr})$ . Широко застосовуваний показник точності, який на додаток є основним критерієм точності під час міцнісних розрахунків, це відхилення кроку зачеплення –  $f_{pbr}(f_{pbOr})$ .

Кінематична точність зубчастих коліс і пар за перервною кінематичною погрішністю оцінюється показниками  $F_{pkr}(F_{pkOr})$  і  $F_{pr}(F_{pOr})$ . Перший показник дозволяє судити про погрішність повороту колеса (пари) на частині оберту. Це дуже важливо для високошвидкісних зубчастих передач, якими і є в більшості випадків авіаційні передачі.

Відмінною особливістю коліс (пар), що мають повністю модифіковані профілі (для прямозубих зачеплень), або лінії зубців для конічних пар з круговими зубцями, в яких  $\varepsilon_{\beta} > 1,5$ , є криволінійна форма поля допуску на профіль (лінію зуба). Це вирішує проблему зв'язку свідомого спотворення профілів (ліній) зубців з метою підвищення експлуатаційних властивостей передачі з технологічною точністю, тобто відкривається можливість будь-яких конструктивних рішень без ускладнення задач технології по забезпеченню певної точності виготовлення [2]. Яку форму не приймав би профіль, технолог має одні й ті ж границі, в яких допускаються погрішності. Державні стандарти такої можливості не дають. Допуски на показники точності є в галузевих стандартах.

Особливого підходу вимагає для оцінки точності використання елементних показників – биття зубчастого вінця  $Frr$  і коливання довжини загальної нормалі  $FvWr$  [5]. Під час шліфування зубчастих коліс на зубошліфувальних верстатах фірми «Мааг» у більшості випадків застосовується так званий «нульовий» метод, тобто шліфувальні круги встановлюються під нульовим кутом профілю оброблюваної рейки на відстані, що дорівнює довжині загальної нормалі (рис. 9).

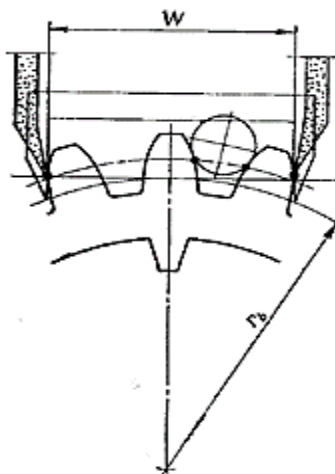


Рис. 9. Схема обробки і вимірювання зубчастих коліс, шліфованих нульовим методом

Під час шліфування нульовим методом коливання довжини загальної нормалі відсутні, оскільки відстань між шліфувальними кругами незмінна.

Протилежна картина в цьому випадку спостерігається з биттям. Ролик, що закладається у западини під час контролю, займає положення (виявляє биття) в залежності не тільки від геометричного ексцентриситету зубчастого вінця, як це має місце при цьому виді контролю, але і від погрішностей ділильного механізму верстату, тому що профілі, на які опирається ролик, оброблялися в різних положеннях (на різних пазах) ділильного диску. Накладання погрішностей двох джерел робить оцінку точності хибною. У такому випадку можуть бути забраковані придатні деталі та пропущені непридатні.

Такий самий результат може бути при виборі биття зубчастого вінця ( $Frr$ ) як показника для конічних зубчастих коліс з круговими зубцями, оброблюваних однобічним методом, здебільшого на різних верстатах і відповідно при різних

установках. Звідси, коли кулька під час контролю биття лягає на бокові різноіменні поверхні зубців, то результат складається з чотирьох складових: погрішностей двох верстатів і двох установок на верстаті, які складаються випадковим чином і по фазах, і по амплітудах погрішностей. Тому такі колеса необхідно контролювати по накопиченій погрішності кроку, а не по биттю [2].

Контроль по перервній кінематичній погрішності прямозубих і вузьких косозубих циліндричних коліс полягає у послідовному запису погрішностей евольвентних профілів.

**Плями контакту зубців.** Особливе питання стосується нормування плями контакту. В СТ СЭВ 186-75 і ГОСТ 1643-72 вона нормується відносними розмірами плями контакту у відсотках. Це вірно тільки для косозубих коліс, але для прямозубих коліс це невірно.

Під час контролю плями контакту пари зубчастих коліс на зубці ведучого або вимірювального колеса наноситься фарба, а потім при обкочуванні з парним колесом виходять відбитки на його зубцях, по яких судять про якість контакту. Під час контролю контакт пари зубців продовжується не більше, ніж на довжині кроку зачеплення. У той же час у будь-якій передачі конструктивно забезпечується перекриття профілів значно більше одиниці. Звідси випливає, що під час контролю профілі контактують один з одним тільки на обмежених ділянках, тобто по голівках зубців колеса або по ніжках. Причому візуально можна переконатися, що пляма на ніжці суттєво менше, ніж на голівці. І це при однакових погрішностях кроку зачеплення, тобто при однаковому рівні точності. Для  $z = 20$  різниця в розмірах досягає 40 %, а величина плями на ніжці дорівнює 36 %, тоді як, наприклад, по ГОСТ 1643-72 для 6-го ступеня точності оговорюється мінімум в 45 %. У той же час при ймовірному іншому поєднанні кроків зачеплення пляма розташовується на голівках зубців колеса і її величина буде дорівнювати 76%, тобто при будь-яких, навіть грубих погрішностях, пляма контакту буде відповідати самим високим рівням точності, зокрема, 3-му ступеню точності по ГОСТ 1643-72 [2].

Самим суттєвим є те, що для більшості випадків (окрім прецизійних передач порядку 3-4-го ступеня точності) розміри плями контакту по висоті зуба практично не залежать від точності виготовлення зубчастих коліс, а залежать від геометричних параметрів зачеплення і від поєднання погрішностей. Так, в прямозубих зачепленнях критерієм якості контакту повинна бути тільки довжина відбитку фарби. В такій же мірі це відноситься до модифікованих зачеплень, де висота плями контакту ще залежить і від розмірів модифікації. Тому норми на пляму контакту слід встановлювати в залежності від конкретних геометричних і конструктивних параметрів зубчастих коліс, а також повинні враховуватись конструкція і умови експлуатації зубчастої передачі. Це пов'язано з тим, що, наприклад, кінчні колеса під навантаженням деформуються і переміщуються один відносно другого по причині нежорсткості корпусів, температурних деформацій і т. ін. На рис. 10 показано типове нормування плями контакту в прямозубому кінчному зачепленні, а на рис. 11 – з круговими зубцями при осьовому перекритті з  $\varepsilon_\beta < 1,5$  [2].

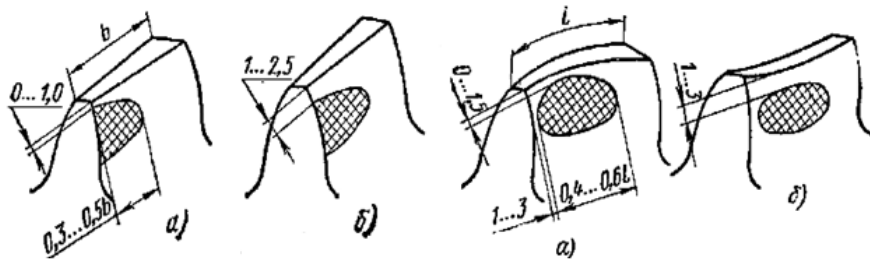


Рис. 10. Пляма контакту в прямозубих кінчних коліс:  
а – ведуче колесо; б – ведене

Рис. 11. Пляма контакту у кінчних коліс з круговими зубцями:  
а – ведуче колесо; б – ведене

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Виключна увага при нормуванні плями контакту в конічних передачах приділяється величині відривів плями від вершини зуба, тому що ці відриви характеризують контакт в момент переспряження зубців. При виконанні правила – відриви на веденому колесі повинні бути рівними або більше відривів на ведучому – здійснюється варіант, коли розвантажується кромка на вході в зачеплення, створюється запас різності кроків для компенсації деформацій та переміщень конічних коліс.

Часто в літературі та в практиці пов'язують пляму контакту з плавністю роботи передачі. Такий зв'язок можна прослідкувати тільки в особливих випадках. В загальному випадку пляма не віддзеркалює плавність роботи ні в прямозубій конічній передачі, ні в передачі з круговими зубцями.

Збільшення ресурсу передач здійснюється, поза іншими способами, підвищенням точності виготовлення зубчастих коліс, яка у високоресурсних і високонапружених передачах досягає 4-го ступеня точності за нормами плавності та контакту. Наприклад, у разі підвищення ресурсу редуктора турбовентиляторного двигуна з 1000 до 4000 годин похибки основного кроку зменшились більше, ніж у три рази. В цьому випадку параметр  $\psi$  навантаженості передачі [9; 10] зменшується у три-п'ять разів [2].

В цілому ряді випадків подальше підвищення точності при збільшенні ресурсу не є доцільним, оскільки висока навантаженість коліс на всіх режимах роботи забезпечує статичний розподіл навантаження між спряженими зубцями, що призводить до зменшення динамічного зусилля. Тут прослідковується основний принцип призначення точності авіаційних передач: точність призначається з врахуванням фактичної навантаженості та жорсткості спряжених зубців і всієї пружної системи в цілому. Зубчасті передачі середньої навантаженості виготовляються з точністю 6-5-5В або навіть 7-6-6В згідно ГОСТ 1643-72 [2].

**Висновки відповідно до статті.** Збільшення ресурсу передач здійснюється, поза іншими способами, підвищенням точності виготовлення зубчастих коліс, яка у високоресурсних і високонапружених передачах досягає 4-ого ступеня точності за нормами плавності та контакту.

У багатьох випадках подальше підвищення точності при збільшенні ресурсу не є доцільним, оскільки висока навантаженість коліс на всіх режимах роботи забезпечує статичний розподіл навантаження між спряженими зубцями, що призводить до зменшення динамічного зусилля. Тут прослідковується основний принцип призначення точності авіаційних передач: точність призначається з врахуванням фактичної навантаженості та жорсткості спряжених зубців і всієї пружної системи загалом.

#### Список використаних джерел

1. ГОСТ 1643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Москва: Изд-во стандартов, 1981. 45 с.
2. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справочник / под ред. Э. Б. Вулгакова. Москва: Машиностроение, 1982. 375 с.
3. Transmission Error in Spur Gears: Static and Dynamic Finite-Element Modeling and Design Optimization by Raul Tharmakulasingam. Unated Kingdom. October 2009.
4. Smith J. D. Gear Noise and Vibration. 2<sup>nd</sup> Edition, *Marcel Dekker Inc.*, New York, 2003.
5. Нежурин И. П. Кинематическая точность зубчатых колёс и её контроль. *Стандартизация*. 1963. № 6. С. 8-14.
6. Калашников Н. А. Точность в машиностроении и её законы. Москва: Машгиз, 1950. Ч. 2. 147 с.
7. Жукова С. И. Разработка метода технологического обеспечения противозадирной стойкости в кромочной зоне контактирования эвольвентных цилиндрических зубчатых колёс редукторов газотурбинных двигателей: дис. ... канд. техн. наук / Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва. Рыбинск, 2018. 166 с.

8. Шаповалов О., Колесник Д., Пилипенко О. Застосовуваність і залежність параметрів зубчастих передач авіаційних редукторів від технологічних процесів їх виготовлення. *Технічні науки та технології*. 2019. № 3(17). С. 37–48.

9. Айрапетов Э. Л., Айрапетов С. Э., Евсикова Н. А., Мельникова Т. И., Шоломов Н. М. Влияние погрешностей изготовления и монтажа передачи на динамическую нагруженность зубьев колёс. *Колебания и виброакустическая активность машин и конструкций*. Москва: Наука, 1986. С. 169–173.

10. Шаповалов О., Колесник Д., Пилипенко О. Навантаженість зубчастих передач вертольотних редукторів та їх напружено-деформований стан. *Технічні науки та технології*. 2018. № 4(14). С. 41–54.

### References

1. GOST 1643-81. *Osnovnye normy vzaimozamenjajemosti. Peredachi zubchatye zilindricheskie. Dopuski* [Basic norms of interchangeability. Transmissions toothed cylindrical. Admittances]. Moscow: Izd-vo standartov [in Russian].

2. Vulgakov, A. B. (Ed.) (1982). *Aviazionnye zubchatye peredachi i reduktory* [Aviation gearing and reducers]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

3. Transmission Error in Spur Gears: Static and Dynamic Finite-Element Modeling and Design Optimization by Raul Tharmakulasingam. Unated Kingdom. October 2009 [in English].

4. Smith, J. D. (2003). Gear Noise and Vibration. 2<sup>nd</sup> Edition, *Marcel Dekker Inc.*, New York [in English].

5. Niezhurin, I. P. (1963). Kinematiceskaja tochnost zubchatyh koljos i ee control [Kinematics exactness of gear-wheels and her control]. *Standartizatsiia – Standardization*, 6, 8-14 [in Russian].

6. Kalashnikov, N. A. (1950). *Tochnost v mashinostroenii i ee zakony* [Exactness in an engineering and her laws] (Vol. 2). Moscow: Mashgiz [in Russian].

7. Gukova, S. I. (2018). *Razrabotka metoda technologicheskogo obespechenia protivozadirnoj stojkosti v kromochnoj zone kontaktirovaniya evolventnyh zilindricheskikh zubchatyh koles reduktorov gazoturbinnih dvigatelej* [Development of method of the technological providing of antiscuff firmness is in the edge area of contact of involute cylindrical gear-wheels of reducing gears of turbo-engines] (Candidate's thesis). Rybinskii gosudarstvennyi aviazionnyi tehnikeskii universitet imeni P. A. Solovieva, Rybinsk [in Russian].

8. Shapovalov, O., Kolesnik, D., Pilipenko, O. (2019). Zastosovuvaniest i zalezhnist parametriv zubchastyh peredach aviazijnyh reduktoriv vid tehnologichnyh prozesiv jih vygotovlennja [Applied and dependence of parameters of gearing of aviation reducing gears from technological processes their making]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 3 (17), 37–48 [in Ukrainian].

9. Irapetov, E. L., Irapetov, S. E., Evsikova, N. A., Melnikova, T. I., Sholomov, N. M. (1986). Vliianie pogreshnostei izgotovleniia imontazha peredachina dinamicheskuii nagruzhennost zubiev koles [Influence of errors of making and editing of transmission on dynamic loading of teeth of wheels]. In *Kolebaniia i vibroakusticheskaia aktivnost mashin i konstruksii – Vibrations and vibroacoustic activity of machines and constructions*. Moscow: Nauka [in Russian].

10. Shapovalov, O., Kolesnik, D., Pilipenko, O. (2018). Navantagenist zubchastyh peredach ver-toletnyh reduktoriv ta jih napruzhenno-dephormovanyj stan [Load capacity of gearing of helicopter reducers and their stress-strained state]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 4(14), 41–54 [in Ukrainian].

UDC 629.735.45

*Oleg Pilipenko, Denis Kolesnik, Anatoli Berezniak*

## EXACTNESS AND ERRORS OF GEARING OF HELICOPTER REDUXING GEARS

**Urgency of the research.** Quality of working surfaces of gear-wheels is formed under act of structural factors (module, numbers of teeth and material of wheels, hardness of material of purveyances and them phisico-mechanical properties) and technological factors (speeds and depths of cutting, serve, degree of worn down of instrument). Gearing can be executed only with some approaching to functionally exact, as elements of gearing can not be made without rejections. The level of these rejections is determined by not only technical but also economic expediency, and also manufacturabilities.

**Target setting.** Exposure of possibility of increase of resource of gearing main, intermediate and tail reducing gears of helicopters of Mu-8 and their modifications.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Actual scientific researches and issues analysis.** From the analysis of literary sources it is possible to make conclusion that by basic factors, pilchard quality of working surfaces of gear-wheels, there are structural and technological, Modern achievements in the field of designing and production assist the increase of exactness and reduction of errors of gearing of helicopter reducing gears.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** To educe principal reasons of origin of errors of gearing of helicopter reducing gears, intercommunication of factors of production and parameters of exactness of gear-wheels and management possibility by exactness of surfaces of points yet on the stage of projecting.

**The research objective.** To consider exactness and errors of gearing of helicopter reducing gears.

**The statement of basic materials.** The indexes of exactness of gear-wheels on the norms of kinematics exactness, smoothness, contact of teeth and sidelash, influence of technology of production on quality of gear-wheels are considered. Functional exactness is provided in two ways - structural and technological. Principal reasons over of origin of error of operation of the gear milling are brought, management possibilities by exactness and quality of surfaces of teeth yet on the stage of projecting, intercommunication of factors of production and parameters of exactness of gear-wheels.

Made examples of kinematograms show the unacceptability of kinematics principle of setting of norms and control of exactness of the tense gearing and transmissions with the modified surfaces of teeth. Therefore setting of norms and estimation of exactness of aviation gear-wheels is carried out exceptionally on the element indexes of exactness

It is shown that wheels must be controlled on the accumulated error of step, but not on beating. Control is considered by means of spots of contact for conical transmissions with lines and circular teeth.

**Conclusion in accordance with the article.** The increase of resource of transmissions comes true, except another ways, by the increase of exactness of making of gear-wheels, that at high-resource and high-tension transmissions arrives at the 4-th degree of exactness on the norms of smoothness and contact.

In a number of cases further increase of exactness at the increase of resource beside the purpose, because high loading of wheels on all office hours provides static allocation of loading between the attended teeth, that results in decreasing dynamic effort. Basic principle of setting of exactness of aviation transmissions is here traced: exactness is appointed taking into account actual loading and inflexibility of the attended tbeeth and all resilient system on the whole.

**Keywords:** gearing and wheels of helicopter reducing gears; indexes of exactness; error.

Fig.: 11. Table: 1. References: 10.

**Пилипенко Олег Іванович** – доктор технічних наук, професор, керівник секції основ конструювання машин кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна), провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).

**Pilipenko Oleg** – Doctor of Technical Sciences, Professor, leader of the Fundamental Machine Design section, the Welding Technology and Automatized Projecting of Building Structures Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine), leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** opilip@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-0590-0107>

**Scopus Author ID:** 16510833000

**ResearcherID:** G-2533-2016

**Колесник Денис Миколайович** – начальник науково-дослідної лабораторії, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).

**Kolesnik Denis** – Chief of research laboratory, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** denis1971@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-8833-570X>

**Березняк Анатолій Миколайович** – старший науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).

**Berezniak Anatoli** – Senior Science Specialist, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** berezniak80@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4081-9152>