

В. Т. СІКУЛЬСЬКИЙ, К. В. МАЙОРОВА, С. О. ЗАКЛІНСЬКИЙ, А. С. СУСЛОВ

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТОЧНОСТІ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ЗА ДОПОМОГОЮ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ

Предметом вивчення в статті є апробація теоретичних та технічних рішень застосування координатно-виміральної машини (КВМ) шляхом контролю геометричних параметрів високоточних деталей типу зубчасте колесо. Метою статті є вивчення постійних похибок геометричної точності поверхонь та крайок зубчастого колеса контактним методом вимірювання. Завдання дослідження полягають у вимірюванні евольвенти, бокової лінії контакту і похибок кроку зубчастого колеса, биття зубчастого вінця, а також визначення впливу ексцентриситету на похибки кроку та биття на відповідність 7-му ступеню точності за ДСТУ ISO 1328-1:2006. Використовуваними методами є методи емпіричного дослідження – аналіз методів вимірювання, натурні експерименти та контроль. Отримані результати. Встановлено, що довжина загальної нормалі досліджуваного зубчастого колеса має критичну точність, що складає близько 99% від допуску на цей параметр. Тому для перевірки якості виготовлення поверхонь зубів евольвентних циліндричних коліс на практиці слід застосовувати саме контактний метод вимірювання, що характеризується наявністю безпосереднього дотику чутливого елементу (щупу) з поверхнею досліджуваного об'єкту, як той, що забезпечує високу точність (до 1,5 мкм), що в свою чергу мінімізує ризики відбраковування деталі. Висновки. За даними контролю встановлено, що на критичну постійну похибку впливає загальна накопичена похибка кроку зубів (55,3 % від допуску), а також радіальне биття робочих поверхонь (54,8 % від допуску). Зазначимо, що інші параметри мають запас точності у 20-30 %. Це пояснюється якістю дотримання технології виготовлення дослідного зубчастого колеса. Наступними дослідженнями можуть бути поопераційний контроль виготовлення зубчастого колеса з метою визначення критичних етапів технології, на яких довжина загальної нормалі шестерні набуває критично-допустимої точності. Також доцільним є створення методики сумісного використання 3D-сканування та контактного методу вимірювання з метою збільшення точності вимірювання, зменшення кількості й часу вимірювань.

Ключові слова: зубчасте колесо; координатно-вимірвальна машина; вимірювання; геометрична точність; контроль; допуск.

1. Вступ

1.1. Мотиваційне дослідження

Механічні передачі використовуються як в аерокосмічній галузі: у силових установках, системах керування і механізмах шасі літаків, вертольотів, безпілотних літальних апаратах та іншій авіаційній техніці [1], так і в інших галузях: медицини, енергетичній промисловості, гірничодобувній промисловості та у промислових машинах. Такі механізми здатні забезпечити надійне перетворення параметрів руху, а саме: частоту обертання і крутний момент, швидкостей, видів і законів руху. Надійність їх роботи протягом певного терміну служби можливо при задоволенні критеріям працездатності: міцності, жорсткості, зносостійкості, теплостійкості тощо.

Нині найпоширеніше виробництво зубчастих коліс є виготовлення розмірною обробкою [2]. Для

забезпечення зносостійкості виробники прагнуть створити умови для рідинного тертя, при якому товщина масляного шару повинна перевищувати суму висот мікронерівностей та відхилень від правильної геометричної форми поверхонь деталей механізмів. Тому контроль з високою точністю (7 клас точності і вище) таких деталей, як зубчасті колеса потребує використання автоматичного та напіваавтоматичного вимірального обладнання [3].

1.2. Сучасний стан

Координатно-вимірвальні машини (КВМ) є одними з найбільш розповсюдженими програмно-технічними комплексами, що призначені для вимірювання геометричних параметрів дослідних деталей і виробів шляхом порівняння результатів вимірювання з математичною моделлю [4, 5]. Управління КВМ по керуючій програмі з персонального



комп'ютера дозволяє здійснити автоматичне оброблення результатів вимірювання, що в свою чергу підвищує інформативність результатів через графічне відображення та дозволяє врахувати складові систематичні і виявити випадкові похибки через впровадження моделей компенсації похибок [6]. Останнє збільшує точність отриманих даних замірів в порівнянні з традиційними пристроями, де для вимірювання параметрів евольвентного профілю використовують еталон реальну поверхню евольвенти з незначними відхиленнями [7].

КВМ відрізняються типом вимірювання (контактні, безконтактні), точністю вимірювання, розмірами робочої зони, а також призначенням. Головними завданнями КВМ є контроль допусків на геометричні розміри, форми та розташування під час налагодження технології виготовлення деталей, міжопераційний контроль та контроль готових виробів, виявлення дефектів та несправностей технологічного обладнання.

Зважаючи на розвиток адитивного виробництва та достаток винаходів [8], очевидний напрямок досліджень, які вирішують за допомогою КВМ є зворотне проектування або реверс-інжиніринг [9, 10], де є необхідність у високій точності вимірювання і створення цифрової 3D-моделі [11]. Однак в порівнянні з 3D-скануванням, реалізація зворотного проектування за допомогою КВМ є більш довга за часом і трудомістка відповідно [2, 12]. Так, для безконтактного 3D-сканування складно-профільних поверхонь таких як, лопатки, зубчастого колеса, шків, зірочки тощо може використано в 2-3 рази менше часу, ніж при замірах на КВМ. І навпаки при порівнянні за точністю отриманих даних [1, 9].

1.3. Об'єкт, мета та завдання дослідження

Враховуючи такий досвід виробників для дослідження геометричної точності виготовленої високоточної деталі та прийняття рішення його пропуску у виробництво було обрано зубчасте колесо (рис. 1), що контролювалося обраною моделлю КВМ.

Інформація про досліджуване зубчасте колесо:

- діаметр по вершинах: 24 мм;
- число зубів: 30;
- модуль: 0,75 мм;
- діаметр дільного кола: 21,5 мм;
- коефіцієнт зміщення початкового контуру: 0 мм;
- довжина загальної нормалі: 5,82 мм;
- кількість зубів для розрахунку довжини загальної нормалі: 3 шт;
- ступінь точності: 7 за ДСТУ ISO 1328-1:2006 [13];

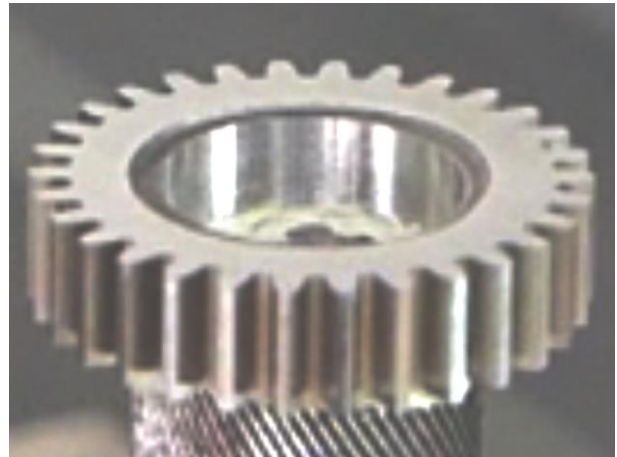


Рис. 1. Загальний вигляд зубчастого колеса

- спосіб виготовлення: механічне оброблення;
- матеріал: сталь 25;
- тип колеса: циліндричне.

Метою досліджень є вивчення постійних похибок геометричної точності поверхонь та крайок високоточних деталей типу зубчасте колесо шляхом контактної методу контролю за обраною КВМ.

Для досягнення мети треба було вирішити наступні **завдання**:

- визначити параметри дослідження та налаштувати вимірювальний комплекс;
- виміряти евольвенти (профілю) та бокової лінії контакту (напрямку) зубчастого колеса, похибок кроку окремо для лівих та правих сторін зубів зубчастого колеса, биття зубчастого вінця, та визначити вплив ексцентриситету на похибки кроку та биття, перевірити зубчасте колесо на відповідність ступеню точності: 7 за ДСТУ ISO 1328-1:2006
- проаналізувати результати вимірювання

2. Приклад реалізації

2.1. Завдання на вимірювання

Провести вимірювання зубчастого колеса (рис. 1) на відповідність 7-му класу згідно з ДСТУ ISO 1328-1:2006 [13]. Для цього за допомогою КВМ контролювалося наступне:

- похибка кута профілю ($f_{H\alpha}$);
- похибка форми профілю (F_{α});
- загальна похибка профілю ($f_{H\alpha}$);
- похибка кута лінії контакту ($f_{H\beta}$);
- похибка форми лінії контакту ($f_{H\beta}$);
- загальна похибка лінії контакту (F_{β});
- відхилення кроку зубів (f_{ri});
- накопичена похибка кроку зубчастого колеса (F_{ri});
- радіальне биття зубчастого вінця (F_{ri}).

Зображення 3D-моделі дослідної деталі, яку використано в якості еталонної, наведено на рис. 2.

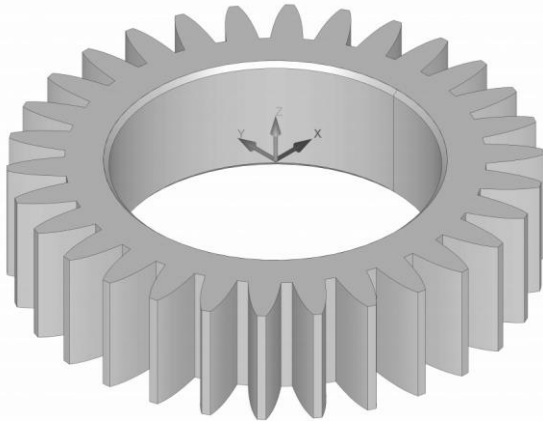


Рис. 2. Зображення 3D-моделі зубчастого колеса

2.2. Загальна інформація про засіб вимірювальної техніки

Обрано контактний метод вимірювання, що характеризується наявністю безпосереднього дотику чутливого елемента (щупу) з поверхнею досліджуваного об'єкту. Тому було обрано KBM портального типу із використанням ЧПК моделі GLOBAL S GREEN 05.07.05 (HEXAGON MANUFACTURING INTELLIGENCE, Італія) (рис. 3).

Розміри робочої зони KBM GLOBAL S GREEN 05.07.05 вздовж вісей: X – 500 мм; Y – 700 мм; Z – 500 мм.

Тип датчику: контактний з можливістю сплайнового сканування. Модель датчику: HP-S-X1H.

Тип контактного наконечнику: сферичний. Матеріал контактного наконечнику: синтетичний рубін.

Розміри наконечників:

- діаметр 2 мм, довжина 20 мм – для створення системи координат об'єкту вимірювання;
- діаметр 0,5 мм, довжина 20 мм – для вимірювання параметрів зубчастого колеса по ISO.

Для «бокових» вимірювань використано один контактний щуп з автоматичною поворотною головкою (рис. 4), що забезпечує доступ до елементів деталі під будь-яким кутом та напрямку.

Калібрування щупової оснастки проведено у напівавтоматичному режимі. Отримані дані вимірювань (дійсні габаритні розміри, форму та зміщення центру контактного щупа) було занесено до спеціалізованого метрологічного програмного забезпечення KBM (QUINDOS).

Зменшення похибки вимірювань з використанням вбудованої автоматичної процедури вимірю-

вань забезпечено однозначним позиціонуванням системи координат дослідної деталі з системою координат



Рис. 3. Координатно-вимірювальна машина моделі GLOBAL S GREEN 05.07.05



Рис. 4. Застосована «Г»-подібна щупова оснастка

KBM у її вимірювальному об'ємі. Контроль поверхонь виконано координатним (контактним) способом вимірювань, що реалізується послідовним

визначенням координат ряду точок поверхонь та крайок дослідної деталі і наступному розрахунку розмірів. Всі переміщення щупу, зони старту та фінішу вимірювань, безпечні переходи для змін кутів поворотної головки заздалегідь були визначені для кожного етапу вимірювань в автоматичному режимі програмного забезпечення КВМ.

Після налаштувань про загальну інформацію зубчастого колеса та процедури вимірювання визначалася геометрія верхньої площини колеса і першого зуба з обох боків, а також розташування головної вісі (рис. 5).

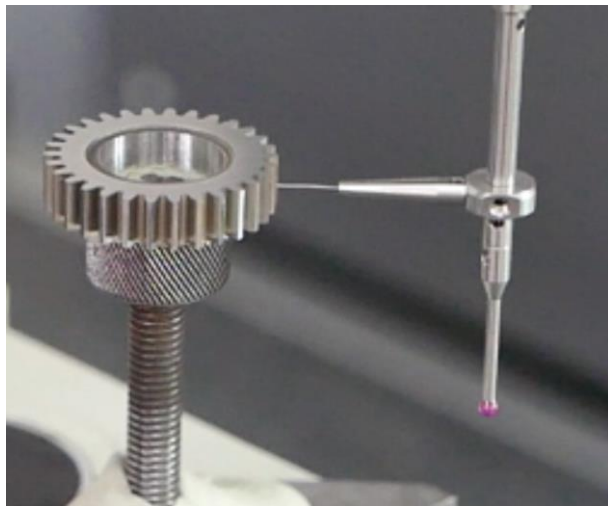


Рис. 5. Визначення геометрії першого зуба зубчастого колеса

Вимірювання профілю, напрямку і кроку зубів виконано в автоматичному режимі за наступною послідовністю: спочатку евольвенти (профіль) лівої та правої сторін зуба, потім бокові лінії – зліва та справа по всіх визначених для цього розрахунку зубах і наостанок – визначення кроку за боковими сторонами. За цими даними були розраховані похибки кроку, биття зубчастого вінця та довжина загальної нормалі.

2.3. Аналіз протоколу вимірювання та дискусія

На рис. 6 представлено результати вимірювань евольвенти (профілю) зуба – «Профіль» та результати вимірювань бокової лінії контакту зуба – «БЛК» із зазначенням основних параметрів дослідного зубчастого колеса (рис. 1). Графіки для обох параметрів мають зображення профілів (рис. 6). Для евольвенти зображені розгорнуті параболи профілю кожної половини зуба, що було виміряне. Для бокової лінії контакту зуба – пряма лінія, що відображає форму та кут нахилу лінії контакту. Чорним – зображено еталонну лінію контуру (еталонний контур,

що був розрахований програмним забезпеченням з нульовим відхиленням); сірим – зображено фактично виміряні контури; штриховою – зображено результуючу лінію, що показує відхилення для відповідних параметрів.

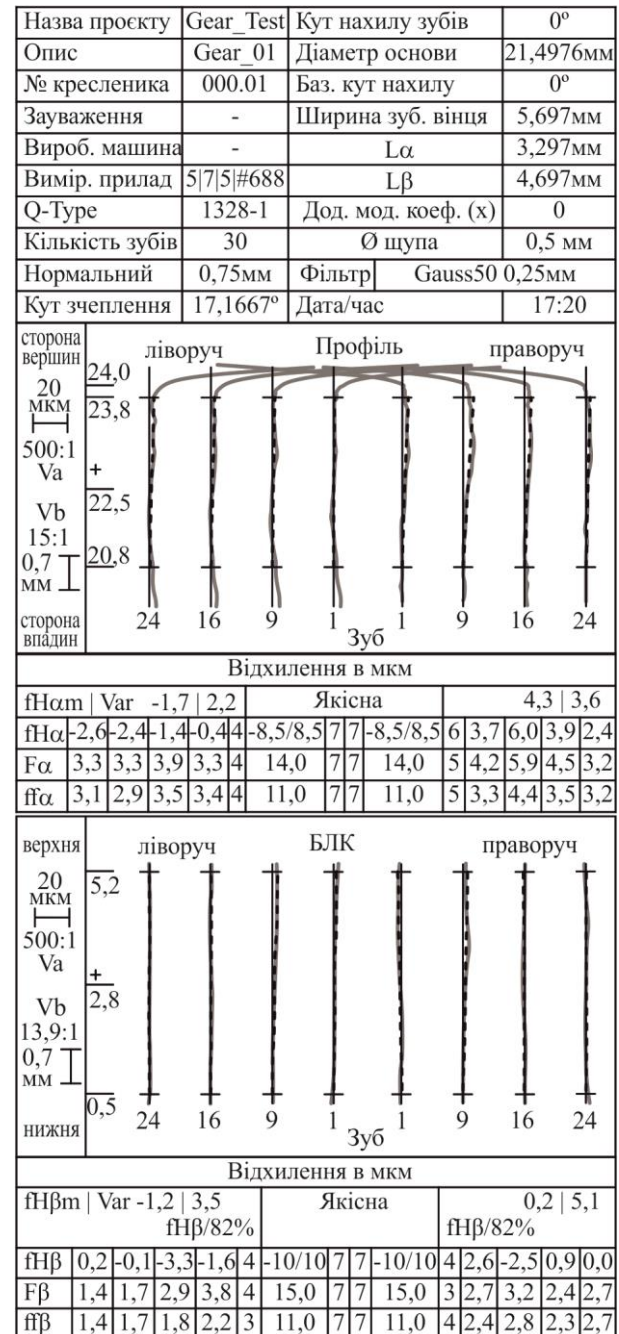


Рис. 6. Результати вимірювання евольвенти (профілю) та бокової лінії контакту (напрямку)

Графіки відхилень для кожного вимірюваного параметру (похибок кроку, окремо для лівих та правих сторін зубів зубчастого колеса та биття зубчастого вінця) зображені у вигляді «сходинок», кожна з яких є відхиленням від еталонної (середньої) лінії, що відображає величину похибки (рис. 7).

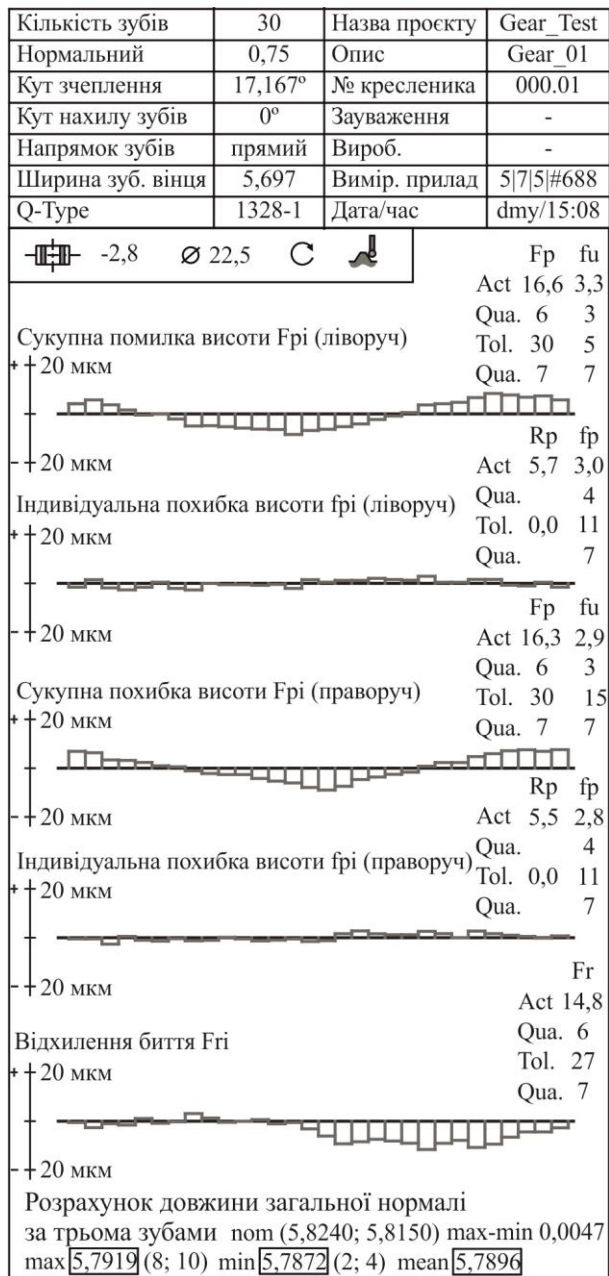


Рис. 7. Результати вимірювання похибок кроку, биття та спеціальних вимірювань

По сторонах від графіків зображено масштаб (зліва) та похибки (справа). Похибки мають вимірне значення «Act» та відповідний клас «Qua.», а також допуски «Tol.» та клас виготовлення «Qua.», що відповідає зазначеному на кресленні. Також тут містяться результати спеціальних вимірювань – розрахунок довжини загальної нормалі за трьома зубами, де:

- «nom» – номінальне значення (вказуються мінімальний та максимальний допустимі розміри);
- «max-min» – різниця між максимальним та мінімальним вимірними значеннями;

– «max» – максимальне вимірне значення довжини загальної нормалі з усіх можливих пар по всьому колу зубчастого колеса;

– «min» – мінімальне вимірне значення довжини загальної нормалі з усіх можливих пар по всьому колу зубчастого колеса;

– «mean» – середнє вимірне значення довжини загальної нормалі. Зазначимо, що у ISO 1328-1:2013 допуск на довжину загальної нормалі не визначено.

На рис. 8 показано вплив ексцентриситету на похибки кроку та биття, вказана величина зміщення центру – координати по осях X та Y.

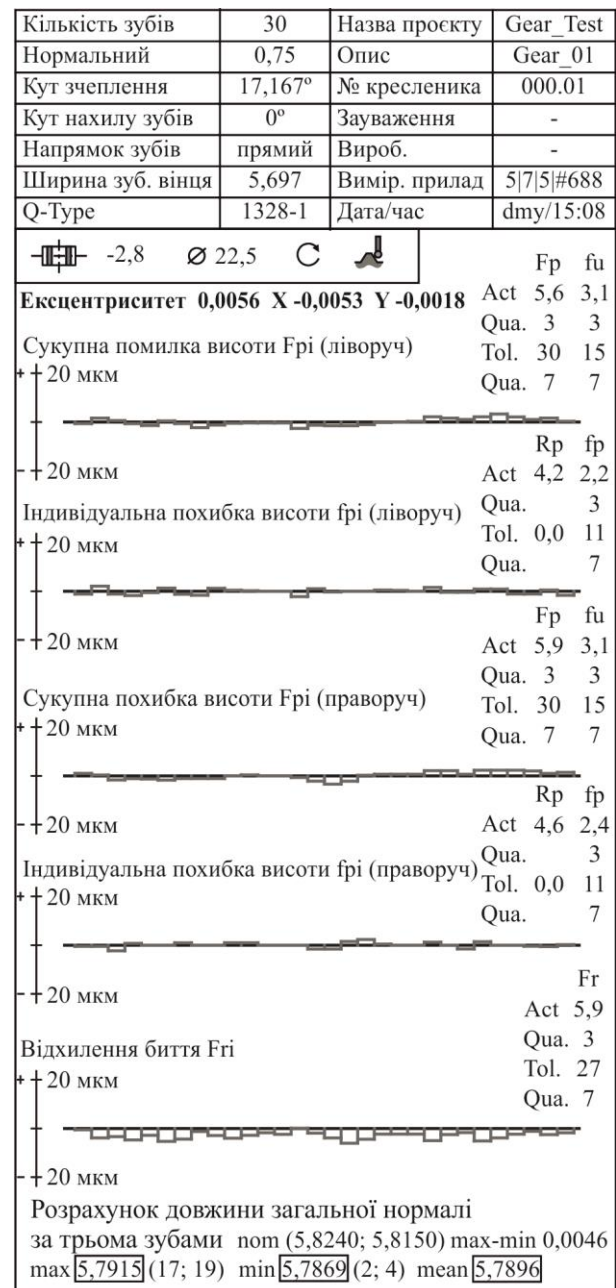


Рис. 8. Вплив ексцентриситету на похибки кроку та биття

Як видно з рис. 6 – рис. 8, в верхній частині кожного протоколу містяться дані зубчастого колеса, що контролювалися, а саме:

- «No. of teeth» – кількість зубів;
- «Norm. Module» – нормальний модуль;
- «Press Angle» – кут зачеплення;
- «Helix Angle» – кут нахилу зубів;
- «Hand of Lead» – напрямок зубів;
- «Facewidth» – ширина зубчастого вінця.

Інша текстова інформація заголовка несе службовий характер і використовується оператором КВМ для збереження даних керуючої програми.

Отримані результати вимірювань для спрощення аналізу зведено та представлено в таблиці 1. Граничними виявилися розміри «max» і «min» довжини загальної нормалі, де отримані відповідні значення реальних замірів становили 5,7919 і 5,7872 мм в порівнянні з допустимими 5,8240 і 5,8150 мм. Різниця склала для «max» 0,0321 мм і «min» 0,0278 мм. Враховуючи те, що величина довжини загальної нормалі характеризує знос зубів по товщині, а також характеризує норму бічного зазору в зубчастій передачі, то чим менше отримано різницю, тим термін служби зубчастого колеса більший.

Таблиця 1

Узагальнені результати вимірювань зубчастого колеса та їх порівняння з відповідними допусками

Параметр	Назва параметру	Допуск, мкм	Отримана похибка (ліворуч/праворуч), мкм
fHa	Похибка кута профілю	$\pm 8,5$	- 2,6 / 6,0
Fa	Загальна похибка профілю	14	3,9 / 5,9
ffa	Похибка форми профілю	11	3,5 / 3,5
fHB	Похибка кута лінії контакту	$\pm 10,0$	- 3, 3 / 2,6
FB	Загальна похибка лінії контакту	15,0	3,8 / 3,2
ffB	Похибка форми лінії контакту	11,0	2,2 / 2,8
Fp	Загальна накопичена похибка кроку	30,0	16,6 / 16,3
fp	Максимальна індив. похибка кроку	11,0	3,0 / 2,8
Fr	Радіальне биття	27,0	14,8
Span	Довжина загальної нормалі, max, мм	5,8240	5,7919
	Довжина загальної нормалі, min, мм	5,8150	5,7872

Тобто за даними таблиці 1 можна зробити висновок, що за основними параметрами профілю та напрямку зубів, а також похибками кроку – зубчасте колесо повністю відповідає 7 класу. Тому дослідному зубчастому колесу (рис. 1) дозволено пропуск у виробництво. Вимірювання та обробка результатів зайняло 10 годин часу, але КВМ дає безсумнівну достовірність результатів.

3. Висновки

Довжина загальної нормалі досліджуваної шестерні має критичну точність, що складає близько 99% від допуску на цей параметр. Тому для перевірки якості виготовлення поверхонь зубів евольвентних циліндричних коліс на практиці слід застосовувати саме таке вимірювання.

За даними вимірювань критичними постійними похибками є також загальна накопичена похибка кроку зубів, що складає 55, 3 % від допуску, а також радіальне биття робочих поверхонь, що складає 54,8 % від допуску.

Інші параметри мають досить значний запас точності розміром 20-30 %, що обумовлено технологією виготовлення шестерні.

Отримані результати досліджень підтвердили позитивність досліджень [4, 5], що набули продовження на високоточних деталях типу зубчасте колесо.

Наступними дослідженнями можуть бути поопераційний контроль виготовлення зубчастого колеса з метою визначення критичних етапів технології, на яких довжина загальної нормалі шестерні набуває критично-допустимої точності. Також предметом подальших досліджень є створення методики сумісного використання оптичного 3D-сканування та контактного методу вимірювання з метою збільшення точності вимірювання, зменшення кількості й часу вимірювань.

Внесок авторів: формулювання проблеми, мети та завдань дослідження **К. В. Майорова, В. Т. Сікульський**; аналіз літературних джерел: **С. О. Заклінський**; вимірювання зубчастого колеса та узагальнення результатів дослідження: **А. С. Суслов**; Аналіз результатів дослідження та висновки: **К. В. Майорова, В. Т. Сікульський, С. О. Заклінський**.

Конфлікт інтересів: автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування: це дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних: рукопис не має пов'язаних даних.

Використання штучного інтелекту: автори підтверджують, що під час створення представленої роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Подяки: Особлива подяка заступнику генерального директора УА ТОВ Фірни "КОДА" **Віталію БОЧАРОВУ** за підтримку у здійсненні досліджень, про які йдеться в рукописі.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією цього рукопису.

Література

1. Інформаційні та технологічні системи супроводу життєвого циклу виробів авіаційної техніки [Текст] : монографія / І. В. Бичков, К. В. Майорова, М. І. Бичков, О. В. Лосев, Г. С. Селезньова – Харків : ФОП Панов А. М., 2023. – 224 с. ISBN 978-617-8113-63-6.

2. Boral, P. Technological Aspects of Manufacturing and Control of Gears-Review. [Text] / P. Boral, R. Golebski, R. Kralikova // Materials. – 2023. – Vol. 16, iss. 23. – Article No: 7453. DOI: 10.3390/ma16237453.

3. Діхтієвський, О. В. Оцінка систематичної та випадкової складових похибки вимірювання циліндричних зубчастих коліс [Текст] / О. В. Діхтієвський, В. П. Квасніков, А. О. Возняковський // Перспективні технології та прилади. – 2019. – № 14. – С. 62-66. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2019-14-10.

4. Чалий, О. В. Автоматична корекція похибки вимірювання на координатно-вимірювальній машині [Текст] / О. В. Чалий // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. – 2024. – № 45. – С. 108-112. DOI: 10.37406/2706-9052-2024-4.15.

5. Чалий, О. В. Вимірювання складних просторових поверхонь на координатно-вимірювальній машині [Текст] / О. В. Чалий // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. – 2023. – № 4(41). – С. 62-67. DOI: 10.37406/2706-9052-2023-4.9.

6. Чалий, О. В. Дослідження чутливості датчика координатно-вимірювальної машини [Текст] / О. В. Чалий, Д. Т. Сірий // Проблеми інформатизації та управління. – 2024. – Том 3, № 79. – С. 88-92. Режим доступу: <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/PIU/article/view/19376> (дата звернення: 31.12.2024).

7. Dihtievskiy, O., Analysis of the methods of measurement of the cylindrical gear involute [Text] / O. Dihtievskiy, V. Kvasnikov // Technology Audit and Production Reserves. – 2018. – Vol. 2, no. 2(46)

(2019). – P. 19-24. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.168713.

8. Recent Inventions in Additive Manufacturing: Holistic Review [Текст] / I. Fidan, O. Huseynov, M. A. Ali, S. Alkunte, M. Rajeshirke, A. Gupta, S. Hasanov, K. Tantawi, E. Yasa, O. Yilmaz, J. Loy, V. Popov, & A. Sharma // Inventions. – 2023. – Vol. 8, iss. 4. – Article No: 103. DOI: 10.3390/inventions8040103.

9. Реверсивний інжиніринг та впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій [Текст] / О. А. Пермяков, І. Е. Яковенко, О. С. Скиба, П. Южкович // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – 2023. – № 2(8). – С. 91-99. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2(8).10.

10. Аналіз використання технології реверс-інжинірингу [Текст] / І. Бичков, К. Майорова, В. Сікульський, В. Малащенко, М. Бичков // Grail of Science. – 2023. – № 31. – С. 258-260. DOI: 10.36074/grail-of-science.15.09.2023.41.

11. Сучасний підхід до технологічного забезпечення виготовлення зубчастих коліс та адитивні АМ-технології [Текст] / О. О. Ключко, О. Ю. Зако-воротний, О. В. Набока, Ю. М. Главчева, & Ф. М. Євсюкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – 2024. – №1 (9). – С. 82-90. DOI: 10.20998/2079-004X.2024.1(9).11.

12. Chen, Y.-C. Optical Inspection System for Gear Tooth Surfaces Using a Projection Moiré Method [Text] / Y.-C. Chen, J.-Y. Chen // Sensors. – 2019. – Vol. 19, iss. 6. – Article No. 1450. DOI: 10.3390/s19061450.

13. ДСТУ ISO 1328-1:2006 (ISO 1328-1:1995, IDT) Колеса зубчасті циліндричні. Система точності ISO. Частина 1. Терміни та визначення понять і встановлені допуски відхилень бічних поверхонь зубців зубчастого колеса [Текст]. – [Чинний від 2007-10-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 34 с.

References

1. Bychkov, I. V., Mayorova, K. V., Bychkov, M. I., Losev O. V., & Seleznevova H. S. Informatsiyni ta tekhnolohichni systemy suprovodu zhyttyevoho tsyklu vyrobiv aviatsiynoyi tekhniki. monohrafiya [Information and technological systems for supporting the life cycle of aviation products. monograph]. Kharkiv, FOP Panov A. M. Publ., 2023. 224 p. ISBN 978-617-8113-63-6. (In Ukrainian).

2. Boral, P., Golebski, R., & Kralikova, R. Technological Aspects of Manufacturing and Control of Gears-Review. Materials, 2023, vol. 16, iss. 23, article no. 7453. DOI: 10.3390/ma16237453.

3. Dikhtyevskyy, O. V., Kvasnikov, V. P., & Voznyakovskyy, A. O. Otsinka systematichnoyi ta vypadkovoyi skladovyykh pokhybky vymiryuvannya tsylind-rychnykh zubchastykh kolis [Estimation of the systematic and random component of the measurement error of cylindrical gear wheels]. Perspektyvni

tekhnohiiyi ta prylady – Perspective technologies and devices, 2019, no. 14, pp. 62-66. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2019-14-10. (In Ukrainian).

4. Chalyy, O. V. Avtomatychna korektsiya pokhybky vymiryuvannya na koordynatno-vymiryuval'niy mashyni [Automatic error correction in measurements on coordinate measuring machines]. *Podil's'kyi visnyk: sil's'ke hospodarstvo, tekhnika, ekonomika*, 2024, no. 45, pp. 108-112. DOI: 10.37406/2706-9052-2024-4.15. (In Ukrainian).

5. Chalyy, O. V. Vymiryuvannya skladnykh prostoro-rovnykh poverkhon' na koordynatno-vymiryuval'niy mashyni [Measurement of complex spatial surfaces on a coordinate measuring machine]. *Podil's'kyi visnyk: sil's'ke hospodarstvo, tekhnika, ekonomika*, 2023, no. 4(41), pp. 62-67. DOI: 10.37406/2706-9052-2023-4.9. (In Ukrainian).

6. Chalyy, O. V., & Siryy, D. T. Doslidzhennya chutlyvosti datchyka koordynatno-vymiryuval'noyi mashyny [Increasing the sensitivity of the sensor of the coordinate machine]. *Problemy informatyzatsiyi ta upravlinnya*, 2024, vol. 3, no. 79, pp. 88-92. Available at: <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/PIU/article/view/19376> (accessed: December 31, 2024). (In Ukrainian).

7. Dihtievskiy, O., & Kvasnikov, V. Analysis of the methods of measurement of the cylindrical gear involute. *Technology Audit and Production Reserves*, 2018, vol. 2, no. 2(46) (2019), pp. 19-24. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.168713.

8. Fidan, I., Huseynov, O., Ali, M. A., Alkunte, S., Rajeshirke, M., Gupta, A., Hasanov, S., Tantawi, K., Yasa, E., Yilmaz, O., Loy, J., Popov, V., & Sharma, A. Recent Inventions in Additive Manufacturing: Holistic Review. *Inventions*, 2023, vol. 8, iss. 4, article no. 103. DOI: 10.3390/inventions8040103.

9. Permyakov, O. A., Yakovenko, I. E., Skyba, O. S., & Yuzhkovych, P. Reversyvnnyy inzhynirynh ta vprovadzhennya suchasnykh metodiv i zasobiv kontrol'-

nykh operatsiy [Reverse engineering and implementation of modern methods and means of control operations]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI» Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*, 2023, no. 2(8), pp. 91-99. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2(8).10. (In Ukrainian).

10. Bychkov, I., Mayorova, K., Sikul's'kyy, V., Malashenko, V., & Bychkov, M. Analiz vykorystannya tekhnolohiyi revers-inzhynirynhu [Analysis of the use of reverse engineering technologies]. *Grail of Science*, 2023, no. 31, pp. 258-260. DOI: 10.36074/grail-of-science.15.09.2023.41. (In Ukrainian).

11. Klochko, O. O., Zakovorotnyy, O. Yu., Naboka, O. V., Hlavcheva, Yu. M., & Yevsyukova, F. M. Suchasnyy pidkhid do tekhnolohi-chnoho zabezpechennya vyhotovlennya zubchastykh kolis ta adytyvni AM-tekhnolohiyi [A modern approach to the technological support of the manufacture of gear wheels and additive AM-technologies]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*, 2024, no. 1(9), pp. 82-90. DOI: 10.20998/2079-004X.2024.1(9).11. (In Ukrainian).

12. Chen, Y.-C., & Chen, J.-Y. Optical Inspection System for Gear Tooth Surfaces Using a Projection Moiré Method. *Sensors*, 2019, vol. 19, iss. 6, article no. 1450. DOI: 10.3390/s19061450.

13. DSTU ISO 1328-1:2006 (ISO 1328-1:1995, IDT) *Kolesa zubchasti tsylindrychni. Systema tochnosti ISO. Chastyna 1. Termyny ta vyznachennya ponyat' i vstanovleni dopusky vidkhylen' bichnykh poverkhon' zubtsiv zubchastoho kolesa* [State Standard of Ukraine ISO 1328-1:2006 (ISO 1328-1:1995, IDT) Cylindrical gears – ISO system of accuracy – Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth], [Chynnyy vid 2007-10-01], Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2009. 34 p. (In Ukrainian).

Надійшла до редакції 10.01.2025, розглянута на редколегії 20.01.2025

RESEARCH ON THE METHOD OF GEAR CONTROL USING A COORDINATE MEASURING MACHINE

Valeriy Sikul'skiy, Kateryna Maiorova,
Sergiy Zaklinskyy, Artem Suslov

The subject of study in this article is the approbation of theoretical and technical solutions for the use of coordinate-measuring machines (CMM) in the implementation of technical inspections of the parameters of high-precision gear-type parts. **The purpose** of the article is to study the systematic errors in the geometric accuracy of the gear wheel surfaces and edges by the contact measurement method using the chosen CMM. **Methods of research** are empirical – analysis of existing and widespread methods of measurement, full-scale experiments, and inspection. **The research tasks** are to measure the gear wheel involute (profile) and the lateral line (direction) of contact, pitch errors (separately) on the left and right sides of the gear teeth, gear ring runout, and to determine the influence of eccentricity on pitch and runout errors. Additionally, the study aims to check the studied gear wheel for compliance with the 7th degree of accuracy according to DSTU ISO 1328-1:2006. **The methods** used are: empirical and theoretical methods of measurement, comparison, and analysis. **The results of the study** presented in the article: indicate that the length of the studied gear common normal has a critical accuracy, which is about 99% of the tolerance for this parameter. Therefore in practice, to check the quality of manufacturing of the teeth surfaces of the involute cylindrical gears, it is necessary to use the contact measurement method, which involves the direct contact of the sensitive element (probe) with the surface of the examined object, as it provides accuracy up to 1,5μm, which

in turn, minimizes the risks of part rejection as spoilage. **Conclusions:** According to the technical inspection data, it was determined that the critical systematic error is affected by the total accumulated error of the tooth pitch, which is 55.3% of the tolerance, as well as the radial runout of the working surfaces, which is 54.8% of the tolerance. It should be noted that other parameters maintain a margin of accuracy of 20-30%. This can be attributed to the degree of compliance with the manufacturing technology of the experimental gear sample. **The following research** may involve post-operational inspection at each step of gear manufacturing in order to determine the critical stages of the technology where the length of the gear common normal acquires a critically acceptable accuracy. Furthermore, the subject of further research is the creation of a methodology for the combined use of optical 3D scanning and the contact measurement method in order to enhance measurement accuracy while reducing time and scope of measurements.

Keywords: gear; coordinate-measuring machine; measurement; geometric accuracy; technical inspection; tolerance.

Сікульський Валерій Терентійович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Майорова Катерина Володимирівна – канд. техн. наук, доц., зав. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Заклінський Сергій Олександрович – канд. техн. наук, доц. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Суслов Артем Сергійович – асп. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Valeriy Sikulskiy – Doctor of Technical Science, Full Professor, Professor at the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vsikulskij@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5944-4728, Scopus Author ID: 57196123305.

Kateryna Maiorova – PhD, Associate Professor, Head of the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kate.majorova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3949-0791, Scopus Author ID: 57204427689.

Sergiy Zaklinsky – PhD, Associate Professor at the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.zaklinskyi@khai.edu, ORCID: 0000-0003-3287-5795, Scopus Author ID: 57204572302.

Artem Suslov – PhD Student of the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: artem.suslov.181@gmail.com, ORCID: 0009-0002-1831-1862.