

УДК 621.833:531.7:629.7.05

doi: 10.32620/aktt.2025.4.08

К. В. МАЙОРОВА¹, В. А. КАЛІНІЧЕНКО^{2,3}, В. Б. БОЧАРОВ^{2,3},
І. О. ВОРОНЬКО¹, М. І. БИЧКОВ¹

¹ Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

² Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

³ ТОВ Фірма «КОДА», Харків, Україна

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО МЕТРОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС РЕДУКТОРІВ У ВАЖКИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Предметом вивчення є метрологічне забезпечення точності виготовлення зубчастих коліс великого діаметра, які є ключовими елементами важконавантажених редукторів, що використовуються в умовах підвищених навантажень, високих температур і динамічних коливань. Ці механізми критично важливі для забезпечення надійності промислового обладнання, і їхній вихід з ладу може призвести до значних технічних і економічних втрат. **Метою** є дослідження чинників, які впливають на точність геометричних параметрів зубчастих коліс, а також обґрунтування ефективних методів контролю якості цих елементів за допомогою сучасного вимірювального обладнання. **Завданням** є аналіз нормативної бази України та міжнародних стандартів, оцінка сучасних засобів вимірювання, вивчення можливостей автоматизованих координатно-вимірювальних машин (КВМ), а також виявлення тенденцій розвитку цифрових технологій у сфері контролю. **Використовуваними методами** є аналіз нормативних документів (ДСТУ, ISO), порівняння функціоналу вимірювальних систем, оцінка точності результатів за допомогою графічного і топографічного відображення протоколів вимірювання, моделювання впливу похибок на ресурс редуктора. **Наукова новизна** полягає в узагальненні сучасних методів контролю геометрії великих зубчастих коліс, обґрунтуванні ефективності застосування КВМ і цифрових технологій вимірювання, а також у системному аналізі стандартів і тенденцій метрологічного забезпечення в умовах важконавантажених редукторів. Отримані такі **результати**: доведено доцільність застосування КВМ для точного контролю профілю зуба, кроку, товщини та інших геометричних параметрів; обґрунтовано ефективність використання програмного забезпечення для формування протоколів; виявлено роль цифрових технологій, таких як лазерне сканування, оптичні системи, штучний інтелект і комп'ютерна томографія у підвищенні точності та інформативності результатів вимірювання. **Висновки**: точність зубчастих коліс є критичним чинником у підвищенні ресурсу та надійності редукторів, тому сучасне метрологічне забезпечення має базуватись на комплексному підході із застосуванням високотехнологічних систем контролю, цифрових алгоритмів аналізу даних і автоматизації процесів, що є запорукою якості вітчизняного машинобудування.

Ключові слова: метрологічне забезпечення; зубчасті колеса; важконавантажені редуктори; координатно-вимірювальні машини (КВМ); точність геометричних параметрів; цифрові вимірювальні технології.

1. Вступ

1.1. Мотиваційне дослідження

У сучасному машинобудуванні надійність і довговічність редукторів, особливо важконавантажених, є критичними параметрами, що визначають ефективність і безпеку роботи промислового обладнання. Зубчасті передачі, як основні силові елементи редукторів, зазнають значних навантажень і працюють в екстремальних умовах, що потребує високого рівня точності

виготовлення та суворого контролю їх геометричних параметрів.

Мотивацією до проведення цього дослідження стала необхідність забезпечення надійної та стабільної роботи редукторів у відповідальних механізмах, зокрема в енергетичній, гірничодобувній, металургійній, транспортній та авіаційній галузях. Аналіз статистики відмов показує, що значна частка дефектів виникає через недостатній рівень метрологічного забезпечення на етапі виготовлення зубчастих коліс, зокрема для деталей великого діаметра. У той же час, вимоги до



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

навантажувальної здатності та точності зростають, що підвищує роль сучасних методів вимірювання, автоматизованих систем контролю і програмного забезпечення в системі управління якістю.

Це дослідження має на меті систематизувати сучасні підходи до контролю якості зубчастих коліс, висвітлити актуальні проблеми вимірювання великогабаритних елементів і проаналізувати ефективність сучасного вимірювального обладнання та програмного забезпечення. Практичний інтерес становить і вивчення нормативної бази, яка забезпечує вимоги до точності, а також шляхів її гармонізації з міжнародними стандартами.

1.2. Сучасний стан

Проблема забезпечення точності виготовлення та контролю якості зубчастих коліс важконавантажених редукторів є однією з пріоритетних задач, що потребує якнайскорішого вирішення. Зубчасті передачі залишаються основними елементами силової трансмісії в промислових редукторних системах, що експлуатуються в умовах високих навантажень та складних температурно-вібраційних режимів [1]. Редуктори, особливо великогабаритні, повинні відповідати жорстким вимогам до точності геометричних параметрів, що обумовлює необхідність впровадження комплексного метрологічного забезпечення на всіх етапах життєвого циклу виробу.

Класичні методи контролю параметрів зубчастих коліс, що включають шаблонно-індикаторні прилади, нормалеміри, крокоміри, не відповідають сучасним вимогам точності, відтворюваності та автоматизації [2]. Особливо це стосується коліс із діаметром понад 600 мм, для яких ручні методи вимірювання стають технічно складними через інерційність, деформації, температурні розширення та труднощі з організацією базування [3].

На зміну традиційним засобам приходять координатно-вимірювальні машини (КВМ), зокрема портального, мостового та спеціалізованого типів, що здатні працювати в трьох- та чотиривісних конфігураціях і досягати розширеної невизначеності вимірювання до 0,5 мкм [4]. Для об'єктів великого діаметра застосовуються портативні лазерні трекери, оптико-електронні сканери, а також координатно-вимірювальні «руки», що дають змогу проводити контроль у виробничих умовах або на етапі монтажу обладнання [5].

Інформаційна обробка результатів вимірювань здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Найбільш поширені рішення – QUINDOS, PC-DMIS Gear (Hexagon), ZEISS Gear Pro, Klingelnberg Gear Data – забезпечують контроль до 36 параметрів зубчастого колеса згідно з міжнародними

стандартами ISO 1328-1 [6], ISO 1328-2 [7] та AGMA 2015-1-A01 [8]. Важливими характеристиками сучасного ПЗ є підтримка великогабаритних коліс (діаметром до 12 000 мм), автоматизація вимірювального циклу, формування топографії профілю зуба та можливість створення повного протоколу оцінювання.

Національні стандарти України, гармонізовані з міжнародними, регламентують терміни, технічні вимоги та методи випробування редукторів. Наприклад, ДСТУ 2280-93, ДСТУ ISO 10825:2008, ДСТУ ISO 1328-1:2006, ДСТУ ISO 18653:2009. Проте на практиці їх реалізація залишається частковою, що пояснюється як технологічними, так і організаційними труднощами на вітчизняних підприємствах [9].

Еталонна база для калібрування засобів вимірювання великих зубчастих коліс розвивається повільно. Українські лабораторії переважно не оснащені відповідними високоточними калібраторами, що ускладнює відстежуваність результатів вимірювання.

Таким чином, вітчизняне машинобудування потребує як технологічного переоснащення, так і розвитку інженерної та метрологічної компетентності в галузі контролю точності зубчастих коліс. Сучасні тенденції вказують на необхідність інтеграції CAD/CAE/CAM/CAQ-систем, впровадження штучного інтелекту та прогностичного аналізу для керування якістю та довговічністю важконавантажених редукторів [10].

1.3. Об'єкт, мета та завдання дослідження

Об'єктом дослідження є зубчасті колеса великого діаметра, що застосовуються у важконавантажених редукторах промислового призначення та експлуатуються в умовах високих навантажень, температурних коливань і вібраційних впливів.

Метою дослідження є обґрунтування сучасних методів метрологічного забезпечення точності виготовлення та контролю геометричних параметрів зубчастих коліс для підвищення ресурсу та надійності редукторних систем.

Для досягнення мети поставлено такі основні завдання:

- систематизувати існуючі проблеми у вимірюванні та контролі великих зубчастих коліс;
- проаналізувати ефективність класичних і сучасних засобів контролю;
- дослідити переваги автоматизованих координатно-вимірювальних машин (КВМ), лазерних трекерів та вимірювальних рук;
- оцінити роль програмного забезпечення у побудові протоколів контролю та аналізі вимірювальних даних;

– сформувані рекомендації щодо вдосконалення національної метрологічної інфраструктури.

1.4. Підхід

У статті використано комплексний підхід, що поєднує:

- аналіз вітчизняної та міжнародної нормативної бази (ДСТУ, ISO, AGMA, DIN);
- порівняння функціональних можливостей сучасного вимірювального обладнання;
- графічне та цифрове дослідження точності за допомогою прикладів протоколів вимірювання;
- моделювання впливу похибок на роботу зубчастої пари;
- вивчення можливостей інтеграції систем вимірювання в CAD/CAM/CAQ-середовища.

Цей підхід дозволяє не лише кількісно оцінити точність геометричних параметрів, але й обґрунтувати ефективність впровадження цифрових технологій у метрологічний контроль редукторних передач.

2. Конструкція та класифікація редукторів

Механічний редуктор призначений для зниження кутової швидкості обертання вхідного валу та одночасного збільшення крутного моменту на вихідному валу [11]. Передача руху в редукторі здійснюється за допомогою однієї або кількох ступенів механічних передач, серед яких найпоширенішими є зубчасті передачі.

Загальна конструкція редуктора включає корпус, у якому на підшипникових опорах розміщуються вали та зубчасті колеса. Корпус може бути як нероз'ємним, так і роз'ємним, і виготовляється із чавуну, алюмінієвих сплавів або, в окремих випадках, зі сталі [12]. У конструкції передбачені технологічні отвори для заливання й зливу мастила, оглядові люки, а також кріплення для вузлів змащення та охолодження. Для важконавантажених редукторів використовуються підшипники ковзання або кочення.

З'єднання валів із зовнішніми елементами здійснюється за допомогою вхідних та вихідних муфт. Окрім основних елементів, редуктор містить допоміжні вузли: шпонки, ущільнювачі, сальники, прокладки, регулювальні кільця тощо.

Класифікація редукторів наведена в таблиці 1. Традиційно редуктор поділяють [13] за типом зубчастої передачі, за кількістю ступенів передачі, за взаємним розташуванням вісій валів відносно один одного та їх розташування в просторі. Практичні приклади конструктивного виконання різних типів редукторів наведено на рис. 1 і рис. 2 [14].

Таблиця 1

Класифікація редукторів

Ознака класифікації	Класи / Типи редукторів
Тип зубчастої передачі	– Циліндричні, – Конічні, – Черв'ячні, – Планетарні, – Хвильові, – Гіпоїдні.
Кількість ступенів передачі	– Одноступеневі, – Двоступеневі, – Багатоступеневі.
Взаємне розташування осей валів	– Паралельні (циліндричні), – Перехрещені (конічні, черв'ячні), – Співвісні (планетарні, хвильові).
Просторове розміщення валів	– Горизонтальне, – Вертикальне, – Комбіноване.

2.1. Основні технічні параметри редукторів

Характеристики редукторів визначаються наступними параметрами:

а) кінематичними:

- передатне відношення u ;
- частота обертання вихідного вала n ;

б) динамічними:

- крутний момент;
- консольне навантаження на вихідному валу;
- с) коефіцієнтом корисної дії η (ККД).

До основних технічних характеристик редукторів відносять наступні параметри:

1. Головний параметр редуктора – визначає габарити, вагу та здатність до навантаження. В залежності від типу редуктора, це різні параметри, наприклад, для конічних редукторів – номінальний зовнішній ділильний діаметр d_{e2} колеса.

2. Номінальний крутний момент на тихохідному валу T, H ;

3. Номінальне радіальне консольне навантаження, прикладене до середини посадкової поверхні вихідного кінця швидкохідного вала F_1, H .

4. Номінальне радіальне консольне навантаження, прикладене до середини посадкової поверхні вихідного кінця тихохідного вала F_2, H .

5. Номінальне передавальне відношення редуктора і допустиме його відхилення, %;

6. Номінальна частота обертання швидкохідного вала n_1 , об/хв;

7. Розрахунковий ресурс t_{Σ} , год;

8. Коефіцієнт корисної дії, η ;

9. Шумові характеристики;



Рис. 1. Ілюстрації типів редукторів: а – двоступеневий циліндричний редуктор, вісі паралельні; б – одноступеневий конічний редуктор, вісі перехрещуються; в – одноступеневий черв'ячний редуктор, вісі перехрещуються; г – планетарний редуктор, вісі співвісні

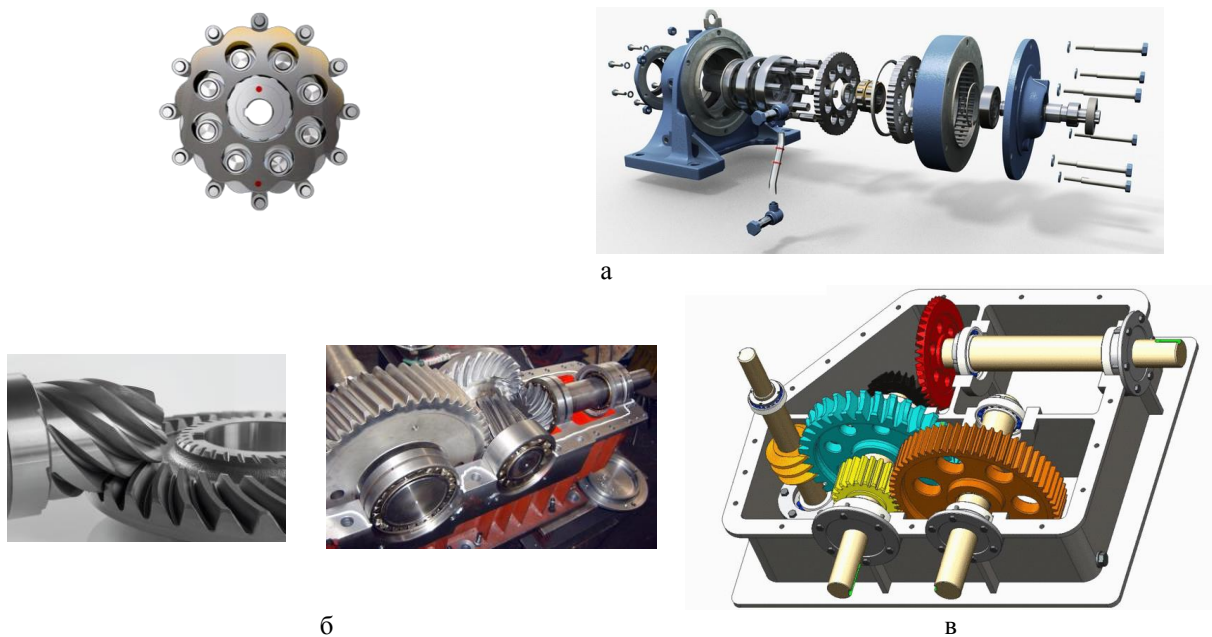


Рис. 2. Комбіновані типи редукторів: а – хвильовий редуктор, вісі співвісні; б – гепоїдний редуктор, комбінована схема розташуванні вісей; в – комбінований редуктор, комбінована схема розташуванні вісей

10. Габаритні та приєднувальні розміри;
11. Маса, кг;
12. Потрібний об'єм мастильного матеріалу.

2.2. Основні проблеми втрати надійності та зменшення ресурсу редукторів

До основних причин які зменшують надійність та призводять до виходу з ладу редукторів, можна вважати наступні:

- помилки проектуванні конструкції редукторів;
- недостатня точність виготовлення конструкційних елементів;
- невірний вибір матеріалів та методів їх обробки;
- порушення технології виготовлення та складання вузлів;
- порушення умов експлуатації та режимів роботи редуктора.

Це призводить до типових дефектів [15] та руйнації вузлів, до яких слід віднести:

- викришування робочих поверхонь зубів у циліндричних і конічних зубчатих колесах;
- тріщина біля основи зуба або його поломка в циліндричних та конічних колесах;
- потоншення зуба за рахунок зносу товщини в небезпечному перерізі або зламвання зуба в черв'ячних колесах;
- тріщина в гнучкому колесі у хвильових редукторах;
- викришування на робочих поверхнях тіл кочення (валів, роликів, куль тощо)
- руйнація підшипників кочення та ущільнюючих сальників.

Це не повний перелік можливих дефектів, проте всіх їх об'єднує одна річ – вони можуть буту усу-ненні, ще на стадії виготовлення редуктора при якісному метрологічному забезпеченні виробництва.

3. Метрологічне забезпечення

Головною проблемою машино- та авіабудівництва завжди є підвищення якості та ресурсу роботи продукції, що випускається, зокрема крупномодульних зубчастих передач важконавантажених редукторів. Їхні експлуатаційні характеристики – межа витривалості, зносостійкість, коефіцієнт тертя, контактна жорсткість, міцність, довговічність, вібраційні навантаження, шумові ефекти – безпосередньо залежать від точності геометричних параметрів зубчастих коліс.

Правильна організація метрологічного забезпечення дозволяє досягти зазначених технічних вимог. Метрологічне забезпечення виробництва є невід'ємною складовою системи управління якістю на машинобудівному підприємстві й однією з основних передумов забезпечення високої якості готової продукції.

Існує кілька термінологічних визначень поняття «метрологічне забезпечення», серед яких:

- практичне застосування положень метрології;
- встановлення та застосування наукових і організаційних основ, технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності та необхідної точності вимірювань;
- діяльність метрологічних та інших служб, спрямована на створення еталонної бази, еталонних і робочих засобів вимірювань; правильний вибір і застосування цих засобів; розроблення та впровадження метрологічних норм і правил; виконання метрологічних робіт, необхідних для забезпечення достовірності вимірювань у виробництві;

- систематизована сукупність засобів і методів, спрямованих на отримання інформації про величини, що характеризують властивості матеріальних об'єктів, необхідної для прийняття рішень щодо введення об'єкта управління до цільового стану.

Метрологічне забезпечення базується на трьох фундаментальних засадах:

- основні положення теоретичної та прикладної метрології;
- нормативно-правові акти у сфері метрології;
- діяльність метрологічних служб і принципи їхньої роботи, спрямовані на досягнення якості продукції.

Для ефективної організації метрологічного забезпечення на підприємстві необхідно виконати такі завдання:

1. Забезпечити єдність вимірювань на всіх етапах: розробки, виробництва та випробувань продукції.
2. Проаналізувати та встановити раціональну номенклатуру параметрів, що підлягають вимірюванню, а також оптимальні норми точності при контролі якості продукції, технологічних процесів та характеристик обладнання.
3. Організувати метрологічне обслуговування засобів вимірювальної техніки та допоміжного устаткування: облік, зберігання, калібрування.
4. Розробити та впровадити методики виконання вимірювань у виробничі процеси.
5. Забезпечити функціонування метрологічного забезпечення у всіх підрозділах підприємства.
6. Проводити метрологічну експертизу конструкторської документації.
7. Впроваджувати сучасні засоби вимірювань, автоматизоване контрольно-вимірювальне обладнання та вимірювальні системи.

3.1. Національні стандарти, щодо редукторів

В першу чергу відзначимо, що Україна невинно інтегрується в міжнародну метрологічну діяльність, шляхом гармонізації національних стандартів з європейськими стандартами та стандартами усталеної практики, з одночасною відміною застарілих підходів та стандартів. Наказом ДП «УкрНДНЦ» від 28 грудня 2022 року № 285, «Про пакетне прийняття європейських нормативних документів CEN/CENELEC» було впроваджено рішення про одночасне масове запровадження понад 20 000 європейських стандартів як національних стандартів України [16]. Перелік стандартів, що встановлюють вимоги саме до редукторів наведено нижче.

1. ДСТУ 2279-93 (ГОСТ 25484-93) Мотор-редуктори зубчасті. Загальні технічні умови.

2. ДСТУ 2280-93 (ГОСТ 16162-93) Редуктори зубчасті. Загальні технічні умови.

3. ДСТУ 2329-93 Редуктори та мотор-редуктори зубчасті. Терміни та визначення.

4. ДСТУ 2743-94 (ГОСТ 26543-94) Мотор-редуктори планетарні. Основні параметри.

5. ДСТУ 2746-94 (ГОСТ 30164-94) Редуктори і мотор-редуктори зубчасті. Приводи блоково-модульні. Конструктивні виконання за способом монтажу.

6. ДСТУ 2747-94 (ГОСТ 20373-94) Редуктори і мотор-редуктори зубчасті. Варіанти складання.

7. ДСТУ 2748-94 (ГОСТ 26218-94) Редуктори і мотор-редуктори хвильові зубчасті. Параметри та розміри.

8. ДСТУ 3107-95 (ГОСТ 25301-95) Редуктори циліндричні. Параметри.

9. ДСТУ 3110-95 Редуктори, мотор-редуктори, варіатори і мотор-барабани. Номенклатура показників.

10. ДСТУ 3599-97 (ГОСТ 27142-97) Редуктори конічні та конічно-циліндричні. Параметри.

11. ДСТУ EN 61400-4:2022 (EN 61400-4:2013, IDT; IEC 61400-4:2012, IDT) Вітряні турбіни. Частина 4. Вимоги до конструкції редукторів вітрових турбін.

12. ДСТУ ISO 10825:2008 Передачі зубчасті. Спрацювання та пошкодження зубців зубчастих коліс. Термінологія (ISO 10825:1995, IDT).

13. ДСТУ ISO 1122-1:2006 Передачі зубчасті. Словник термінів. Частина 1. Визначення, що стосуються геометрії (ISO 1122-1:1998, IDT).

14. ДСТУ ISO 1122-2:2006 Передачі зубчасті. Словник термінів. Частина 2. Визначення, що стосуються геометрії черв'ячних передач (ISO 1122-2:1999, IDT).

15. ДСТУ ISO 1328-1:2006 Колеса зубчасті циліндричні. Системи точності ISO. Частина 1. Терміни та визначення понять і встановлені допуски відхилень бокових поверхонь зубців зубчастого колеса (ISO 1328-1:1995, IDT).

16. ДСТУ ISO 1328-2:2006 Колеса зубчасті циліндричні. Системи точності ISO. Частина 2. Терміни та визначення понять і встановлені допуски відхилень радіальних складників і биття (ISO 1328-2:1997, IDT).

17. ДСТУ ISO 1340:2008 Передачі зубчасті циліндричні. Параметри, необхідні виробнику для виготовлення зубчастої передачі на замовлення (ISO 1340:1976, IDT).

18. ДСТУ ISO 1341:2007 Передачі зубчасті конічні прямозубі. Параметри, необхідні виробнику для виготовлення зубчастої передачі на замовлення (ISO 1341:1976, IDT).

19. ДСТУ ISO 13691:2010 Нафтова та газова промисловість. Редуктори зубчасті високошвидкісні спеціальної призначеності. Загальні технічні вимоги (ISO 13691:2001, IDT).

20. ДСТУ ISO 14635-1:2010 Передачі зубчасті. Методи випробування FZG. Частина 1. Метод випробування FZG A/8,3/90 для визначення відносної навантажувальної здатності оливи з умови відсутності заїдання (ISO 14635-1:2000, IDT).

21. ДСТУ ISO 14635-2:2010 Передачі зубчасті. Методи випробування FZG. Частина 2. Метод випробування FZG A10/16,6 R/120 зі ступеневим навантаженням для визначення відносної навантажувальної здатності оливи надвисокого тиску з умови відсутності заїдання (ISO 14635-2:2004, IDT).

22. ДСТУ ISO 14635-3:2010 Передачі зубчасті. Методи випробування FZG. Частина 3. Метод випробування FZG A/2,8/50 для визначення відносної навантажувальної здатності та характеристик зношування напіврідких мастильних матеріалів з умови відсутності заїдання (ISO 14635-3:2005, IDT).

23. ДСТУ ISO 17485:2008 Передачі зубчасті конічні. Система точності ISO (ISO 17485:2006, IDT).

24. ДСТУ ISO 18653:2009 Передачі зубчасті. Прилади для вимірювання окремих зубчастих коліс. Методи оцінювання точності (ISO 18653:2003, IDT).

25. ДСТУ ISO 23509:2010 Передачі зубчасті конічні та гіпоідні. Розрахунок геометрії (ISO 23509:2006, IDT).

26. ДСТУ ISO 53-2001 Передачі зубчасті циліндричні для загального і важкого машинобудування. Стандартний вихідний контур (ISO 53:1998, IDT).

27. ДСТУ ISO 54-2001 Передачі зубчасті циліндричні для загального і важкого машинобудування. Модулі (ISO 54:1996, IDT).

28. ДСТУ ISO 677:2007 Передачі зубчасті конічні прямозубі для загального і важкого машинобудування. Вихідний контур (ISO 677:1976, IDT).

29. ДСТУ ISO 678:2007 Передачі зубчасті конічні прямозубі для загального і важкого машинобудування. Модулі і діаметральні пітчі (ISO 678:1976, IDT).

30. ДСТУ ISO 8579-2:2008 Правила приймання зубчастих передач. Частина 2. Визначення механічної вібрації редукторів під час приймальних випробувань (ISO 8579-2:1993, IDT).

31. ДСТУ ISO/TR 10064-1:2006 Колеса зубчасті циліндричні. Правила контролю. Частина 1. Контроль однойменних профілів зубців зубчастих коліс (ISO/TR 10064-1:1992, IDT).

32. ДСТУ ISO/TR 10064-2:2006 Передачі циліндричні зубчасті. Правила приймання. Частина 2. Перевірка вимірювальної міжосьової відстані, биття, товщина зуба і бічного зазору (ISO/TR 10064-2:1996, IDT).

33. ДСТУ ISO/TR 10064-3:2005 Передачі циліндричні зубчасті. Правила приймання. Частина 3. Рекомендації стосовно заготовок зубчастих коліс, міжосьової відстані та паралельності осей (ISO/TR 10064-3:1996, IDT).

34. ДСТУ ISO/TR 10064-4:2005 Передачі циліндричні зубчасті. Правила приймання. Частина 4. Рекомендації стосовно структури поверхні та перевірки плями контакту зубців (ISO/TR 10064-4:1998, IDT).

35. ДСТУ ISO/TR 10064-5:2007 Передачі зубчасті циліндричні. Правила приймання. Частина 5. Рекомендації щодо оцінювання інструментів для вимірювання зубчастих передач (ISO/TR 10064-5:2005, IDT).

36. ДСТУ ISO/TR 13593:2005 Редуктори промислового застосування (ISO/TR 13593:1999, IDT).

37. ДСТУ ISO/TR 14179-1:2004 Зубчасті передачі. Термічна здатність. Частина 1. Термічна здатність зубчастих передач при температурі масляної ванни 95°C (ISO/TR 14179-1:2001, IDT).

38. ДСТУ ISO/TR 14179-2:2004 Зубчасті передачі. Термічна здатність. Частина 2. Термічна навантажувальна здатність (ISO/TR 14179-2:2001, IDT).

39. ДСТУ ГОСТ 30803:2018 (ГОСТ 30803-2014, IDT) Колеса зубчасті тягових передач тягового рухомого складу. Технічні умови.

40. ДСТУ ГОСТ 33189:2018 (ГОСТ 33189-2014, IDT) Колеса зубчасті тягових передач тягового рухомого складу. Шкали еталонів макро- та мікроструктур.

Окрім цих стандартів, існує низка стандартів направлених на підтримання на високому рівні системи якості на виробництві в першу чергу це серія стандартів ДСТУ ISO 9001.

Загалом метрологічне забезпечення повинно охоплювати наступні параметри зубчастих передач:

- *вимірювання розмірів*. Контроль відхилення розмірів гарантує, що фізичні розміри зубчастих коліс відповідають необхідним специфікаціям. Це передбачає вимірювання таких розмірів, як товщина, крок і діаметр зубців. Точне вимірювання цих розмірів має вирішальне значення, оскільки навіть незначні відхилення можуть вплинути на функціональність зубчатого колеса та її сумісність з іншими механічними компонентами;

- *контроль профілю зубчатого колеса*. Контроль профілю перевіряє форму зубців колеса, щоб переконатися, що вони відповідають бажаному профілю і куту нахилу. Точність профілю зубців життєво важлива для правильного зачеплення і безперебійної роботи. Відхилення в куті спіралі може призвести до проблем з експлуатацією, таких як шум і нерівномірний знос;

- *контроль на биття та концентричність*. Вимірювання параметрів биття та концентричність

оцінюють вирівняність та округлість зубчастого колеса, які є критично важливими для безперебійної роботи. Биття вимірює коливання або відхилення поверхні зубчатого колеса під час обертання. Надмірне биття викликає шум, вібрацію і передчасний знос. Концентричність гарантує, що центральна вісь шестерні збігається з віссю обертання, що важливо для рівномірного руху і розподілу навантаження;

- *контроль шорсткості поверхні*. Вимірювання параметрів шорсткості оцінює стан поверхні зубів, яка впливає на продуктивність передачі та рівень шуму. Поверхні з малою шорсткістю зменшують тертя і знос, що призводить до більш ефективної і тихої роботи передачі;

- *вимірювання твердості*. Визначення параметрів твердості визначає стійкість шестерні до деформації та зносу, що має вирішальне значення для її довговічності. Більш тверді поверхні краще протистоять зносу і деформації, що може продовжити термін їх служби і підвищити надійність;

- *визначення складу матеріалу*. Визначення складу матеріалу гарантує, що редуктор виготовлений з правильних матеріалів з відповідними властивостями. Це тестування перевіряє хімічний склад і властивості матеріалу шестерні, щоб переконатися, що він відповідає необхідним специфікаціям. Такі методи, як спектрометрія, аналізують елементний склад матеріалу, надаючи детальну інформацію про типи та кількість присутніх елементів. Хімічний аналіз може додатково визначити властивості матеріалу, такі як міцність і твердість, що гарантує його придатність для передбачуваного застосування. Забезпечення якості та однорідності матеріалу є життєво важливим для виробництва надійних і високопродуктивних передач;

- *функціональне випробування*.

Функціональне випробування має вирішальне значення для оцінки того, як редуктори працюють в реальних умовах експлуатації, забезпечуючи їх відповідність стандартам продуктивності та вимогам надійності. Випробування навантаженням передбачає моделювання фактичних умов, за яких буде працювати передача, наприклад, застосування різних навантажень і швидкостей для оцінки його продуктивності. Цей тип тестування використовує спеціалізоване обладнання, таке як динамометри та установки для тестування навантаження, для застосування контрольованих навантажень та вимірювання реакції передач, перевірки на міцність, довговічність та потенційні точки відмови. Тестування шуму та вібрації вимірює рівні шуму та вібрації, що виробляються редуктором під час роботи. Надмірний шум і вібрація можуть вказувати на такі проблеми, як перекид, дисбаланс або неправильне зачеплення, що може призвести до передчасного зносу або руйнації;

- *неруйнівний контроль*. Неруйнівний контроль (NDT) є ключовим у виробництві редукторів, оскільки він дозволяє виявляти внутрішні недоліки, не пошкоджуючи конструкцію. Внутрішня цілісність зубчатих коліс настільки ж важлива, як і її зовнішні розміри та поверхня. Внутрішні недоліки, такі як тріщини, порожнечі, включення та інші розриви, можуть поставити під загрозу міцність і продуктивність шестерні, що призведе до несподіваних збоїв і дорогого простою. Методи NDT дозволяють виробникам забезпечити відповідність передач суворим стандартам якості та безпеки шляхом виявлення та усунення цих прихованих дефектів, перш ніж вони призведуть до експлуатаційних проблем. Цей підхід не тільки підвищує надійність і довговічність передач, але і сприяє загальній економії коштів, запобігаючи дорогому ремонту і заміні.

4. Сучасні методи вимірювання точності та якості зубчатих коліс важконавантажених редукторів

Розвиток машино- та авіабудування, особливо з появою прецизійних оброблюваних верстатів дозволяє виготовляти та застосовувати важко навантажені редуктори. Такі редуктори дуже потрібні в енергетиці, в будівництві, гірничодобувній техніці, верстатобудуванні, металургійній та транспортній сфері. В конструкції таких редукторів зазвичай присутні зубчаті колеса великих розмірів та різноманітної конструкції. У випадку коли шестерні мають розмір $d \leq 200$ мм, вони відносяться до малих розмірів. Методи контролю точності виготовлення таких коліс в більшості випадків традиційно добре відомі [1, 17], основними недоліками такого контролю є велика частка застосування ручного вимірювального інструменту, необхідність додаткових спеціалізованих пристосувань, велика трудомісткість, та низький рівень автоматизації. Для випадку коли розмір зубчастого колеса лежить в діапазоні розмірів $200 \text{ мм} \leq d \leq 600$ мм, то зубчате колесо відноситься до діапазону великих розмірів, рівень складності завдання контролю якості виходить на більш складний та вартісний рівень, слід зазначити що такі розміри зубчатих коліс, ще є транспортабельні й виконувати контроль можливо у спеціалізованих вимірювальних лабораторіях, хоча й кількість таких вимірювальних лабораторій в Україні скорочується. Зовсім інша ситуація є для зубчатих коліс які мають розмір $600 \text{ мм} \leq d \leq 3000$ мм, та з розміром понад 3000 мм, такі колеса вже відносяться до великогабаритних розмірів, мають значну вагу та жорсткі технічні характеристики. Метрологічне забезпечення таких коліс в Україні малий рівень розвитку, оскільки потребує сучасних методів контролю, прецизійного

обладнання та висококваліфікованих спеціалістів з метрології, які володіють навичками роботи в автоматизованих середовищах CAD-проектування та CAD-вимірювання.

4.1. Проблематика вимірювання великих зубчатих коліс

Зростання розмірів зубчатих коліс в першу чергу зумовлено підвищеними вимогами до продуктивності редукторного обладнання, зростаючим рівнем модернізації технологічного обладнання та розвитком зубофрезерних верстатів. За кордоном вже існує технологічне обладнання як здатне виготовляти зубчаті колеса діаметром до 18 м з модулем понад 60, а точність виготовлення таких коліс лежить в межах 5 класу точності [18]. В той же час у порівнянні з зубофрезерними верстатами вимірювальні засоби для великих зубчастих коліс а особливо для надто великих досить відстали, а в деяких випадках й відсутні х засобів. Причина полягає в тому, що, оскільки параметри, розміри та вага великих зубчастих коліс продовжують збільшуватися, відповідно й технологія та засоби їх точного вимірювання потребує корінного зміння.

Нижче описані основні фактори, які роблять вимірювання великих зубчастих коліс складною технічною задачею.

1. Великий розмір шестерні. Якщо використовувати звичайні методи вимірювання, то структура і розмір вимірювального інструменту відповідно збільшуються, що дуже ускладнює виготовлення, застосування та калібрування відповідних засобів вимірювальної техніки. Наприклад, вимірювання профілю зуба великого зубчастого колеса методом обкатування є дуже складним завданням. У випадку контролю зубчастого колеса з модулем $m = 25$, та кількістю зубів $z = 200$, з кутом зачеплення $\alpha_w = 20^\circ$, зовнішній розмір колеса складає понад 5000 мм, довжина контуру зубу буде складати 148 мм, а потрібний хід вимірювального щупа мінімально 775 мм, отже для повної обміру зубчастого колеса нам потрібно буде виготовити прецизійно рухомий стіл з ходом понад 1900 мм, див. рис. 4 що є вкрай складною та кошторисним завданням. Для коліс ще більшого діаметра вимірювальна задача ще більш ускладнюється.

2. Складність застосування поворотних столів. Застосування поворотних столів значного спрощує конструкцію вимірювальних приладів, оскільки суттєво зменшується довжина переміщення консольних щупів, але в цьому випадку необхідно приймати до уваги максимальну навантажувальну здатність такого столу, в більшості вимірювальних приладів це навантаження не перевищує 100 кг на середину стола.

Крім цієї деформації столу, що призводить до додаткових складових невизначеності вимірювання, додається й труднощі з обертанням та зупинкою в певному положенні зубчатого колеса, за причини значної інертності центру мас колеса, що також призводить до суттєвих вкладів випадкових відхилів в результат вимірювання.

3. Базові поверхні. Для зубчатих коліс в якості базового елементу слугує або центральний посадковий отвір, або вал на якому розташоване колесо, що призводить до труднощів прив'язки отриманих розмірів при традиційними механічними засобами вимірювальної техніки, більшість яких не має можливості розміститися на базовій поверхні, оскільки їх розмір складає не менше половини діаметру

4. Температурні деформації. Вплив деформації та спотворення розмірів внаслідок впливу температури навколишнього середовища, для малих розмірів не так суттєво, як для великих розмірів. Внаслідок цього необхідно звужувати температурні рамки умов вимірювання, застосовувати спеціальні вимірювачі температури та будувати «чисті кімнати вимірювання». При цьому виникає проблема транспортування зубчатого колеса до місця проведення контролю.

5. Еталони зубчатих коліс. Простежуваність результатів вимірювання та їх достовірність є ключовим параметром всіх вимірювань та відповідним критерієм компетентності вимірювальних лабораторій. На сьогодні еталони зубчатих коліс виготовляються у виді мір евольвентного профілю та еталонних коліс. Проте застосування у вигляді еталону повнорозмірного зразка зубчатого колеса є вкотре дорогим та економічно не доцільним. На сьогодні відомо два еталона для зубчатих коліс з великим модулем [19].

4.2. Сучасні засоби вимірювання великих зубчатих коліс

До стрімкого розвитку обчислювальних можливостей та створення сучасних вимірювальних засобів контроль основних параметрів зубчастих коліс здійснювався

великою кількістю вимірювальних приладів [20], таких як крокоміри для окружного та кутового кроку, крокоміри для основного кроку, нормалеміри, міжцентроміри, прилади вимірювання биття, евольвентоміри, ходоміри, зубоміри, прилади обкатування колеса та визначення відбитку контакту та ін. Ці прилади (за деякими виключенням) мають серйозні недоліки, з яких велика трудомісткість, низька точність та автоматизація, в більшості випадків ці прилади вже зняті з виробництва й в експлуатації знаходяться прилади, які були випущені в середині минулого сторіччя. На заміну цим приладам пришли координатно-вимірювальні машини, від стаціонарних до пересувних та портативних, також стрімко розвиваються сучасні лазерні та оптично-вимірювальні скануючі прилади 3D.

Принципова основа координатного методу вимірювання полягає в тому, що будь-яку поверхню або профіль складної геометричної фігури можливо детермінувати на безкінечні окремі ділянки, що в свою чергу складається з нескінченної кількості окремих точок. У випадку коли відомі координати положення в просторі якогось обмеженого числа цих точок (масиву точок), то за відповідними алгоритмами знаходять розміри цих поверхонь та їхні відхилення від математичної форми (ідеального масиву), це дозволяє визначити розташування поверхонь у просторі, а також визначити їхні координати в просторі та розрахувати відповідні відхилення.

Знаходження координат окремих точок виконують за допомогою координатно-вимірювального обладнання, в яких переміщення вздовж вісей визначається методом інтерферометрії (когерентне випромінювання світла) чи за допомогою інкрементальних оптичних лінійних та поворотних енкадерів, з роздільною здатністю 1 нм [21].

Для вимірювання зубчатих коліс найбільш розповсюдженим координатно-вимірювальними машинами є наступні:

1. Портального типу. Характерною особливістю цих компоновок, див. рис. 3 є П-подібний портал.



Рис. 3. КВМ портального типу [22]

Машини даного типу мають високу жорсткість основних вузлів, точність, хороші динамічні властивості, достатньо відкритий простір для встановлення деталей та її оглядовості в процесі вимірювання. Діапазон об'єму зони вимірювання складає до $X = 1200$ мм; $Y = 3000$ мм; $Z = 2000$ мм. Розширена невизначеність вимірювання крапкових зразків складає $U = \left(0,5 + \frac{L}{350}\right)$ мкм. Особливістю є що об'єкт вимірювання розташовується на столі – гранітній плиті.

2. Мостового типу (рис. 4). Конструктивно представляє собою міст, розташовується зазвичай у великих виробничих приміщеннях. Принцип роботи і вимірювання схожий з порталними машинами, проте тут використовуються спеціальні вертикальні опори, на яких зверху розташовуються напрямні для

переміщення горизонтальної траверси зі встановленою піноллю. Такі машини не мають основу, а робоча поверхня – підлога де вона розташована. Діапазон об'єму зони вимірювання складає до $X = 3000$ мм; $Y = 12000$ мм; $Z = 3000$ мм. Розширена невизначеність вимірювання крапкових зразків складає $U = \left(3,0 + \frac{L}{350}\right)$ мкм.

3. Спеціалізовані координатні центри. В основі центру (рис. 5) лежить прецизійний поворотний стіл. Закріплений як вимірювальна вісь (вісь C), він забезпечує концентричну установку колеса, що підлягає контролю. У поєднанні з трьома лінійними вимірювальними осями, тангенціальною (вісь X), радіальною (вісь Y) і вертикальною (вісь Z), прецизійні вимірювальні центри надійно відстежують і контролюють



Рис. 4. KBM мостового типу [23]

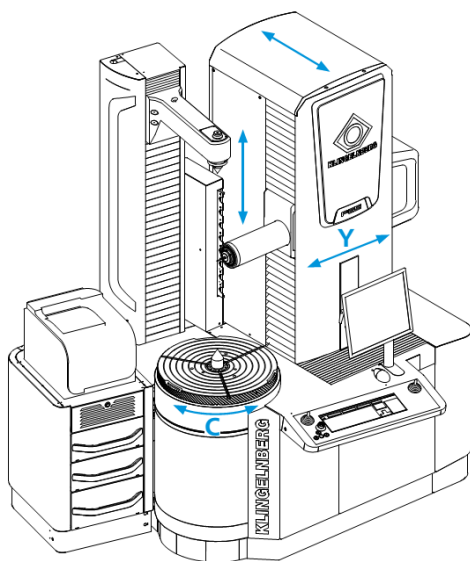


Рис.5. Спеціалізовані координатні центри

ють функціональні поверхні зубчастих передач і загальних компонентів приводу. Це гарантує максимальну точність і відтворюваність вимірювань.

4. Лазерні треки (рис. 6). Це високоточний портативний прилад, принцип роботи якого заснований на вимірюванні координат точок відносно власної системи координат або системи координат виробу, за допомогою лазерного променя та відбивача (рефлектору). Так, можна визначати геометрію практично будь-якого великогабаритного зубчатого колеса та інші розміри великогабаритних деталей. Діапазон об'єму зони вимірювання сфера з радіусом вимірювання до 80 м; $U_{x,y,z} = (15 + 6 \cdot L)$ мкм, де довжина L вимірюється в метрах.

5. Координатно-вимірювальні руки та портативні сканери (рис. 7). Вимірювальні руки отримали свою назву на схожість до кінцівки людини, в основу покладено шарнірне з'єднання декількох ланок (зазвичай 3 або 4), які можуть обертатися навколо осі.

В кожному шарнірі розташовано оптичний поворотний енкодер, що має високу розподільну здатність, знаючи довжину кожної ланки руки та полярний кут повороту, знаходять координати положення тактильного щупа. Діапазон об'єму зони вимірювання сфера з радіусом вимірювання до 4,98 м; а кращі моделі мають розширену невизначеність вимірювання $U = \left(5 + \frac{L}{40}\right)$ мкм, де довжина L вимірюється в метрах.

Застосування лазерних трекерів в поєднанні з координатно-вимірювальними руками дає змогу проводити контроль зубчастих коліс практично будь-якого великого розміру.

6. Застосування декількох трекерів зумовлено необхідністю підвищити просторову точність координатно-вимірювальних руки при переміщенні на іншу ділянку виміру. При цьому «рука» проводить сканування малого об'єму, а усереднені результати координати положення базової координати визначаються з просторових положень рефлекторів.

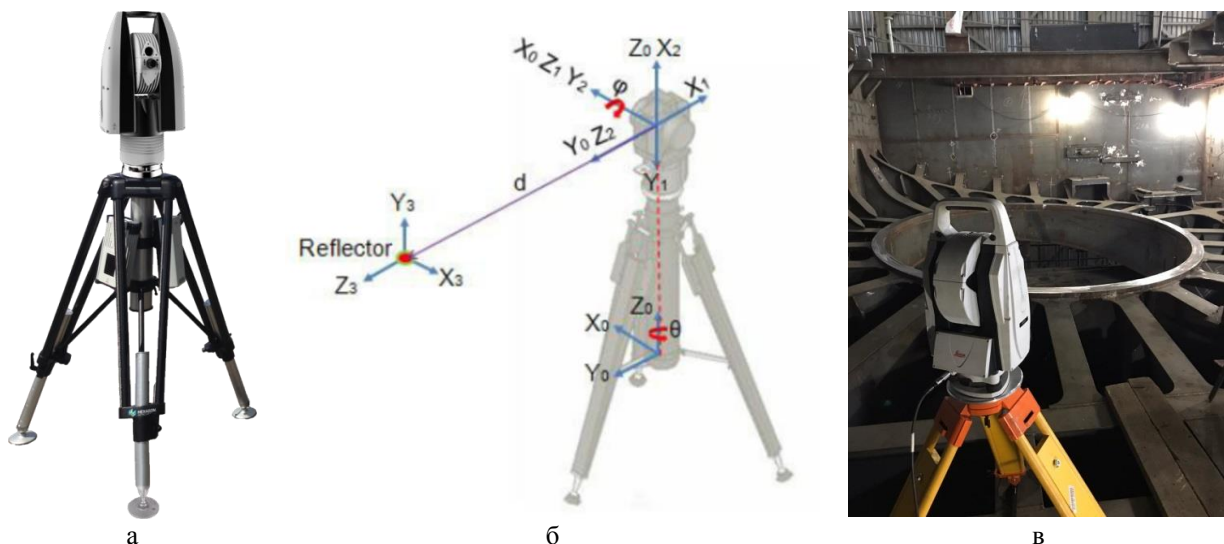


Рис. 6. Лазерний трекер:
а – зовнішній вигляд; б – кінематична схема; в – приклад роботи [24]



Рис. 7. Координатно-вимірювальна машина типу «рука» [25]

4.3. Програмне забезпечення для контролю великих зубчатих коліс

При застосуванні сучасних вимірювальних приладів є вкрай важливим елементом який гарантує отримання результатів з необхідною точністю це застосування спеціалізованого програмного забезпечення. Найбільш відомими виробниками продуктів програмного забезпечення для вимірювання параметрів зубчатих коліс є наведені в таблиці 2.

Крім наведених, компаній відповідним Software займаються всі компанії, які випускають вимірювальні прилади для зубчатого зчеплення. Більшість програмного забезпечення є подібними, але найбільші вимірювальні можливості та розповсюдженість має компанія Hexagon зі своїми продуктами QUINDOS та PC-DMIS GEAR. Також слід зазначити що лише QUINDOS позиціонується як підтримка вимірювання за допомогою координатно-вимірювальних руки.

Програмне забезпечення призначене для контролю параметрів прямозубих і косозубих, шевронних, черв'ячних та інших типів коліс за будь-яких значень модуля, кута нахилу зубів і кута профілю вихідного контуру. При цьому забезпечуються:

- *Точність.* Програмне забезпечення використовую лише валідовані та верифіковані алгоритми розрахунку параметрів. При застосуванні програмного забезпечення гарантується достовірність і повторюваність.
- *Гнучкість.* Рішення, адаптовані до потреб будь-яких користувачів та підтримка більш ніж 36 параметрів контролю зубчатого колеса.
- *Продуктивність.* Висока Автоматизація вимірювання та наявність ефективних вимірювальних стратегій.
- *Програмне забезпечення майже не обмежує розмір.* Програмне забезпечення дозволяє контролювати зубчаті колеса з параметрами:

а) Діаметр колеса: від 2 мм до 3 700 мм з установленням на 3D KBM, до 12 000 мм із застосуванням портативних KBM типу «Рука»;

б) Модуль: від 0,25;

в) Максимальна висота зубу: не обмежена;

г) Максимальна довжина валу: не обмежена;

д) Максимальна ширина колеса: не обмежена;

- *Підтримка стандартів.* Програмне забезпечення підтримує розрахунок контрольованих параметрів у відповідності до стандартів:

а) DIN 3962:1978 Зачеплення циліндричні зубчасті. Допуски на загальне відхилення кроку по дільному колу;

б) DIN 5480:2006 З'єднання шліцьові з евольвентним профілем і вихідним діаметром. Частина 1: Основні положення;

в) ISO 1328-1:1995 та ISO 1328:2013 Колеса зубчасті циліндричні. Система точності ISO. Частина 1. Терміни та визначення понять і встановлені допуски відхилень бокових поверхонь зубців зубчатого колеса;

г) ISO 4156-1:2005 Шліци прямі з бічними евольвентними поверхнями для циліндричних валів. Метричний модуль. Посадка по бічній поверхні. Частина 1. Загальні положення;

д) AGMA 2000-A88:1988 Посібник з класифікації та контролю зубчастих коліс, Допуски та методи вимірювання для незібраних прямозубих та косозубих зубчатих коліс;

е) AGMA 2015-1A01:2015 Система класифікації точності – дотичні вимірювання для циліндричних зубчатих коліс;

є) ANSI B92.1:1970/1976/1996 Евольвентні шліци та контроль;

ж) JIS 1702-1/2:1998 Циліндричні зубчасті колеса – Система класифікації допусків фланців ISO - Частина 1: Визначення та допустимі значення відхилень, що відносяться до бічних поверхонь зубчастих коліс;

Таблиця 2

Програмне забезпечення для вимірювання зубчатих коліс

№	Виробник	Найменування ПЗ	Країна
1	KLINGELNBERG GROUP	Cylindrical Gear Software	Німеччина
2	Hexagon	QUINDOS; PC-DMIS GEAR	Швейцарія
3	Mahr GmbH	Mahr Gear metrology	Німеччина
4	ZEISS Industrial Metrology	ZEISS GEAR PRO	Німеччина
5	WENZEL Group	Wenzel gear-software	Німеччина

і) Стандарт CNOMO (стандарт PSA і RENAULT);

к) Стандарти оцінювання конкретного виробника (наприклад, Caterpillar*, Daimler, Eurocopter, AUDI, Forst, Nanjing Gear, M&M Style).

Параметри зубчатих коліс які вимірюються:

1) Евольвентний профіль

- відхилення нахилу профілю f_{Ha} ;
- відхилення форми профілю f_{fa} ;
- сумарне відхилення профілю F_a ;
- модифікований профіль S_a ;
- модифікований профіль Кореня/Головки

зуба S_{at}/S_{aa} ;

- оцінка діаграм профілю K-Chart;
- оцінка модифікованого кута нахилу C_{Ha} .

2) Лінія підйому профілю (Helix)

- відхил кута нахилу гвинтової лінії зуба f_H ;
- сумарний відхил кута нахилу F_H ;
- відхилення форми гвинтової лінії зуба f_{fH} ;
- випуклість гвинтової лінії C_H ;
- середня лінія (I) та модифікована лінія змі-

щення (II) C_{bI}/C_{bII} ;

- оцінка К-діаграм;
- модифікований кут нахилу гвинтової лінії

C_{Hb} .

3) Крок та Биття

- відхил кроку зчеплення f_p ;
- накопичений відхил окружного кроку F_p ;
- відхил окружного кроку f_{ct} ;
- розподіл/Діапазон відхилень кроку/похибка

R_p ;

- радіальне биття окружного кроку F_r .

4) Спеціальне оцінювання

- розмір по одній сфері l_{Mk} ;
- розмір по двом сферам M_{dk} ;
- розмір по трьом сферам d_{k3t} ;
- накопичений відхил k зубів W_k .

- поперечна та нормальна товщина зуба (ширина впадини) $s_t/s_n (e_t/e_n)$.

5) Топографія

- топографія бічної поверхні зуба характеризує відхилення гвинтової поверхні;

- поверхня буде визначатися лініями гвинтової лінії та профілю.

6) Протоколювання

Всі вимірювання представляються у вигляді протоколів у вигляді діаграм та чисельних значень, також можливо виведення окремо топографії колеса. Типові протоколи наведені на рис. 8.

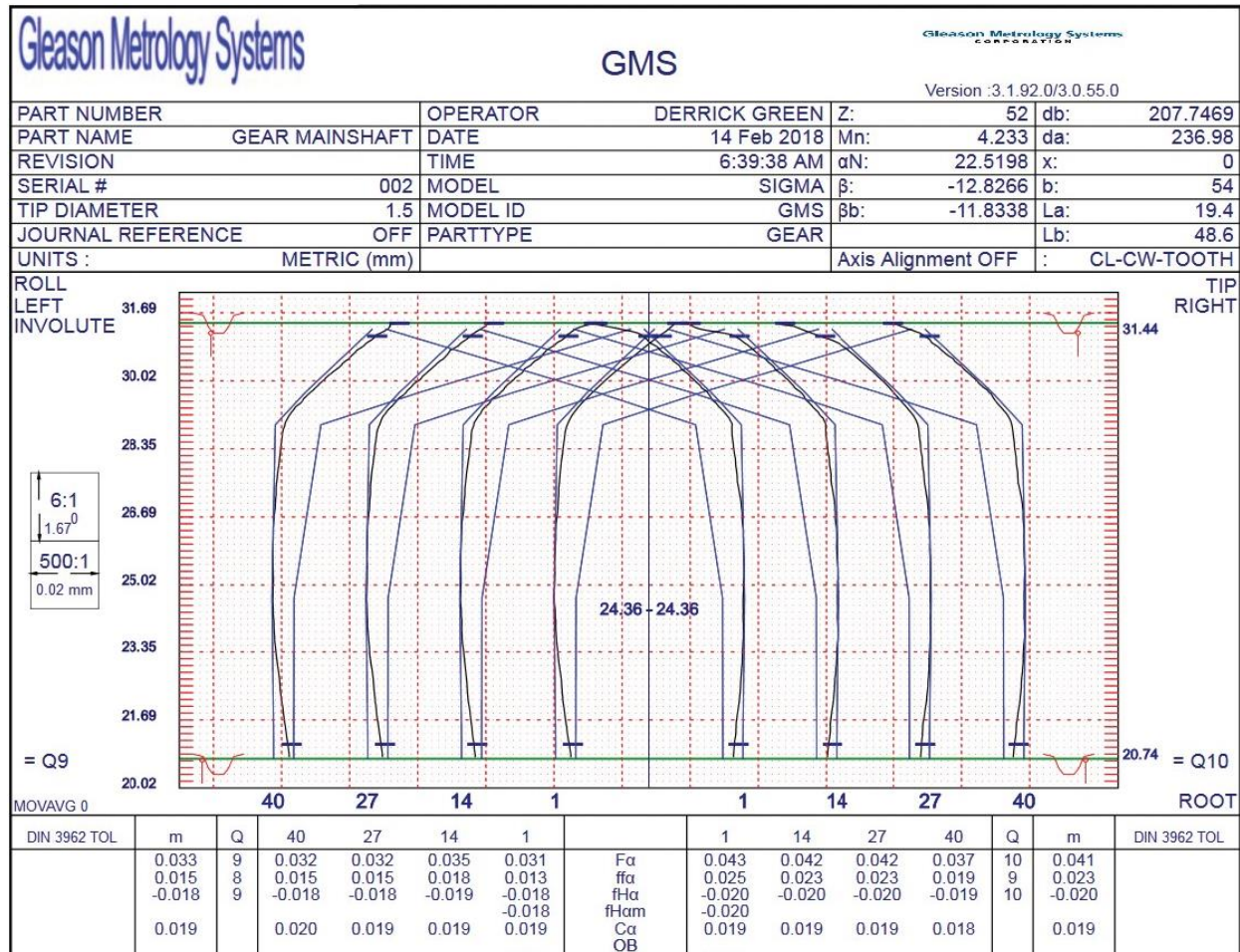


Рис. 8 Приклад протоколу контролю зубчатого колеса [26]

4.4. Еталони зубчатих коліс

Німецьким Національним інститутом метрології (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) спроектував еталон зубчатого колеса у вигляді сектору 50° секторного зуба рис. 9 з діаметром верхнього кола 1000 мм, вагою 450 кг, модулем $m = 20$, кутом зачеплення $\alpha_w = 20^\circ$ шириною зуба 400 мм і трьома різними кутами нахилу зубу: 20° лівий, 0° центральний та 10° правий, які можна використовувати для передачі одиниці вимірювання для циліндричних зубчастих коліс.

Для калібрування еталону було застосовано координатно-вимірювальну машини (КВМ), яка була розміщена в лабораторії з контрольованою температурою на кілька тижнів перед початком калібрування, а внутрішня температура еталону контролювалася за допомогою системи прецизійних температурних датчиків. Для калібрування використано новий метод калібрування, що поєднує в собі звичайне тактильне вимірювання на координатно-вимірювальній машині та оптичний метод вимірювання, заснований на інтерферометрії з використанням чотирьох

лазерних трекерів. Були визначені результуючі калібрувальні значення та розширені невизначеності вимірювань (менше 3,5 мкм для всіх параметрів зубчастих коліс). Зазначається, що було визначенні більше ніж 36 параметрів зубчастих коліс. Для кожного параметру були побудовані діаграми отриманих відхилів з коридорами розширеної невизначеності результатів калібрування.

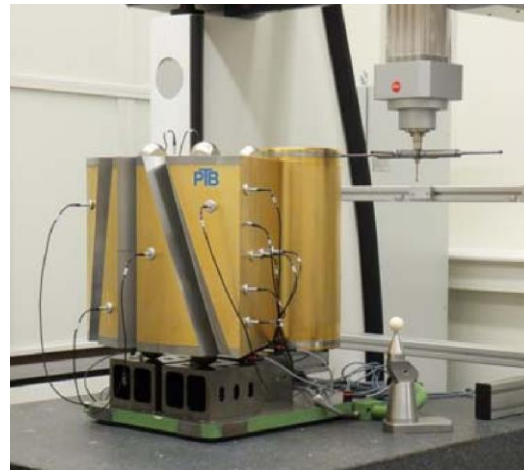
5. Приклад реалізації та дискусія

5.1. Приклад реалізації

Одним із практичних прикладів реалізації запропонованого підходу до метрологічного контролю є можливість впровадження автоматизованої координатно-вимірювальної машини з числовим програмним управлінням (ЧПК) у процес виробництва редукторів для авіаційної промисловості – зокрема, редукторів приводу допоміжних агрегатів газотурбінних двигунів.



а



б



в

Рис. 9. Еталон зубчатого колеса: а – зовнішній вид; б – калібрування еталону; в – еталон елементів зубчатого колеса [27]

Як приклад умовного впровадження можна розглядати провідні українські підприємства, такі як «Мотор Січ», «Івченко-Прогрес» або «Антонов», які спеціалізуються на виготовленні трансмісій для авіаційних силових установок. Інтеграція координатно-вимірювальної машини з 5-осьовим управлінням, оснащеної лазерним сканером та модулем автоматичного протоколювання, забезпечить можливість здійснення топографічного сканування профілю зубців кожного зубчастого колеса великого діаметра, побудови його 3D-моделі та порівняння з номінальним CAD-контуром.

Впровадження такої системи контролю дозволить:

- знизити рівень браку на 18 %;
- підвищити точність виготовлення зубчастих коліс на 12 %;
- забезпечити повну простежуваність усіх етапів контролю – від заготовки до остаточної обробки;
- підготувати базу для прогнозного аналізу зношування на основі цифрових протоколів та моделей.

5.2. Дискусія

Дискусійним моментом є доцільність впровадження таких систем у середніх і малих підприємствах, де вартість обладнання може перевищувати бюджети виробничих програм.

Іншим важливим аспектом для обговорення є необхідність розширення контролю не лише геометрії, але й матеріалознавчих параметрів, таких як мікроструктура, твердість, залишкові напруження та зносостійкість. Це вказує на потенціал до інтеграції метрологічного підходу з системами контролю матеріалу в реальному часі на етапі термічної обробки або обкатки.

Крім того, хоча у статті розглянуто широке застосування цифрових технологій, на практиці існують виклики у сфері технологічної адаптації персоналу, сумісності форматів CAD/CAQ/CMM і інтеграції у виробничі інформаційні системи (MES/ERP).

На міжнародному рівні стандарти ISO вже закріплюють вимоги до топографії, точності, вібраційних параметрів, але впровадження їх в Україні є фрагментарним. Це створює потребу у гармонізації нормативної бази та державному стимулюванні модернізації метрологічної інфраструктури, особливо у стратегічно важливих секторах, таких як авіабудування та енергетичне машинобудування.

6. Висновки

Важконавантажений редуктор є складним технічним виробом, що функціонує в жорстких умовах

експлуатації та забезпечує безперебійну роботу критично важливих механізмів у більшості галузей промисловості. Його раптовий вихід з ладу може спричинити не лише значні економічні збитки, а й критичні наслідки для технічної безпеки та життєдіяльності. Проблема підвищення надійності та довговічності редуктора є багатокомпонентною та охоплює всі етапи життєвого циклу – від проектування, виготовлення, складання до експлуатації, вимагаючи комплексного наукового та інженерного підходу.

У межах цього дослідження було зосереджено увагу на одному з ключових аспектів метрологічного забезпечення – контролі точності геометричних параметрів зубчастих коліс, які є визначальними елементами редуктора.

Окреме значення має метрологічне забезпечення процесів на технологічному обладнанні, включаючи зубофрезерні, шліфувальні, оброблювальні центри з ЧПК, що суттєво впливають на точність виготовлення зубчастих коліс.

Основна увага у дослідженні приділялася сучасним координатно-вимірювальним машинам та їх програмному забезпеченню, які відкривають нові можливості для підвищення ресурсу редукторів. Сучасні тенденції в метрології включають використання лазерного сканування, оптичних вимірювальних систем, цифрової радіографії та комп'ютерної томографії, що дозволяє здійснювати всебічну, високоточну оцінку геометрії не лише зубчастих коліс, а й інших конструктивних елементів.

Крім того, автоматизація та впровадження штучного інтелекту трансформують підходи до контролю якості, зменшуючи ризик людських помилок і забезпечуючи глибший аналітичний підхід до виявлення дефектів. Такі інновації не тільки підвищують ефективність виробництва, а й сприяють переходу до систем прогнозного обслуговування та розрахунку залишкового ресурсу важконавантажених редукторів.

Напрями майбутніх досліджень

Оскільки низка критично важливих напрямів залишилися поза межами розгляду, зокрема:

- метрологічне забезпечення неруйнівного контролю матеріалів елементів зубчастих передач;
- контроль механічних властивостей матеріалів редуктора;
- оцінка фізико-хімічних параметрів та стану мастильних матеріалів;
- контроль точності та параметрів підшипників кочення і ковзання;
- дослідження шумових та вібраційних характеристик;

- впровадження методів зворотного інжинірингу, CAD-моделювання та адитивного виробництва.

Подальші дослідження у сфері метрологічного забезпечення точності зубчастих передач повинні бути зосереджені на:

- розробці інтегрованих цифрових платформ для об'єднання систем CAD/CAE/CAM та CMM у єдине середовище управління вимірюваннями;
- адаптації методів зворотного інжинірингу до метрологічного аналізу з урахуванням геометричних і структурних дефектів;
- впровадженні засобів неруйнівного контролю мікроструктури матеріалів у процесі виготовлення редукторів;
- розвитку віртуального моделювання процесів вимірювання з використанням цифрових двійників (Digital Twins);
- створенні національної еталонної бази для калібрування засобів вимірювання великогабаритних зубчастих коліс;
- автоматизації аналізу вимірювальних протоколів з використанням алгоритмів машинного навчання для оцінки зносу [28] та прогнозування виходу з ладу;
- впровадженні в навчальні програми інженерної освіти дисциплін із цифрової метрології, щоб підготувати нове покоління фахівців до роботи з сучасними вимірювальними системами.

Зазначені напрямки формують стратегічну основу для переходу від традиційного контролю якості до інтелектуальної системи технічної діагностики, що базується на цифрових технологіях, штучному інтелекті та високоточній метрології.

Внесок авторів: формулювання мети та постановка задач досліджень – **І. О. Воронько, В. А. Калініченко**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **К. В. Майорова, М. І. Бичков, В. Б. Бочаров**; систематизація метрологічного забезпечення – **В. А. Калініченко**; підбір переліку засобів вимірювання – **К. В. Майорова, В. Б. Бочаров**; оформлення ілюстрацій – **В. Б. Бочаров, В. А. Калініченко**; підготовка чернетки – **В. А. Калініченко, М. І. Бичков**; написання – **К. В. Майорова, І. О. Воронько**; написання дискусії – **В. А. Калініченко**; аналіз результатів, формулювання висновків – **В. А. Калініченко, І. О. Воронько**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо матеріалів цієї публікації, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

- 1 Kapelevich, A. L. *Direct Gear Design [Text]* / A. L. Kapelevich. – Boca Raton, CRC Press, 2013. – 304 p.
- 2 ISO/TR 10064-1:2019. *Code of inspection practice – Part 1: Measurement of cylindrical gear tooth flanks [Text]*. – Switzerland, ISO, 2019. – 88 p.
- 3 Goch, G. *Gear Metrology [Text]* / G. Goch // *CIRP Annals*. – 2003. – Vol. 52, iss. 2. – P. 659-695. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60209-1.
- 4 Weckenmann, A. *Manufacturing Metrology – State of the Art and Prospects [Text]* / A. Weckenmann, P. Kraemer, & J. Hoffmann // *9th International Symposium on Measurement and Quality Control*. – November 21-24, 2007. – 7 p.
- 5 Kovač, I. *Testing and calibration of coordinate measuring arms [Text]* / I. Kovač, & A. Frank // *Precision Engineering*. – 2001. – Vol. 25, iss. 2. – P. 90-99. DOI: 10.1016/S0141-6359(00)00057-X.
- 6 ISO 1328-1:2013. *Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification. Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth [Text]*. – Switzerland, ISO, 2013. – 50 p.
- 7 ISO 1328-2:2020. *Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification. Part 2: Definitions and allowable values of double flank radial composite deviations [Text]*. – Switzerland, ISO, 2020. – 22 p.
- 8 ANSI/AGMA 2015-1-A01. *Accuracy classification system – Tangential measurements for cylindrical gears [Text]*. – Alexandria (VA), American Gear Manufacturers Association, 2015. – 37 p.
- 9 Засоби, стенди та машини для випробувань зубчастих коліс і передач вертольотних редукторів [Текст] / О. І. Пилипенко, Д. М. Колесник, А. М. Березняк, В. В. Кохан, & О. М. Панкул // *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. – 2021. – Вип. № 3(9). – С. 97-117. DOI: 10.37701/dndivsovt.9.2021.13.
- 10 Bourdet, P. *Geometric Product Specification and Verification: Integration of Functionality [Text]* /

P. Bourdet, & L. Mathieu // Springer Dordrecht. – 2003. – 330 p. DOI: 10.1007/978-94-017-1691-8.

11 Редуктора промислові: види та характеристики [Електронний ресурс] / Насоси, електродвигуни, компресори, холодильне обладнання. – Енергомашинокомплект. – 2019. – Режим доступу: <https://emc-kiev.ua/analytic/30818-reduktora-promislovi-vidi-ta-harakteristiki.html> – 18.07.2025.

12 Вечерік-Дриженко, В. Л. Методичні рекомендації до виконання курсового проекту з деталей машин (редуктора одноступінчастого прямозубого) [Текст] / В. Л. Вечерік-Дриженко – Стрий: Стрийський коледж Львів. нац. аграрн. ун-ту. – 2020. – 59 с.

13 Galeria [Electronic resource] / Renew Redutores – Reforma de Redutores. Access mode: <https://www.renewredutores.com.br/galeria> (accessed 18 July 2025).

14 Visestepeni reduktor (Multistage reducer) [Electronic resource] / GrabCAD – Zadatak po proračunu profesora Milosa Majstorovica, 8 June 2013. – Access mode: <https://grabcad.com/library/visestepeni-reduktor-multistage-reducer-1> (accessed 18 July 2025).

15 Koch, Y. Classification of Artificial Gear Damage by Angle Measurement Utilizing the Gear Wheel as a Material Measure [Text] / Y. Koch, F. M. Becker-Dombrowsky, & E. Kirchner // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15(12), 6446. – 13 p. DOI: 10.3390/app15126446.

16 Наказ № 285 Про пакетне прийняття європейських нормативних документів CEN/CENELEC [Електронний ресурс] / Верховна Рада України, 28 грудня 2022. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0285774-22?utm#Text> – 18.07.2025.

17 Яковенко, І. Е. Технологічні основи машинобудування [Текст] / І. Е. Яковенко, О. А. Пермяков, А. В. Фесенко. – Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – 421 с.

18 Wiemann, A-K. Traceable metrology for large involute gears [Text] / A-K. Wiemann, M. Stein, & K. Kniel // Precision Engineering. – 2019. – Vol. 55. – P. 330–338. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.10.001.

19 Calibration of CD mask standards for the 65-nm node: CoG and MoSi [Text] / J. Richter, T. Heins., R. Liebe, B. Bodermann, A. Diener, D. Bergmann, C. G. Frase, & H. Bosse // Proc. SPIE 6533, 23rd European Mask and Lithography Conference. – 2007. – Vol. 65330S. – 10 p. DOI: 10.1117/12.736931.

20 Comparative Studies of the Measurement Accuracy of Basic Gear Wheel Parameters [Text] / A. Świeriek, P. Nowakowski, L. Marciniak-Podsadna, & P. Goral // Metrology. – 2024. – Vol. 4 (3). – P. 469-488. DOI: 10.3390/metrology4030029.

21 Координатно-вимірювальні машини [Електронний ресурс] / KODA. – Режим доступу: <https://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=299> – 18.07.2025.

22 Global Optics [Electronic resource] / Hexagon Metrology. – 2024. – Access mode: <https://hexagon.com/products/global-optics> (accessed 18 July 2025).

23 Quality [Electronic resource] / Avers. – Access mode: <https://aversinc.com/quality> (accessed 18 July 2025).

24 Laser Tracker Kinematic Error Model Formulation and Subsequent Verification under Real Working Conditions [Text] / J. Conte, J. Santolaria, A. Majarena, & S. Aguado // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 132. – P. 788–795. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.561.

25 Portable measuring arms for rigorous inspection applications [Electronic resource] / Aerospace Manufacturing and Design. – Access mode: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/product/portable-measuring-arms-rigorous-inspection-applications/> (accessed 18 July 2025).

26 Inspection system upgrades meet EV gear challenges [Electronic resource] / Delre Corporation. – Access mode: <https://www.delrecorp.com/2018/05/11/inspection-system-upgrades-meet-ev-gear-challenges/> (accessed 18 July 2025).

27 Large Ring Gear Standard [Electronic resource] / PTB. – Access mode: https://www.ptb.de/emrp/large_ring_gear_standard869a.pdf (accessed 18 July 2025).

28 Agca, B. V. Experimental Investigation of the Wear of Some Polymer Gear Wheels Produced by Three-Dimensional Printer on the Variation of Fill Percentage and Shell Thickness [Text] / B. V. Agca, & M. S. Tunalioglu // The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics. – 2024. – Vol. 31. – P. 52-63. DOI: 10.55549/epstem.1593219.

References

1 Kapelevich, A. L. Direct Gear Design. Boca Raton, CRC Press, 2013. 304 p.

2 ISO/TR 10064-1:2019. Code of inspection practice – Part 1: Measurement of cylindrical gear tooth flanks. Switzerland, ISO, 2019. 88 p.

3 Goch, G. Gear Metrology. CIRP Annals, 2003, vol. 52, iss. 2, pp. 659-695. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60209-1.

4 Weckenmann, A., Kraemer, P. & Hoffmann, J. Manufacturing Metrology – State of the Art and Prospects. 9th International Symposium on Measurement and Quality Control, November 21-24, 2007. 7 p.

5 Kovač, I. & Frank, A. Testing and calibration of coordinate measuring arms. Precision Engineering, April, 2001, vol. 25, iss. 2, pp. 90-99. DOI: 10.1016/S0141-6359(00)00057-X.

6 ISO 1328-1:2013. Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification. Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth. Switzerland, ISO, 2013. 50 p.

7 ISO 1328-2:2020. *Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification. Part 2: Definitions and allowable values of double flank radial composite deviations*. Switzerland, ISO, 2020. 22 p.

8 ANSI/AGMA 2015-1-A01. *Accuracy classification system – Tangential measurements for cylindrical gears*. Alexandria (VA), American Gear Manufacturers Association, 2015. 37 p.

9 Pylypenko, O. I., Kolesnyk, D. M., Berezhnyak, A. M., Kokhan, V. V. & Pankul, O. M. *Zasoby, stendy ta mashyny dlya vyprobuvan' zubchastykh kolis i peredach vertol'otnykh reduktoriv* [Means, Stands and Machines for Testing Gear Wheels and Gear Trains of Helicopter Reduction Trains]. Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, 2021, vol. 3(9), pp. 97-117. DOI: 10.37701/dndivsovt.9.2021.13. (In Ukrainian).

10 Bourdet, P. & Mathieu, L. *Geometric Product Specification and Verification: Integration of Functionality*. Springer Dordrecht, 2003. DOI: 10.1007/978-94-017-1691-8.

11 Reduktora promyslovi: vydy ta kharakterystyky [Industrial gearboxes: types and characteristics]. *Nasosy, elektrodvyhuny, kompresory, kholodyl'ne obladnannya*, Kyiv, Enerhomashkomplekt, 2019. Available at: <https://emc-kiev.ub.ua/analitic/30818-reduktora-promyslovi-vidi-ta-harakteristiki.html> (accessed 18 July 2025). (In Ukrainian).

12 Vecherik-Dryzhenko, V. L. *Metodychni rekomendatsiyi do vykonannya kursovoho proektu z detaley mashyn (reduktora odno-stupinchastoho pryamozuboho): metod. rozrobka* [Methodological Recommendations for the Implementation of a Term Project on Machine Parts (Single-Stage Spur Gear): methodological development]. Stryi College of the Lviv. Nat. Agrarian. Un., 2020. 59 p. (In Ukrainian).

13 Galeria. *Renew Redutores – Reforma de Redutores*. Available at: <https://www.renewreducores.com.br/galeria> (accessed 18 July 2025).

14 Visestepeni reduktor (Multistage reducer). *GrabCAD. Zadatok po proracunu profesora Milosa Majstorovica*, 8 June 2013. Available at: <https://grabcad.com/library/visestepeni-reduktor-multi-stage-reducer-1> (accessed 18 July 2025).

15 Koch, Y., Becker-Dombrowsky, F. M., & Kirchner, E. Classification of Artificial Gear Damage by Angle Measurement Utilizing the Gear Wheel as a Material Measure. *Applied Sciences*. 2025, vol. 15 (12), 6446. 13 p. DOI: 10.3390/app15126446.

16 Nakaz # 285 Pro paketne pryynyattya yevropeys'kykh normatyvnykh dokumentiv TsEN/TsENEL-ETs [Order No. 285 On the Batch Adoption of European Regulatory Documents CEN/CENELEC]. *Verkhovna Rada of Ukraine*, 28 December 2022. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0285774-22?utm#Text> (accessed 18.07.2025). (In Ukrainian).

17 Yakovenko, I. E., Permyakov, O. A. & Fesenko, A. V. *Tekhnolohichni osnovy mashynobuduvannya* [Technological foundations of mechanical engineering]. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2022. 421 p. (In Ukrainian).

18 Wiemann, A-K., Stein, M., Kniel & K. Traceable metrology for large involute gears. *Precision Engineering*, 2019, vol. 55, pp. 330–338. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.10.001.

19 Richter, J., Heins, T., Liebe, R., Bodermann, B., Diener, A., Bergmann, D., Frase, C. G. & Bosse, H. Calibration of CD mask standards for the 65-nm node: CoG and MoSi. *Proc. SPIE 6533, 23rd European Mask and Lithography Conference*, 2007, vol. 65330S. 10 p. DOI: 10.1117/12.736931.

20 Świeriek, A., Nowakowski, P., Marciniak-Podsadna, L. & Goral, P. Comparative Studies of the Measurement Accuracy of Basic Gear Wheel Parameters. *Metrology*. 2024, vol. 4 (3), pp. 469-488. DOI: 10.3390/metrology4030029.

21 Koordynatno-vymiryuval'ni mashyny [Coordinate measuring machines]. *KODA*. Available at: <https://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=299> (accessed 18.07.2025). (In Ukrainian).

22 Global Optics. *Hexagon Metrology*, 23 July 2024. Available at: <https://hexagon.com/products/global-optics> (accessed 18 July 2025).

23 Quality. *Avers*. Available at: <https://aversinc.com/quality> (accessed 18 July 2025).

24 Conte, J., Santolaria, J., Majarena, A. & Aguado, S. Laser Tracker Kinematic Error Model Formulation and Subsequent Verification under Real Working Conditions. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 132, pp. 788–795. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.561.

25 Portable measuring arms for rigorous inspection applications. *Aerospace Manufacturing and Design*. Available at: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/product/portable-measuring-arms-rigorous-inspection-applications> (accessed 18 July 2025).

26 Inspection system upgrades meet EV gear challenges. *Delre Corporation*. Available at: <https://www.delrecorp.com/2018/05/11/inspection-system-upgrades-meet-ev-gear-challenges/> (accessed 18 July 2025).

27 Large Ring Gear Standard. *PTB*. Available at: https://www.ptb.de/emrp/large_ring_gear_standard869a.pdf (accessed 18 July 2025).

28 Agca, B. V. & Tunalioglu, M. S. Experimental Investigation of the Wear of Some Polymer Gear Wheels Produced by Three-Dimensional Printer on the Variation of Fill Percentage and Shell Thickness. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*. 2024, vol. 31, pp. 52-63. DOI: 10.55549/epstem.1593219.

MODERN APPROACHES TO THE METROLOGICAL CONTROL OF GEAR WHEELS IN GEARBOXES UNDER SEVERE OPERATING CONDITIONS

*Kateryna Maiorova, Viktor Kalinichenko, Vitalii Bocharov,
Iryna Voronko, Mykola Bychkov*

The subject of this study is the metrological support for the accuracy of manufacturing large-diameter gear wheels, which are key components of heavy-duty gearboxes operating under high loads, elevated temperatures, and dynamic stresses. These mechanisms are critical for ensuring the reliability of industrial equipment, and their unexpected failure may lead to significant technical and economic losses. **The objective** of this research is to investigate the factors influencing the geometric accuracy of gear teeth and to substantiate the effectiveness of quality control methods for these components using modern measuring equipment. **The tasks** include analyzing the regulatory framework of Ukraine and international standards, evaluating current measuring tools, exploring the capabilities of automated coordinate measuring machines (CMMs), and identifying trends in the development of digital technologies in the field of inspection. **The methods** used involve the analysis of normative documents (DSTU, ISO), comparison of the functionality of measuring systems, accuracy evaluation through graphical and topographical representations of measurement protocols, and modeling the impact of deviations on gearbox service life. **The scientific novelty** lies in the generalization of modern methods for controlling the geometry of large gear wheels, the justification of the effectiveness of using coordinate measuring machines (CMM) and digital measurement technologies, and the systematic analysis of standards and trends in metrological support under heavy-duty gearbox conditions. **The results obtained** demonstrate the feasibility of using CMMs for precise control of tooth profile, pitch, thickness, and other geometric parameters; the effectiveness of software applications for generating detailed measurement protocols is substantiated; and the role of digital technologies, such as laser scanning, optical systems, artificial intelligence (AI), and computed tomography, in enhancing the accuracy and informativeness of measurements is identified. **Conclusions:** The precision of gear wheels is a critical factor in increasing the service life and reliability of gearboxes. Therefore, modern metrological support must be based on a comprehensive approach that integrates advanced inspection systems, digital data analysis algorithms, and process automation, which together form the foundation of high-quality manufacturing in Ukraine's mechanical engineering sector.

Keywords: metrological support; gear wheels; heavy-duty gearboxes; coordinate measuring machines (CMMs); geometric accuracy; digital measurement technologies.

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

Калініченко Віктор Анатолійович – асп., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; начальник ВТК УА ТОВ Фірма «КОДА», Харків, Україна.

Бочаров Віталій Борисович – асп., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; заступник генерального директора УА ТОВ Фірма «КОДА», Харків, Україна.

Воронько Ірина Олексіївна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Бичков Микола Ігорович – канд. техн. наук, старш. викл. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

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

Viktor Kalinichenko – PhD Student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», QMS Manager of UA Company KODA Ltd, Kharkiv, Ukraine, e-mail: victora.kalinichenko@gmail.com, v.kalinichenko@koda.ua, ORCID: 0009-0000-1076-1004.

Vitalii Bocharov – PhD Student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Deputy General Director of UA Company KODA Ltd, Kharkiv, Ukraine, e-mail: bocharov.hexagonmetrology@gmail.com, v.bocharov@koda.ua, ORCID: 0009-0002-0297-0564.

Iryna Voronko – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Aircraft Manufacturing Technologies Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.voronko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-9689-6977, Scopus Author ID: 57476868700.

Mykola Bychkov – PhD, Senior Lecturer at the Aircraft Manufacturing Technologies Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: nikolastasnidvorastas@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1236-1455.