



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

---

# ПЕРЕДАЧІ ЗУБЧАСТІ ЦИЛІНДРИЧНІ ПРАВИЛА ПРИЙМАННЯ

Частина 5. Рекомендації щодо оцінювання  
інструментів для вимірювання зубчастих передач  
(ISO/TR 10064-5:2005, IDT)

ДСТУ ISO/TR 10064-5:2007

*Видання офіційне*



Київ  
ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ  
2013

## ПЕРЕДМОВА

1 ВНЕСЕНО: Технічний комітет стандартизації «Механічні приводи» (ТК 47), Акціонерне товариство закритого типу «Науково-дослідний інститут «Редуктор» (АТЗТ «НДІ «Редуктор»)

ПЕРЕКЛАД І НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ РЕДАГУВАННЯ: **В. Власенко**, канд. техн. наук; **В. Фей** (науковий керівник); **В. Галушко**; **О. Висоцький**; **І. Добровольська**

2 НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Держспоживстандарту України від 30 липня 2007 р. № 168 з 2009–01–01

3 Стандарт відповідає ISO/TR 10064-5:2005 Cylindrical gears — Code of inspection practice — Part 5: Recommendations relative to evaluation of gear measuring instruments (Передачі зубчасті циліндричні. Практичні правила приймання. Частина 5. Рекомендації, що стосуються оцінювання інструментів для вимірювання зубчастих передач)

Ступінь відповідності — ідентичний (IDT)  
Переклад з англійської (en)

4 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

---

Право власності на цей документ належить державі.  
Відтворювати, тиражувати та розповсюджувати його повністю чи частково  
на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу заборонено.  
Стосовно врегулювання прав власності треба звертатися до Держспоживстандарту України

Держспоживстандарт України, 2013

## ЗМІСТ

	с.
Національний вступ .....	IV
1 Сфера застосування .....	1
2 Нормативні посилання .....	1
3 Терміни та визначення понять .....	2
4 Інструментальний простір .....	3
4.1 Навколишнє середовище .....	3
4.1.1 Важливі параметри .....	3
4.1.2 Практичні директиви .....	3
4.1.3 Робочий простір .....	4
4.2 Вплив температури на зубчасті колеса й еталонні зразки .....	4
4.2.1 Обчислення температурного впливу на профіль .....	4
4.2.2 Обчислення температурного впливу на нахил лінії зуба .....	5
4.2.3 Обчислення температурного впливу на товщину зуба .....	5
5 Стан системи вимірювання .....	5
5.1 Методи оцінювання генеративних приладів .....	5
5.1.1 Перевірка установчих центрів .....	6
5.1.2 Контроль положень осевого вимірювання .....	9
5.2 Методи оцінювання вимірювальних приладів типу KBM .....	12
5.2.1 Випробування для визначення робочих характеристик згідно з ISO 10360 .....	12
5.2.2 Випробування на плиті з кульками .....	13
5.2.3 Поворотні столи .....	14
5.3 Система контактного вимірного давача .....	14
5.3.1 Щуп .....	14
5.3.2 Системи реєстрації даних .....	15
5.4 Фільтрування .....	18
5.4.1 Механічне фільтрування .....	18
5.4.2 Електричне фільтрування .....	19
5.4.3 Математичне фільтрування .....	19
5.5 Оцінювання погрішності .....	19
6 Еталонні зразки .....	19
6.1 Установка базових елементів .....	19
6.2 Запропоновані контрольні еталонні зразки .....	20
6.2.1 Об'єднаний еталон евольвенти основного кола .....	20
6.2.2 Еталонний зразок гвинтової лінії зуба .....	21

6 2 3 Еталонний зразок для відхилю кроку, повного накопиченого відхилення кроку і биття	22
6 2 4 Еталонні зразки товщини зуба	22
6 2 5 Еталонні зразки, подібні виготовлюваним деталям	22
6 3 Перевірка еталонного зразка модифікованої евольвенти основного кола	24
6 4 Неевольвентні — роликові (циліндричні) плоскі (торцеві) і кулькові (сферичні) еталонні зразки	24
6 4 1 Типи неевольвентних еталонних зразків	24
6 4 2 Функція неевольвентного еталонного зразка	25
6 4 3 Калібрування плоского еталонного зразка	26
6 4 4 Калібрування роликового або кулькового еталонного зразка	26
6 4 5 Впливи наконечника давача під час обчислювання еталонної кривої	27
6 4 6 Розташування вимірювання	27
6 4 7 Інтерпретація неевольвентного калібру	27
6 5 Перевірка гвинтової лінії еталонного зразка	27
6 5 1 Перевірка еталонного зразка модифікованого ходу гвинтової лінії	27
6 5 2 Неевольвентні еталони нахилу гвинтової лінії	28
6 6 Перевірка еталонного зразка модифікованої ексцентричності кроку	28
7 Нормативи підрахунку погрішності	28
7 1 Методи підрахунку погрішності	28
7 1 1 Загальні методи	29
7 1 2 Методи порівняння	29
7 2 Розрахунок похибки вимірювання $U_{95}$	29
7 3 Параметри вимірювання	30
7 3 1 Параметри припасування лінії	30
7 3 2 Параметри припасування смуги	31
7 3 3 Параметри кроку	31
8 Методики вимірювання	31
8 1 Відслідковування	31
8 2 Робочі умови	31
8 2 1 Умови визначення систематичної помилки	31
8 2 2 Умови підрахунку стандартної похибки	31
8 2 3 Умови поєднаних визначень	31
8 3 Виміри	32
8 4 Методика калібрування	32
8 4 1 Початкова установка і регулювання	32
8 4 2 Початкова методика калібрування	32
8 4 3 Методика подальшого калібрування	32
8 4 4 Технічне оснащення і калібри	33

9	Настанови компараторного підрахунку погрішності вимірювання .....	33
9.1	Приклад А прямого компаратора .....	33
9.2	Компараторний підхід, розширений впливом характеристики вибору .....	34
9.2.1	Приклад компаратора В .....	34
9.2.2	Приклад компаратора С .....	35
9.3	Компараторний підхід, поширений для характеристики виробу і впливів подібності геометрії .....	37
10	Контроль статистичного процесу .....	37
10.1	Визначення .....	37
10.2	Побудова діаграми X і MR .....	37
10.3	Критерії ознаки відсутності контролю .....	38
10.4	Коли дані контрольної діаграми не відповідають одному або більше критеріям згідно з 10.3 .....	38
11	Придатність приладу для використання .....	40
11.1	Обмеження невпевненості приладу .....	40
11.1.1	Метод GPS зменшення допуску .....	40
11.1.2	Метод співвідношення допусків .....	41
11.1.3	Норми погрішності інструмента .....	41
11.2	Джерела погрішності вимірювання .....	42
11.3	Зменшення погрішності вимірювання .....	43
11.3.1	Дотримання іншої методики калібрування .....	43
11.3.2	Зменшення погрішності сертифікації еталонного зразка .....	43
11.3.3	Удосконалення процесу вимірювання .....	43
12	Кореляція процесу вимірювання (прилад) .....	43
12.1	Основа для порівнювання .....	44
12.2	Кореляція вимірювання .....	44
	Додаток А Вплив температури на зубчасті колеса й еталонні зразки .....	44
	Додаток В Перевіряння еталонного зразка модифікованих евольвенти, ходу ґвинтової лінії, кроку .....	48
	Додаток С Інтерпретація неевольвентного роликового, кулькового або плоского (торцевого) еталонного зразка .....	57
	Бібліографія .....	74

## НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей стандарт є тотожний переклад ISO/TR 10064-5:2005 Cylindrical gears — Code of inspection practice — Part 5: Recommendations relative to evaluation of gear measuring instruments (Передачі зубчасті циліндричні. Практичні правила приймання. Частина 5. Рекомендації, що стосуються оцінювання інструментів для вимірювання зубчастих передач).

Технічний комітет, відповідальний за цей стандарт в Україні, — ТК 47 «Механічні приводи».

ISO/TR 10064-5 підготовлений Технічним комітетом ISO/TC 60, Gears (Зубчасті передачі).

ISO/TR 10064-5 із загальною назвою «Передачі зубчасті циліндричні. Практичні правила приймання» містить такі частини:

- Частина 1. Приймання сполучених поверхонь зубців;
- Частина 2. Приймання, що стосується відхилів вимірювальної міжосьової відстані, биття, товщини зуба і бічного зазора;
- Частина 3. Рекомендації, що стосуються заготовок зубчастих коліс, міжосьової відстані і паралельності осей;
- Частина 4. Рекомендації, що стосуються структури поверхні і перевірки плями контакту зубців;
- Частина 5. Рекомендації, що стосуються оцінювання інструментів для вимірювання зубчастих передач.

До стандарту внесено такі редакційні зміни:

- змінено назву стандарту для її узгодження з чинними національними стандартами;
- вилучено попередній довідковий матеріал «Передмова» до ISO/TR 10064-5:2005;
- структурні елементи цього стандарту: «Титульний аркуш», «Передмова» «Національний вступ», першу сторінку, «Терміни та визначення» і «Бібліографічні дані» — оформлено згідно з вимогами національної стандартизації України;
- слова «ця частина ISO 10064», «ця частина стандарту» замінено на «цей стандарт»;
- у розділі 2 наведено «Національне пояснення», виділене в тексті рамкою;
- у 7.2 виправлено помилку:  $2s$  замінено на  $2\sigma$ ;
- у 9.2.2 виправлено помилку: повинно бути « $U_{ws} = 1,6(0,1) = 0,16$  мкм»;
- вилучено примітку до рисунка В.1 як таку, що втратила сенс в українському перекладі;
- виправлено помилки у формулах (A.28), (A.30), (A.32), (A.35)—(A.38);
- виправлено помилку в одиниці вимірювання у формулі (B.16).

ISO 1328-1:1995, ISO 1328-2:1997, ISO/TR 10064-1:1992, ISO/TR 10064-2:1996, ISO/TR 10064-3:1996, ISO/TS 14253-2:1999 впроваджено в Україні як національні стандарти ДСТУ ISO 1328-1:2006, ДСТУ ISO 1328-2:2006, ДСТУ ISO/TR 10064-1:2006, ДСТУ ISO/TR 10064-2:2006, ДСТУ ISO/TR 10064-3:2005, ДСТУ ISO/TS 14253-2:2006 (ступінь відповідності — IDT).

Копії нормативних документів, на які є посилання в цьому стандарті і які не прийнято в Україні як національні, можна отримати в Головному фонді нормативних документів.

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

---

**ПЕРЕДАЧІ ЗУБЧАСТІ ЦИЛІНДРИЧНІ  
ПРАВИЛА ПРИЙМАННЯ**

**Частина 5. Рекомендації щодо оцінювання інструментів  
для вимірювання зубчастих передач**

**ПЕРЕДАЧИ ЗУБЧАТЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ  
ПРАВИЛА ПРИЕМКИ**

**Часть 5. Рекомендации, касающиеся оценки инструментов  
для измерения зубчатых передач**

**CYLINDRICAL GEARS  
CODE OF INSPECTION**

**Part 5. Recommendations relative to evaluation  
of gear measuring instruments**

---

Чинний від 2009-01-01

## **1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ**

Цей стандарт наводить додаткову інформацію і приклади для підтримки застосування ISO 18653. Він подає методики оцінювання і перевірки евольвенти, нахилу лінії зуба, кроку, биття та процесу вимірювання товщини зуба.

Наведено методи оцінювання стану і вирівнювання елементів інструментів, таких як центри, напрямні деталі, системи контактного вимірного давача тощо. Вміщено рекомендації для встановлення належного навколишнього середовища і для методик оцінювання статистичних даних.

Також передбачено застосування еталонних зразків зубчастих коліс для оцінювання погрішності  $U_{95}$  процесу вимірювання. Наведено правила з застосування процесів вимірювання під час приймання виготовлених зубчастих коліс, охоплюючи придатність до використання і рекомендований інтервал значень погрішності  $U_{95}$ , оснований на допусках точності виготовлених зубчастих коліс, що приймають.

Більшість із цих рекомендацій також можуть бути застосовані для вимірювання черв'яків, черв'ячних коліс, конічних зубчастих коліс і різального інструменту для зубчастих коліс.

## **2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ**

Наведені нижче нормативні документи обов'язкові для застосування в цьому стандарті. У разі датованих посилань застосовують тільки наведені видання. У разі недатованих посилань треба користуватися останнім виданням нормативних документів (разом зі змінами).

ISO 1122-1:1998 Vocabulary of gear terms — Part 1: Definitions related to geometry

ISO 1328-1:1995 Cylindrical gears — ISO system of accuracy — Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth

ISO 1328-2:1997 Cylindrical gears — ISO system of accuracy — Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviation and runout information

ISO/TR 10064-1:1992 Cylindrical gears — Code of inspection practice — Part 1: Inspection of corresponding flanks of gear teeth

ISO/TR 10064-2:1996 Cylindrical gears — Code of inspection practice — Part 2: Inspection related to radial composite deviations, runout, tooth thickness and backlash

ISO/TR 10064-3:1996 Cylindrical gears — Code of inspection practice — Part 3: Recommendations relative to gear blanks, shaft center distance and parallelism of axes

ISO 10360-1:2000 Geometrical Product Specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 1: Vocabulary

ISO/TS 14253-1:1998 Geometrical Product Specifications (GPS) — Inspection by measurement of work pieces and measuring equipment — Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications

ISO/TS 14253-2:1999 Geometrical Product Specifications (GPS) — Inspection by measurement of work pieces and measuring equipment — Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification

ISO 18653:2003 Gears — Evaluation of instruments for the measurement of individual gears  
Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1st edition 1993, corrected and reprinted in 1995.

#### НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

ISO 1122-1:1998 Словник термінів зубчастих передач. Частина 1. Визначення, що стосуються геометрії

ISO 1328-1:1995 Передачі зубчасті циліндричні. Система точності ISO. Частина 1. Визначення і допустимі величини відхилень, що стосуються сполучених бокових поверхонь зубців

ISO 1328-2:1997 Передачі зубчасті циліндричні. Система точності ISO. Частина 2. Визначення і допустимі величини відхилень, що стосуються вимірювальної міжосьової відстані та інформації про биття

ISO/TR 10064-1:1992 Передачі зубчасті циліндричні. Практичні правила приймання. Частина 1. Приймання сполучених поверхонь зубців

ISO/TR 10064-2:1996 Передачі зубчасті циліндричні. Практичні правила приймання. Частина 2. Приймання, що стосується відхилення вимірювальної міжосьової відстані, биття, товщини зуба і бічного зазора

ISO/TR 10064-3:1996 Передачі зубчасті циліндричні. Практичні правила приймання. Частина 3. Рекомендації, що стосуються заготовок зубчастих коліс, міжосьової відстані і паралельності осей

ISO 10360-1:2000 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Приймання і контрольні випробування координатно-вимірних машин (CMM). Частина 1. Словник

ISO/TS 14253-1:1998 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Приймання вимірюванням виробів і вимірювальне устаткування. Частина 1. Правила прийняття рішення під час доведення відповідності чи невідповідності технічним вимогам

ISO/TS 14253-2:1999 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Приймання вимірюванням виробів і вимірювальне устаткування. Частина 2. Настанова щодо визначення погрішності вимірів GPS, вимірювального устаткування та під час перевіряння продукції

ISO 18653:2003 Передачі зубчасті. Оцінювання інструментів для вимірювання окремих зубчастих коліс

Настанова щодо виявлення погрішності під час вимірювання (GUM), BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, коригована і передрукована в 1995 р.

### 3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

Для цілей цього стандарту застосовують терміни та визначення, наведені в ISO 1122-1, ISO 1328-1, ISO 1328-2 та ISO 18653.



## 4 ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ ПРОСТІР

### 4.1 Навколишнє середовище

Стабільність навколишнього середовища впливатиме на точність процесу атестування і вимірювання виготовлених деталей. Температура вимірювання має підтримуватися постійна. Рекомендовано, щоб температура становила 20 °C. Стандарти або рекомендації виробника інструменту часто вимагають навколишнього середовища, контрольованого протягом часу, необхідного для забезпечення безперебійних вимірювань з необхідною точністю, враховуючи температуру, вологість, вібрацію, чистоту та інші контрольовані параметри, що впливають на точне вимірювання.

#### 4.1.1 Важливі параметри

Такі параметри мають першорядне значення<sup>1)</sup>:

- охолоджувальне (нагрівальне) середовище, звичайно повітря;
- інтенсивність потоку, розподіл і швидкість охолоджувального (нагрівального) середовища;
- частота і амплітуда змін температури охолоджувального (нагрівального) середовища;
- температурні градієнти в охолоджувальному (нагрівальному) середовищі;
- вібрації;
- якість електричного живлення.

#### 4.1.2 Практичні директиви

Нижче подано практичні директиви під час вимірювання зубчастих передач. Проте відповідність цим директивам не гарантує заданої точності вимірювання.

— **Температура еталонного зразка.** Технологічна оснастка, еталонні зразки та інші пробні зразки мають бути залишені на відповідний період, щоб стабілізуватися до температури навколишнього середовища. Ідеальна температура спеціального зразка має бути такою, за якої він був атестований.

— **Варіація середньої температури.** Для потрібної точності мають бути проконтрольовані нормативи виробника інструменту щодо варіації температури.

— **Температурні цикли.** Температура може коливатися в межах середньої температури  $\pm 2^\circ\text{C}$  з циклом 5 хв або менше. Теплова інерція більшості механічних систем дозволяє швидкі циклічні хвилеподібні рухи температури в межах цих нормативів для заявленої точності. Якщо цикл температури інструменту досягає  $1^\circ\text{C}$  за 15 хв, можуть виникнути серйозні впливи на точність системи вимірювання. Багато людей використовують кондиціонер повітря в спробі досягти теплового контролю. Давачі температури в цих агрегатах можуть бути дуже повільними, щоб реагувати на температурні зміни. Якщо реакція триває більше ніж 5 хв, то можна помітити серйозні впливи на точність вимірювання.

— **Температурний градієнт.** Перепад температури має бути в межах  $0,5^\circ\text{C}$  по всій поверхні інструменту. Кращий спосіб це зробити — за допомогою сильного потоку повітря. Повітряний потік повинен бути однорідним у межах приміщення, щоб попередити застійні зони і перепади. Щоб досягти цього, якщо можливо, треба запроектувати багаторазові зміни напрямку руху повітря для подальшого розсіювання повітря однорідно в приміщенні. Метою є утворення однорідного переміщення повітря в приміщенні за тієї самої температури. Рухоме повітря має видаляти тепло з електронних засобів контролю, комп'ютерів, двигунів, гідравліки, людей, світла тощо, щоб запобігти перепадам.

— **Вібрації,** спричинені рухами інструменту, не потрібно допускати, щоб вони не заважали вимірюванням. Також вібрації від оточення має бути обстежено або виміряно. Якщо вони впливають на точність приладу, то, можливо, буде необхідно ізолювати прилад або встановити на відповідну основу.

— **Електричне живлення.** Коливання потужності можуть призвести до нестабільності роботи електронних вимірювальних приладів і комп'ютерів, цифрових контрольних систем позиціонування.

<sup>1)</sup> Повний розгляд впливів можна знайти в таких стандартах, як ASME B89.6 2 Температура і вологість середовища під час вимірювання розмірів R(2002)

#### 4.1.3 Робочий простір

Рекомендовано, щоб вимірювальні прилади було розташовано в приміщенні з контрольованою температурою. Проте багато вимірювальних приладів розміщено в робочому просторі, де важко витримувати процес вимірювання з погрішністю 5 мікрометрів. Накопичення пилу чи іншого забруднення на напрямних приладу може спричинити неточності та передчасну зношеність.

Якщо прилад необхідно використовувати в такому середовищі, то треба уникнути обумовлених обставин, таких як:

- місцеві джерела випромінювання тепла, наприклад нагрівальні прилади або сонячне світло через сусідні вікна, які можуть спричинити деформацію приладу;
- вентиляція на стелі, що дозволить холодному повітрю потрапляти на прилад;
- системи охолодження або відкриті вікна, які будуть причиною протягу з одного боку приладу.

Формули з 4.2.1 і 4.2.2 можна використовувати для оцінювання впливу стійкої, але послідовної різниці температури приладу від стандартної температури (20 °C). Якщо використовують формули, то коефіцієнт теплового розширення (СТЕ) має бути значенням для матеріалу приладу або шкали давача, і знак сумарної компенсації має бути змінено. Користувач повинен врахувати, що результати можуть змінюватися залежно від місця вимірювання температури.

#### 4.2 Вплив температури на зубчасті колеса й еталонні зразки

Температура може істотно впливати на геометрію зубчастих коліс і еталонних зразків. Температурні впливи на нахил профілю евольвенти  $f_{H\alpha}$ , на нахил лінії зуба  $f_{H\beta}$  і на виміри товщини зуба зубчастих коліс з зовнішніми зубцями й еталонних зразків можна передбачити, використовуючи подані нижче формули. Такі обчислення припускають однорідну температуру даного пробного зразка, локалізовані зміни температури неможливо зручно моделювати. Температуру вимірювального приладу в цих обчисленнях не враховували.

Температуру вимірювального приладу не враховують у цих обчисленнях, але різниця між стандартною температурою (20 °C) і температурою приладу може спричинювати помилки в результаті вимірювання.

Можливо, буде потрібна корекція профілю і нахилу лінії зуба вимірних величин через вплив температури. Такі корекції потрібні для методів оцінювання  $U_{95}$ , описаних у розділі 7 цього стандарту.

Однакові зміни температури зубчастого колеса або еталонного зразка не вважають такими, що мають вплив на параметри кроку або биття (місцеположення зуба).

##### 4.2.1 Обчислення температурного впливу на профіль

Під час вимірювання евольвентного профілю вплив температури можна змоделювати з урахуванням пов'язаної зміни в діаметрі основного кола. Вплив на нахил профілю  $f_{H\alpha}$  можна вирахувати так:

а) Задані (типові) дані:

- $z$  — число зубців;
- $m_n$  — нормальний модуль;
- $\beta$  — кут нахилу лінії зуба;
- $\alpha_n$  — нормальний кут профілю;
- $L_{\alpha s}$  — довжина обкату на початку дослідження профілю;
- $L_{\alpha e}$  — довжина обкату в кінці дослідження профілю;
- СТЕ — коефіцієнт теплового розширення (*coefficient of thermal expansion*) (приблизно  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$  для сталі).

**Примітка.** Коли точки на початку і в кінці дослідження профілю встановлено в градусах кута обкату ( $\xi_y$ ), перетворення в довжину обкату можна зробити за формулою:

$$L_y = \left( \frac{\xi_y}{360} \right) (d_b \pi). \quad (1)$$

б) Обчислюють зміну нахилу внаслідок різниці температури:

$$\Delta f_{H\alpha} = (L_{\alpha e} - L_{\alpha s})(t_a - t_s) \text{СТЕ}, \quad (2)$$

де  $t_a$  — фактична (виміряна) температура;

$t_s$  — стандартна температура (20 °C).

Див. додаток А щодо прикладу і подальшої інформації.

#### 4.2.2 Обчислення температурного впливу на нахил лінії зуба

Під час вимірювання нахилу лінії зуба вплив температури можна змодельовати врахуванням пов'язаної зміни в ході лінії зуба. Вплив на нахил лінії зуба  $f_{H\beta}$  можна оцінити так:

а) Задані (типові) дані в 4.2.1а), а також:

$L_\beta$  — діапазон оцінювання нахилу лінії зуба.

б) Обчислюють основний кут лінії нахилу зуба  $\beta_b$ :

$$\beta_b = \arcsin(\sin\beta \cos\alpha_n); \quad (3)$$

с) Обчислюють зміну нахилу внаслідок різниці температури:

$$\Delta f_{H\beta} = -L_\beta \tan\beta_b (t_a - t_s) \text{СТЕ}. \quad (4)$$

Див. додаток А щодо прикладу і подальшої інформації.

#### 4.2.3 Обчислення температурного впливу на товщину зуба

На додаток до евольвентного профілю і нахилу лінії зуба, температура може значно впливати на товщину зуба. Ці впливи можна змодельовати врахуванням пов'язаної зміни в ділянці зуба, яку перетинає початковий діаметр, де звичайно міряють товщину зуба. Вплив температури на нормальну товщину зуба колеса зовнішнього зачеплення можна оцінити так:

а) Задані (типові) дані в 4.2.1а), а також:

$s_n$  — нормальна товщина зуба на ділильному діаметрі  $d$ .

б) Обчислюють ділильний діаметр  $d$ :

$$d = z \frac{m_n}{\cos\beta}. \quad (5)$$

с) Обчисліть зміну в нормальній круговій товщині зуба на ділильному діаметрі зубчастого колеса зовнішнього зачеплення внаслідок різниці температури:

$$\Delta s_n = d \tan\alpha_n (t_a - t_s) \text{СТЕ}. \quad (6)$$

Див. додаток А щодо прикладу і подальшої інформації.

### 5 СТАН СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ

Багато чинників впливають на точність приладів вимірювання зубчастих передач. До них належать перпендикулярність і паралельність напрямних деталей приладу одна до одної і до поворотного столу, прямолінійність напрямних деталей, помилки лінійного позиціонування та помилки кутового переміщення (крок, обкат та поворот навколо вертикальної осі) рухомих компонентів приладу. Помилки, викликані електронними компонентами, шкалами, системами керування і програмним забезпеченням, можуть також несприятливо впливати на точність вимірювального приладу. Є різні методи вимірювання цих помилок. Доки повне обговорення кінематики механізму й електронних систем керування є поза сферою застосування цього стандарту, рекомендовано, щоб користувачі цими приладами знали багато можливих джерел неточності.

Деякі виробники вимірювальних приладів забезпечують докладними методиками для періодичних перевірок відповідності їхнього виробу вихідним заводським технічним умовам. Узагальнені випробування і рекомендовані допуски, знайдені в цьому стандарті, представлені для використання за відсутності або на додаток до рекомендованих методик виробників приладів. Ці випробування не вважають заміною методик виробників.

Ступінь точності зубчастої передачі і параметри, які будуть перевіряти, мають ідентифікуватися до початку операцій перевірки.

Фактична робоча зона має бути також відома. Результати всіх операцій мають бути зареєстровані, щоб документувати цю роботу перевірки і щоб підготувати дані для статистичного аналізу.

#### 5.1 Методи оцінювання генеративних приладів

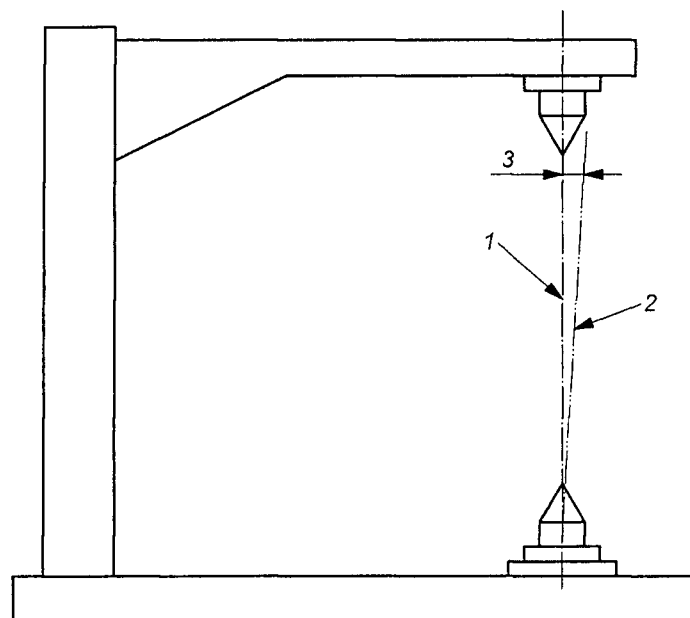
Правильну роботу важливих складових частин вимірювальних приладів зубчастих передач можна перевірити такими операціями. Цей процес перевірки має починатися з візуального контролю приладу, щоб упевнитися, чи не існують очевидні шкідливі умови, які погіршуватимуть правильну роботу. Центри, приводні механізми і вимірювальні давачі щупів, які зазнають зношування і пошкодження, мають бути перевірені. Також потрібне підтвердження, що умови навколишнього середовища відповідають вимогам 4.1.

Контактні вимірні давачі й індикатори, які вимірюють помилки приладу, мають атестуватися і мати відповідну роздільну здатність (рекомендовано 1 мкм або менше). Користувач повинен звернути увагу на те, що швидкість збору даних і фільтри впливатимуть на результати вимірювання. Див. 5.4 щодо подальшої інформації.

#### 5.1.1 Перевірка установних центрів

Контроль геометрії зубчастого колеса генеративними методами вимагає установки зубчастого колеса так, щоб його основна вісь обертання збігалася з віссю шпинделя приладу. Див. ISO/TR 10064-3. Будь-який ексцентриситет або непаралельність цієї установки спричинять помилку в результатах вимірів. Див. рисунок 1.

Міжцентрова установка випробуваних зубчастих коліс є загальною практикою. Більшість випробувальних приладів зубчастих передач оснащені центрами, один на основному шпинделі, та інший на вузлі задньої бабки. Неспіввісність і биття цих центрів є звичайні. Контроль приладів, використовуваних для випробування, має починатися з огляду цих установних центрів.



Позначки:

- 1 — міжцентрова вісь;
- 2 — вісь робочого шпинделя;
- 3 — похибка.

Рисунок 1 — Похибка співвісності осі шпинделя і міжцентрової осі

##### 5.1.1.1 Биття центра

Використовуючи індикатор з відповідною роздільною здатністю, вимірюють биття (TIR) центра основного шпинделя в напрямку, нормальному до поверхні. Цей вимір биття має бути в межах технічних умов виробника або норм, зазначених у таблиці 1. Рекомендовано вимірювати биття кожного центра на малому і великому кінцях, щоб виявити зігнуті або відхилені центри.

Таблиця 1 — Рекомендовані норми відхилень під час перевіряння співвісності приладу<sup>a</sup>

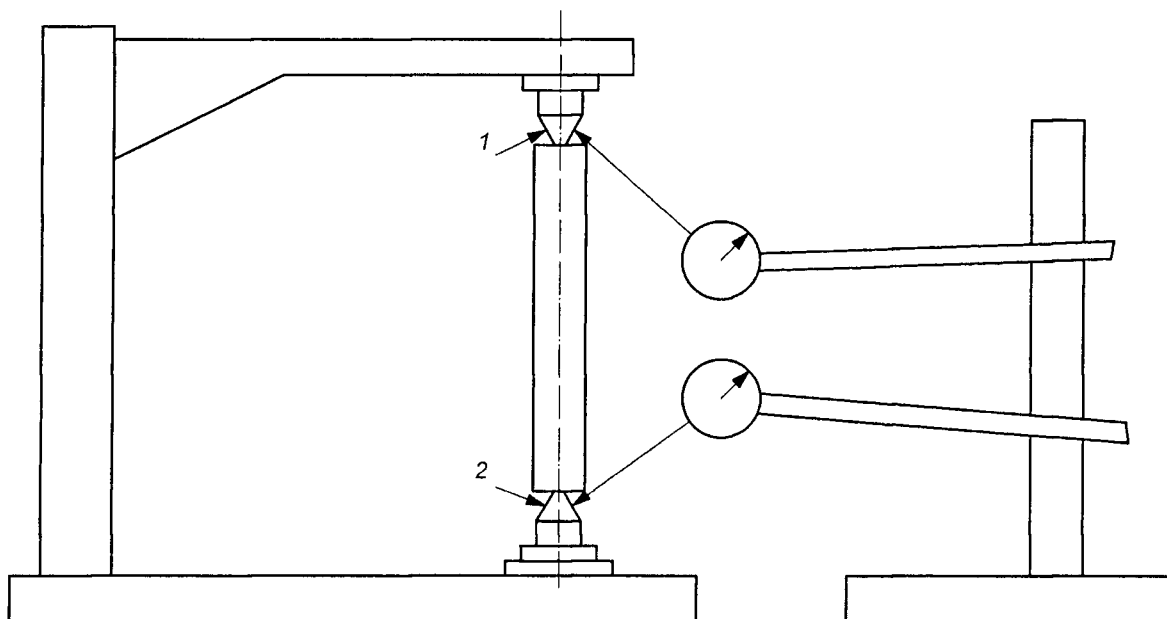
Ступінь точності перевіряння згідно з ISO 1328-1 та ISO 1328-2	Биття центрів (TIR), мкм	Паралельність осі Z з віссю шпинделя в будь-якому виміряному 200 мм діапазоні		Співвісність верхнього центра з віссю шпинделя (TIR) на 200 мм <sup>d</sup>
		A <sup>b</sup> , мкм	B <sup>c</sup> , мкм	
2	1	1	2	2
3	1	2	2	2
4	1	2	3	3

Кінець таблиці 1

Ступінь точності перевіряння згідно з ISO 1328-1 та ISO 1328-2	Биття центрів (TIR), мкм	Паралельність осі Z з віссю шпинделя в будь-якому вимірюваному 200 мм діапазоні		Співвісність верхнього центра з віссю шпинделя (TIR) на 200 мм <sup>d</sup>
		A <sup>b</sup> , мкм	B <sup>c</sup> , мкм	
5	2	3	4	4
6	2	4	6	6
7	3	5	6	6
8	4	5	6	6
9	5	7	6	6
10	7	10	8	8
11	10	10	12	12
12	10	10	12	12

<sup>a</sup> Норми для універсальних приладів. Спеціальні прилади можуть використовувати тільки один або більше параметрів.  
<sup>b</sup> У площині вимірювання (основна дотична). Див. рисунок 5.  
<sup>c</sup> Перпендикулярно до площини вимірювання. Див. рисунок 6.  
<sup>d</sup> Допуск співвісності є більшим ніж 2 мкм або допуску таблиці на 200 мм довжини R. Див. рисунки 3 і 4

Навантажують складові частини шпинделя розміщенням оправки між центрами. Довжина, точність або конфігурація цієї оправки не істотні. Див. рисунок 2.



Позначки:

- 1 — рухомий центр задньої бабки;  
2 — робочий центр шпинделя.

Рисунок 2 — Перевірка биття центра

#### 5.1.1.2 Позиціювання центра задньої бабки

Спосіб випробування, часто з назвою зміщення, можна використовувати, щоб дійсно оцінити позицію центра задньої бабки відносно осі основного шпинделя. Зміщення центра задньої бабки тільки в одне положення на ползках задньої бабки контролює його позиціювання для випро-

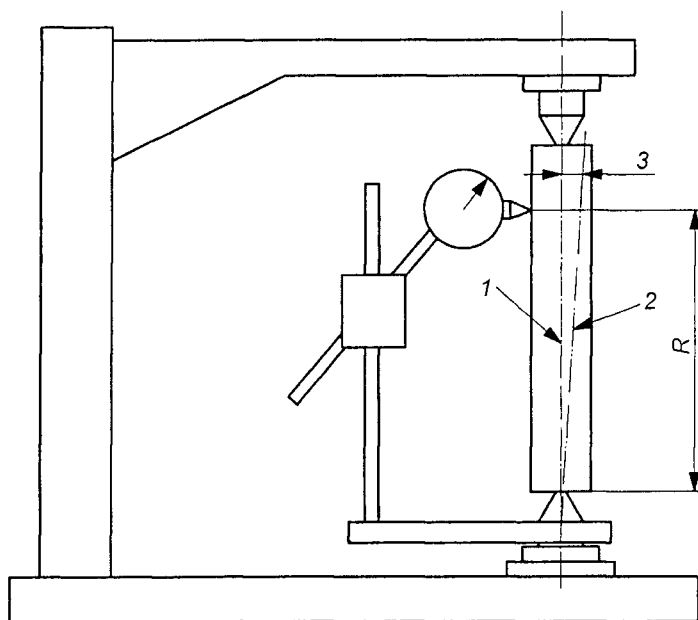
бування зубчастих коліс тільки в тому положенні. Зміщення центра задньої бабки у двох істотно відокремлених положеннях ползків задньої бабки контролює як бічне позиціювання, так і кутове вирівнювання ползків задньої бабки з віссю основного шпинделя. Якщо прямолінійність переміщення ползків задньої бабки підтверджено за технічними умовами виробника іншими методами, тоді двопозиційне випробування контролюватиме положення центра задньої бабки у всіх розташуваннях. Інакше, потрібно зміщення центра задньої бабки в три як мінімум істотно відокремлені розташування в межах його діапазону дії. Для високоякісних зубчастих передач рекомендовано, щоб зміщення було зроблене для кожної особливої конфігурації перед прийманням.

Представлено дві наладки випробування зміщенням.

а) Першу рекомендовано тільки для приладів з вертикальною віссю основного шпинделя. На рисунку 3 наведено приклад цієї наладки. Складові частини шпинделя навантажено розміщенням оправки між центрами. Точність і конфігурація цієї оправки не істотні, тому що індикатор і оправка обертаються разом. Звичайно потрібно, як мінімум, два такі випробування зміщенням, кожне використовує різні довжини оправок. Прилади, що використовують базові диски, мають випробовуватися з базовим диском, що контактує з базовими дотичними ползками, щоб гарантувати включення впливів зазора шпинделя. Довжини двох оправок має бути вибрано так, щоб вони відповідали протилежним границям діапазону дії задньої бабки.

Індикатор з відповідною роздільною здатністю монтують так, щоб він переміщувався обертотворним основним шпинделем і одночасно вимірював співвісність у радіальному напрямі (TIR) оправки біля центра задньої бабки. Ці виміри співвісності центра задньої бабки з віссю шпинделя мають бути в межах значень, наведених у таблиці 1.

Значення встановлене як відношення допустимої співвісності центра (TIR) до осьової відстані вказаного виміру від центра основного шпинделя. Таким чином, рекомендоване значення змінюється з місцем вимірювання і має бути відповідно відкориговане. Значення допуску є більшим ніж 2 мкм або допуску в таблиці на 200 мм довжини  $R$ , на рисунку 4.



Позначки:

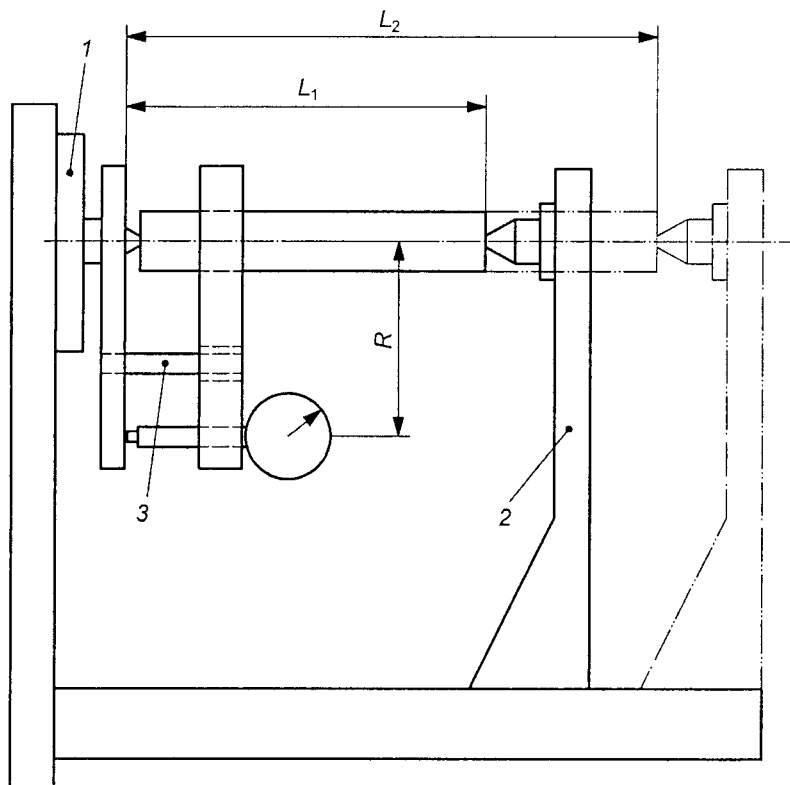
- 1 — міжцентрова вісь;
- 2 — робоча вісь шпинделя;
- 3 — похибка.

Рисунок 3 — Метод виміру співвісності задньої бабки (тільки приладів з вертикальною віссю)

б) Другу наладку випробування зміщенням рекомендовано для приладів з горизонтальною віссю основного шпинделя, але можна також використовувати і для вертикальних приладів. На рисунку 4 наведено приклад цієї наладки. Цей рисунок показує наладку зміщенням, зроблену в двох розташуваннях  $L_1$  і  $L_2$ . Як і раніше, складові частини шпинделя навантажено монтуванням оправок різної довжини між центрами в двох положеннях.

У цьому випадку індикатор з відповідною роздільною здатністю монтують так, щоб переміщався обертовою випробною оправкою і вимірював в осьовому напрямі співвісність (TIR) пристрою, переміщуваного обертовим основним шпинделем. Ці виміри вирівнювання центра задньої бабки з віссю шпинделя мають бути в межах значень, наведених у таблиці 1.

Значення встановлене як відношення допустимої співвісності центра (TIR) до осьової відстані вказаного виміру від центра основного шпинделя. Таким чином, рекомендоване значення змінюється з розташуванням вимірювання і має бути відповідно відкориговане. Значення допуску є більшим ніж 2 мкм або допуску в таблиці на 200 мм довжини  $R$ , на рисунку 4.



Позначки:

1 — робочий шпиндель;

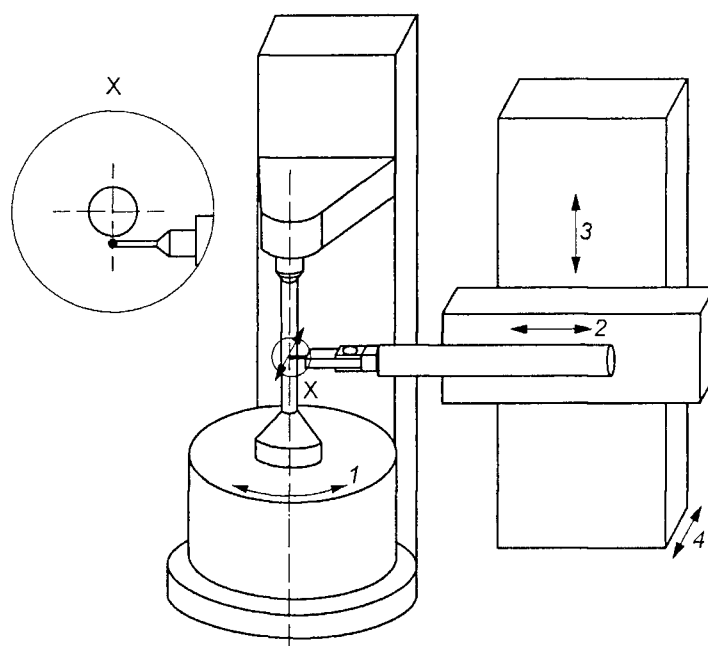
2 — задня бабка;

3 — приводний штифт (зазор в отворі).

Рисунок 4 — Пристрій для співвісності центра задньої бабки для горизонтальних або вертикальних робочих шпинделів

### 5.1.2 Контроль ползків осьового вимірювання

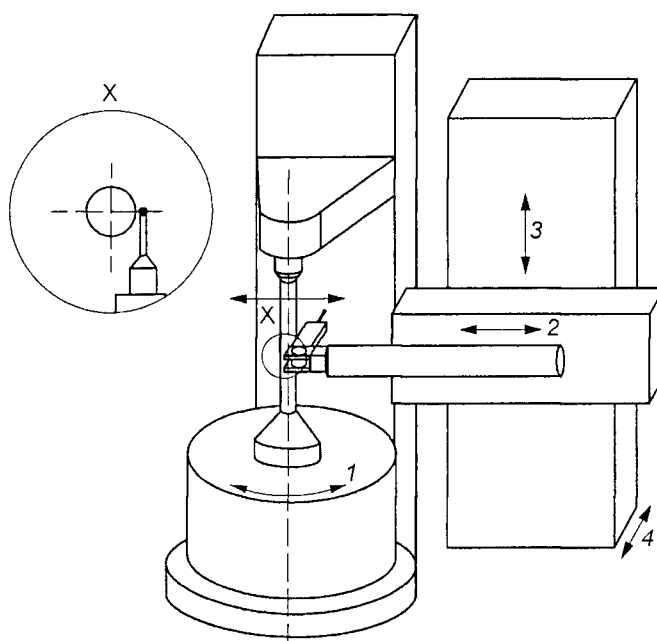
Паралельність доріжки ползків осьового вимірювання з віссю основного шпинделя має бути підтверджено. Для цієї оцінки потрібна паралельна оправка. Альтернативно, точно виготовлену оправку можна використовувати разом з самодоводжуванням реверсивним методом. Цей контроль має здійснюватися на довжині робочої зони або як мінімум 80 % повного переміщення, див. рисунки 5 і 6.



Позначки:

- 1 — напрям обертання;
- 2 — радіальний напрям;
- 3 — осьовий напрям (Z);
- 4 — дотичний напрям.

**Рисунок 5** — Вісь Z для перевірення суміщення міжцентрової осі, осьова площина паралельна площині вимірювання (основна дотична)



Позначки:

- 1 — напрям обертання;
- 2 — радіальний напрям,
- 3 — осьовий напрям (Z),
- 4 — дотичний напрям

**Рисунок 6** — Вісь Z для перевірення суміщення міжцентрової осі, перпендикулярної до площини вимірювання



#### 5.1.2.1 Розташована в центрах оправка

Оправку можна розташувати між центрами. У цьому випадку концентричність її орієнтації з віссю основного шпинделя потрібно підтвердити двома спостереженнями. Перше — її концентричність поблизу центра основного шпинделя і біля центра задньої бабки можна підтвердити вимірюванням її радіального биття біля тих центрів. Друге — її концентричність поблизу центра задньої бабки можна підтвердити зміщенням оправки. Якщо використовується наладка зміщенням, рекомендована для приладів з вертикальною віссю, тоді пробний індикатор має бути розташований біля центра задньої бабки. Рекомендовано, щоб це розташування пробної оправки було оптимізоване перед спостереженням паралельності полозків осьового вимірювання. Це може охоплювати мінімізацію биття центра основного шпинделя, биття центра шпинделя задньої бабки і похибку співвісності складових частин полозків задньої бабки при цьому пробному розташуванні.

#### 5.1.2.2 Безпосередньо змонтована оправка

Альтернативно, пробна оправка може бути розташована безпосередньо на основному шпинделі, таким чином вилучаються несприятливі впливи монтажних центрів. У цьому випадку її орієнтація, концентрична з віссю основного шпинделя, має підтверджуватися спостереженням радіального биття біля кожного кінця оправки. Потрібні регулювання центрування і нахилу, щоб оптимізувати це розташування перед спостереженням паралельності осьових вимірювальних полозків.

#### 5.1.2.3 Перевіряння паралельності осьових полозків

Раніше калібровану оправку, належним чином орієнтовану в приладі, потрібно перевіряти переміщенням по її довжині контактного вимірювального давача, веденого полозками осьового вимірювання. Це виявить помилки прямолінійності і співвісності осьових полозків. Спостереження має бути проведено в радіальному напрямі в межах двох різних осьових площин:

- a) площина, паралельна вимірювальній площині (основна дотична площина);
- b) площина, перпендикулярна до вимірювальної площини.

Див. рисунки 5 і 6.

Ці виміри паралельності полозків осьового вимірювання з віссю основного шпинделя мають бути в межах норм, наведених у таблиці 1. Представлено дві такі нормативні величини: одна — для спостережень, паралельних з вимірювальною площиною, інша — для тих, що перпендикулярні до вимірювальної площини. Ці значення застосовують до будь-якого вимірюваного 200 мм діапазону полозків для осьового вимірювання.

#### 5.1.2.4 Зміни у співвісності з важким навантаженням

Перевіряння мають бути проведені давачем приладу, розміщеним у межах вимірювальної здатності (тобто довжина дотичних полозків плюс-мінус максимальна довжина ролика (тільки 4-осьові прилади), і радіальними полозками за обмеженого основного радіуса), див. рисунок 7.

Стіл вимірювального приладу або центр стола має завантажуватися пробним зубчастим колесом або спеціальним зразком, які представляють геометрію зуба, що відповідає обсягу вимірювання, як згадувалося вище. Потім потрібно доповнити додаткові доважки, щоб представити максимальну навантажувальну здатність, очікувану під час експлуатування, або навантажувальну здатність робочого шпинделя приладу, як установлено виробником оригінального обладнання. Потрібно використовувати менше з двох значень.

Координатно-вимірювальні машини (КВМ) можна завантажувати рівномірно по робочій ділянці стола, відповідно до типових вимірювальних застосувань.

Зміни у відносній співвісності і деформація станини машини мають бути такими, щоб вимоги точності співвісності і прямолінійності, задані, або за таблицею 1, відповідали прикладеному навантаженню.

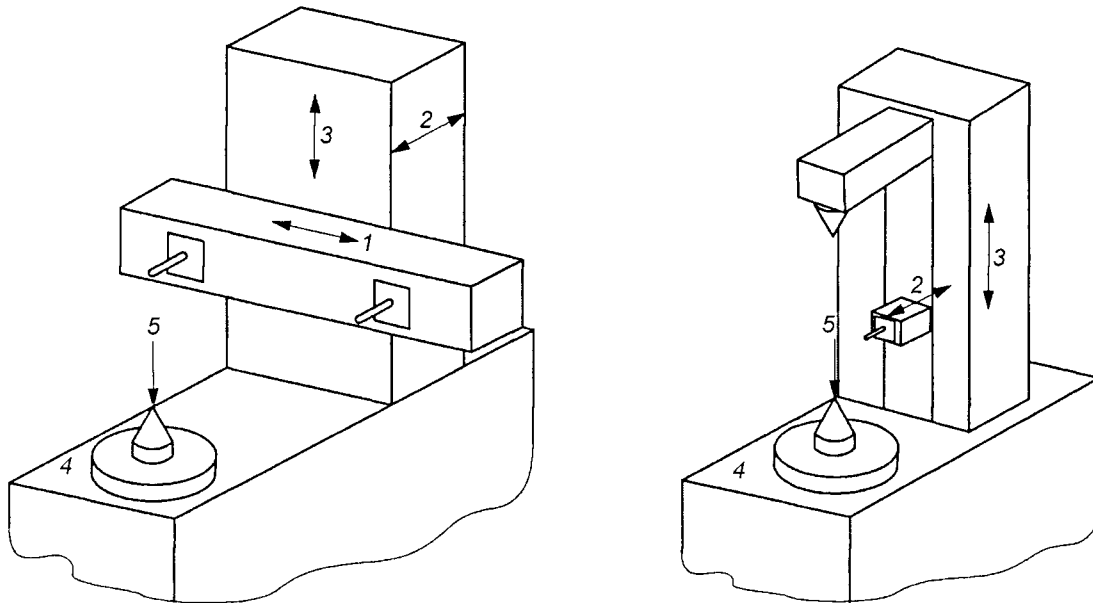
Методику випробування має бути проведено, як зазначено нижче:

- a) завантажують і закріплюють плоске випробне зубчасте колесо на вимірювальному столі;
- b) перевіряють нахил лінії зуба випробного колеса на позначеному і визначеному зубі. Зазначають існуючі відхилення у співвісності із записаного графіка;
- c) із залишеним випробним зубчастим колесом на вимірювальному столі розміщують вагу приблизно 1/4 потрібної навантажувальної здатності вгорі випробного зубчастого колеса;

d) повторюють те саме випробування, як зазначено вище в b). Потрібно використовувати той самий зуб і радіальне положення зуба, як в b). Порівнюють результати тестування з результатами, отриманими під час початкового випробування b);

e) збільшують додаткове навантаження, якщо можливо, на всі чотири додатки, перевіряючи результати випробування за кожного додаткового збільшення;

f) перевіряють, щоб зміна у відносній співвідношенні і деформація станини були в межах установлених границь, як прийнято або за таблицею 1.



а) Чотирьохосьовий вимірювальний прилад

б) Трьохосьовий вимірювальний прилад

Позначки:

- |                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| 1 — дотичний;   | 4 — обертовий,    |
| 2 — радіальний; | 5 — навантаження. |
| 3 — осьовий;    |                   |

**Рисунок 7** — Положення основної дотичної полозка під час перевіряння відхилів ( $\pm$  максимальна довжина ролика для перевіреного об'єму вимірювання)

## 5.2 Методики оцінювання вимірювальних приладів типу КВМ

На КВМ з або без обертового столу вимірювання зубчастих коліс можливо, коли доступне програмне забезпечення спеціального призначення. Визначення осі зубчастого колеса досягають вимірюванням підшипникових (цапфових) або інших базових поверхонь і використовують для подальшого вимірювання.

### 5.2.1 Випробування для визначення робочих характеристик згідно з ISO 10360

В ISO 10360 встановлено спеціальний тест для визначення робочих характеристик координатно-вимірювальних машин. Перевіряння проводять на плоско-паралельних кінцевих мірах довжини і на високоточній каліброваній кульці з діаметром переважно 25 мм або 30 мм.

Встановлено 3 тести:

- Е — відхил об'ємного вимірювання довжини;
- Р — відхил об'ємного зондування;
- ТНР — відхил об'ємного сканування.

Для тесту Е набір 5 каліброваних плоско-паралельних кінцевих мір довжини має бути зміряний 3 рази за 7 положеннями з 2 зондуваннями на кінцеву міру. Орієнтація кінцевих мір може бути в будь-якому напрямі простору (об'ємно). Усі 105 вимірів мають бути в допуску (100 %).

Для тесту R високоточна (напів-)сфера має бути виміряна в 25 однаково розподілених одиночних точках зондування. Усі зондування (100 %) має бути використано для оцінювання. Повний відхил виміряної форми є похибкою об'ємного зондування R.

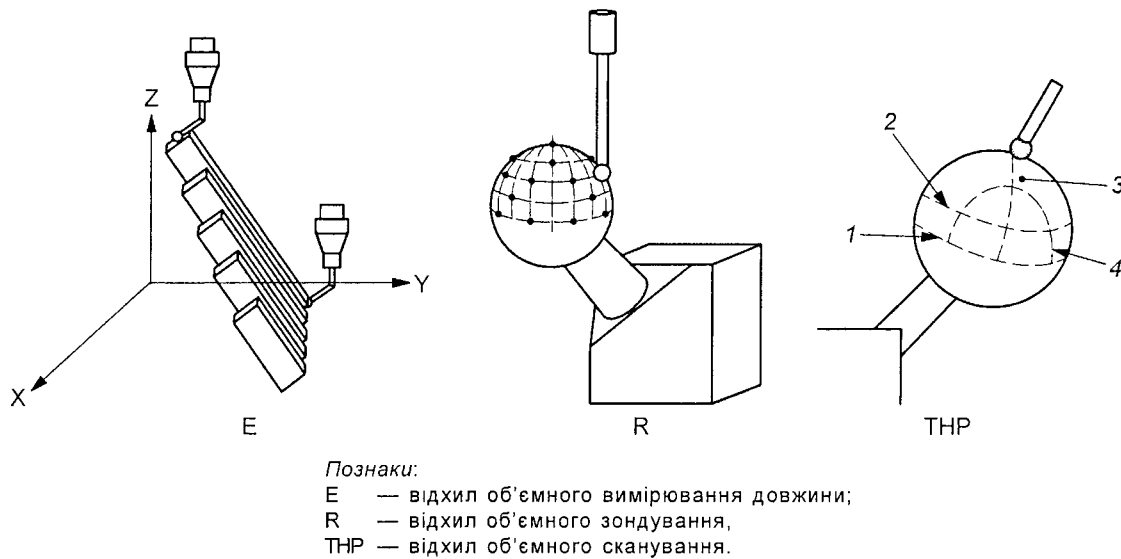


Рисунок 8 — Об'ємні тести КВМ

Для тесту TNP потрібно здійснити кілька ліній сканування.

На тести R і TNP більше впливають робочі характеристики системи зондування, тоді як тест E належить і до системи зондування, і до сумарної погрешності.

### 5.2.2 Випробування на плиті з кульками

Альтернативно використовують плиту з кульками, щоб перевірити точність КВМ. Плита з кульками складається з пластини зі сталі або іншого матеріалу, на якій розміщено в прямокутній сітці координат високоточні кульки, див. рисунок 9. За допомогою спеціального програмного забезпечення положення кульок автоматично вимірюють і порівнюють з відкаліброваними положеннями. Плиту з кульками встановлюють у різних орієнтаціях в об'ємі вимірювання, тобто паралельно координатним площинам і по діагоналі.

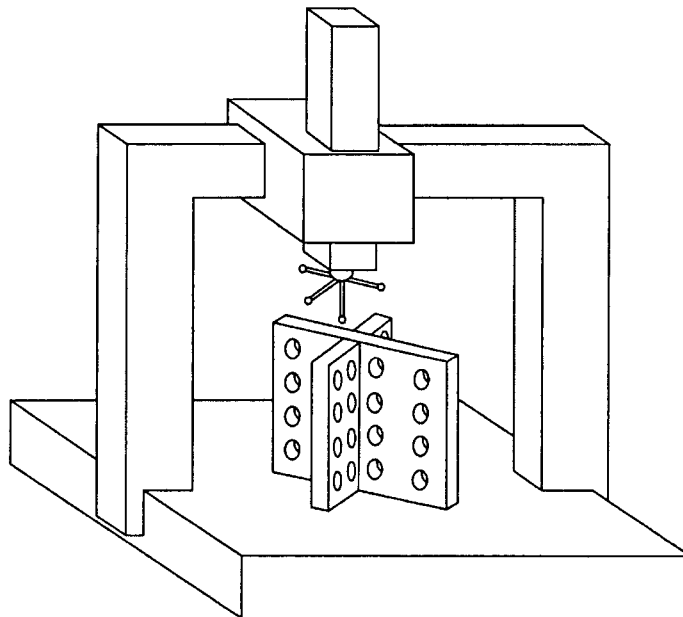


Рисунок 9 — Випробування на плиті з кульками

### 5.2.3 Поворотні столи

Для приладів КВМ з поворотними столами також потрібно дотримуватися методик ISO 10360, див. рисунок 10.

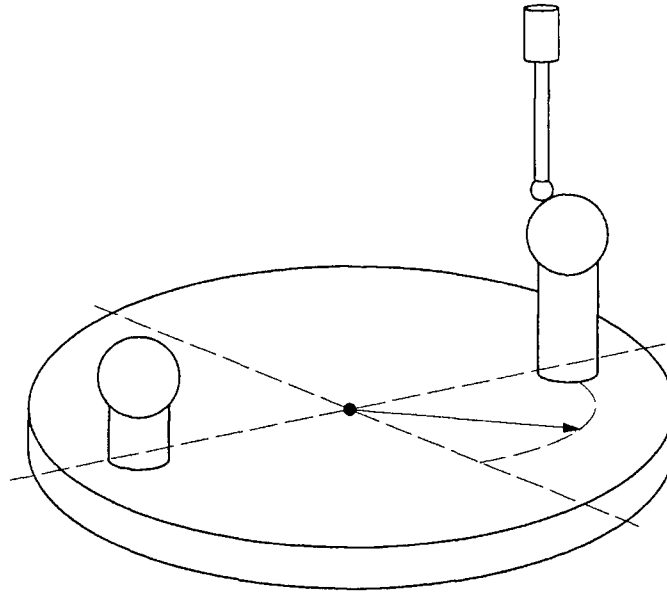


Рисунок 10 — Випробування на поворотному столі

### 5.3 Система контактного вимірного давача

Збір даних і система обробки складається з головки щупа, механізму вимірного давача і системи реєстрації даних.

#### 5.3.1 Щуп

Вибирають і перевіряють стан щупа й записують його розмір і геометрію. Контролюють положення щупа на приладі повторним таруванням або використовують установний пристрій виробника.

##### 5.3.1.1 Сферичні наконечники щупа, що використовують у генеративних приладах

Сферичні наконечники щупа використовують часто, особливо на керованих комп'ютером генеративних або КВМ приладах. Сферичні наконечники щупа менше зазнають зношування, з меншою ймовірністю залишають слід на бічній поверхні зуба і краще прилаштовані до методів тарування керованого комп'ютером положення, ніж гострі наконечники щупа.

Генеративні прилади виміряють похибки геометрії як відхили від твірної номінальної геометрії. Перевіряння евольвентного профілю передбачає формування номінальної евольвенти згідно з особливістю постійного підймання форми тієї кривої. Під час таких перевірянь центр сферичного наконечника головки і його точка контакту з поверхнею зуба утримуються в межах площини зачеплення. Перевіряння генеративної гвинтової лінії виконують згідно з формуванням номінальної гвинтової лінії. Перевіряння генеративного кроку зубців передбачає обертове позиціонування зубчастого колеса згідно з ідеальними рівномірно розміщеними розташуваннями зубців. На немодифікованих евольвентних гвинтових бічних поверхнях зубців точка контакту між сферичним наконечником щупа і бічною поверхнею зуба буде лишатися постійною протягом випробувань, проведених згідно з цими генеративними методами. Зміни вектора контакту і сферичності наконечника щупа не є істотними проблемами в цьому випадку.

Проте бічні поверхні зубців можуть представляти суттєві відхили від евольвентної геометрії. Це може бути внаслідок навмисної модифікації, такої як зріз вершин або непередбачені виробничі відхили. Суттєві відхили від евольвентної геометрії спричиняють зміну в векторі контакту, яка може впливати на спостереження положення і контуру цих ділянок відхилу, навіть під час застосування генеративних методів перевіряння. У таких випадках, можливо, буде необхідним застосовувати програмне коригування даних перевірки.

Використання сферичних наконечників щупа спричинить уявне заокруглення на кінцях бічних поверхонь зубців, навіть за наявності відносно гострих країв. Це звичайно трапляється на зовнішньому діаметрі під час перевіряння евольвентного профілю і на торцях бічної поверхні під час перевіряння гвинтової лінії. Таке уявне заокруглення можна вилучити застосуванням виправлень програмного забезпечення. Альтернативно, ним можна просто знехтувати, оскільки очевидне заокруглення виникає тільки поза краєм бічної поверхні зуба. Оцінювання заокруглення краю або особливостей фасок, звичайно, краще виконують приладами, відмінними від тих, що призначені для метрології профілю поверхні зубчастого колеса.

Сферичні наконечники щупа виконують вищий рівень механічної фільтрації даних перевірки, ніж гострі наконечники щупа. У більшості випадків це не істотна проблема.

#### **5.3.1.2 Сферичні наконечники щупа, що використовують у приладах КВМ**

КВМ зазвичай не використовують генеративні методи. Швидше геометрію профілю поверхні зуба розглядають як ряд точок, кожна з набором трьох розмірних координат. Під час таких тестів точки контакту між сферичним наконечником щупа і бічними профілями зубців будуть значно змінюватися. Щоб досягти дійсних вимірів, ця зміна вектора контакту має пристосовуватися пов'язаною комп'ютерною програмою. Сферичність наконечника щупа також має бути враховано.

Полярна КВМ типово вимірює гвинтову лінію зуба й евольвентний профіль згідно з генеративними методами. Це передбачає трасування поверхні зуба вздовж ряду радіальних точок, у той час обертанням змінюється позиція зубчастого колеса, необхідна, щоб підтримувати контакт з вимірювальним давачем.

#### **5.3.1.3 Гострі наконечники щупа**

Гострі (з малим радіусом) наконечники щупа часто використовують у генеративних приладах, але не всюди в КВМ. Гострі наконечники щупа краще пристосовані до механічних методів тарування положення, ніж сферичні наконечники щупа. Звичайно використовують гострі наконечники щупа різцевого типу і дискового типу (одиначний або подвійний конічний).

Різцевий тип є відносно простим, щоб тарувати позицію контактом з точною оправкою відомого діаметра. Ця практика дієва тільки тоді, якщо наконечник щупа різцевого типу підтримується гострим, таким чином це гарантує, що контакт буде здійснюватися тільки кінцем наконечника. Звичайно щупи різцевого типу використовують тільки в контрольно-вимірювальних приладах евольвентних профілів.

Наконечники щупа дискового типу є більш вимогливими для роботи й обслуговування з потрібною точністю. Вони можуть бути використані в позиціюванні оправки, але часто натомість використовують спеціальний пристрій. Щупи дискового типу особливо добре пристосовані до приладів, що перевіряють евольвентний профіль і лінію нахилу зуба.

Порівняно зі сферичними наконечниками щупа, гострі наконечники щупа менше зазнають впливу суттєвих відхилів профілів зуба від евольвентної геометрії, створюють менше механічне фільтрування даних перевірки і створюють дуже мале уявне заокруглення краю під час випробовування евольвентних профілів. Гострі наконечники щупа дискового типу утворюють уявне заокруглення краю під час перевіряння гвинтової лінії, рівнозначні тим, які спричинені сферичними наконечниками щупа.

#### **5.3.2 Системи реєстрації даних**

Нижче наведено пояснення і загальні нормативи щодо критичних похибок вимірювання контактним давачем. Методи оцінювання стосуються переважно механічних приладів для зубчастих передач з використанням електронної або механічної системи вимірювання контактним давачем. Для контрольованих комп'ютером вимірювальних систем, таких як КВМ(и) або генеративного типу ПВП (програмовані вимірювальні пристрої), потрібно дотримуватися рекомендацій виробників під час оцінювання системи вимірювального давача і регулювання.

Див. таблицю 2 щодо точності вимірювального давача і нормативів вимірювальної системи.

Більшість систем вимірювальних давачів двонаправлені так, щоб вони могли вимірювати ліві і праві бічні поверхні зубців. Важливо, щоб вимірювальний давач був перевірений в обох напрямках. Також беруть до уваги, що динамічні характеристики не перевіряють за цією методикою випробування.

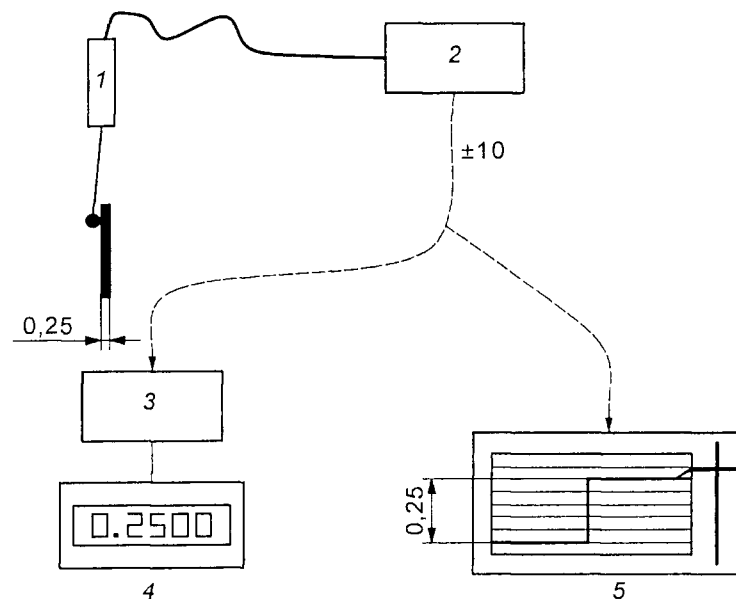
Таблиця 2 — Нормативи системи вимірювального давача

Ступінь точності, що перевіряють згідно з ISO 1328-1 та ISO 1328-2	Похибка коефіцієнта передавання вимірювального давача (% діапазону вимірів)	Роздільна здатність, мкм	Холостий хід, мкм
2	1	0,1	0,2
3	1	0,1	0,2
4	1	0,1	0,2
5	2	0,2	0,4
6	2	0,2	0,4
7	3	0,2	0,4
8	3	0,5	0,5
9	3	0,5	0,5
10	3	1,0	1,0
11	3	2,0	2,0
12	3	2,0	2,0

### 5.3.2.1 Коефіцієнт передавання

Оцінювання коефіцієнта передавання контрольно-вимірювальної системи передбачає порівняння фактичних відхилів давача зі значенням відхилення, вказаного кінцевим вихідним пристроєм (див. рисунок 11). Коефіцієнт передавання буде вимірюватися величиною відхилення давача відносно повної шкали системи для кожного напрямку, доступного на приладі. Це має бути зроблено, переконавшись, що всі вимірювання виконано під час руху в тому самому напрямі. Це може бути здійснено використанням плоскопаралельних кінцевих мір довжини, мікрометра, каліброваної ступінчастої або плоскої осьової лінійки чи іншого каліброваного пристрою. Підносять давач до відомої позиції на одному кінці шкали в зазначеному наперед напрямі. Використовуючи один із вищезазначених методів, підносять давач до позиції в іншому кінці шкали, наближаючись у тому самому напрямі, як раніше. Коефіцієнт передавання має бути відрегульовано як потрібно, щоб отримати прийнятне порівняння між фактичним відхиленням і вказаним відхиленням.

Розміри у міліметрах



#### Позначки

- 1 — лінійний давач на основі диференційного трансформатора LVDT,
- 2 — підсилювач давача (аналоговий),
- 3 — аналоговий пристрій до цифрового перетворювача,
- 4 — кінцевий пристрій зняття показів — цифровий,
- 5 — кінцевий пристрій зняття показів — стрічкова діаграма

Рисунок 11 — Коефіцієнт передавання контрольно-вимірювальної системи

Додатково до цього випробування потрібно зробити додаткові вимірювання, щоб перевірити лінійність, і двонаправлені вимірювання, щоб перевірити холостий хід. Див. рисунки 12 і 13.

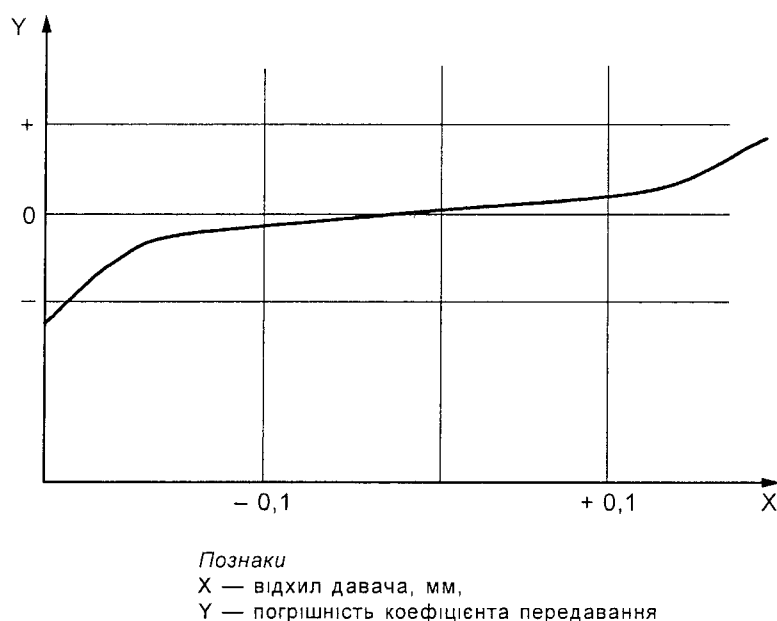


Рисунок 12 — Лінійність системи LVDT

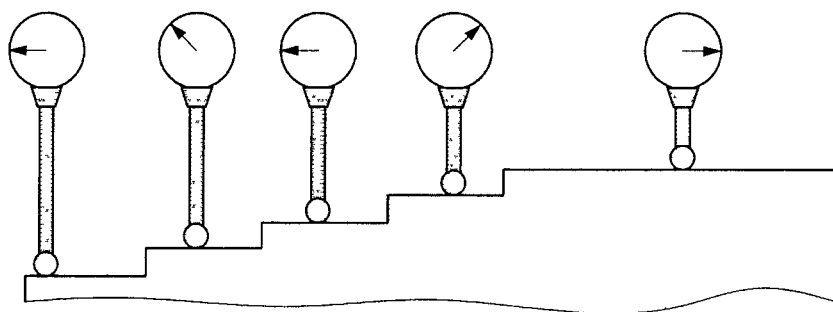


Рисунок 13 — Лінійність зі ступінчастим калібром

### 5.3.2.2 Холостий хід

Холостий хід може бути описаний, як різниця між показами давача, коли він перебуває точно в такій самій позиції після наближення з протилежних напрямів. Див. рисунок 14.

Цей холостий хід можна визначити ретельним вимірюванням каліброваного перепаду на евольвентному профілі або гвинтовій поверхні. Оскільки неможливо передбачити, що поверхня перебуває точно в такій позиції на обох боках перепаду, глибину перепаду треба вимірювати двома способами. Перший: підносять давач до відомої позиції проти поверхні, що поряд з перепадом, рухаючись у плюсовому напрямі, потім вимірюють глибину перепаду. Другий: повторюють вимірювання після піднесення давача до відомої позиції, рухаючись у мінусовому напрямі. Різниця у виміряній глибині є холостим ходом.

Вищезазначені еталонні зразки неможливо використовувати на приладі вимірювання кроку зубців. Один метод використовує оправку зі шліфованою лискою. Підносять давач до відомої позиції на концентричній частині поряд з лискою, рухаючись у плюсовому напрямі, й обертають оправку, щоб виміряти глибину лиски. Потім повторюють вимірювання піднесенням давача до відомої позиції, рухаючись у мінусовому напрямі. Різниця у виміряній глибині є холостим ходом.



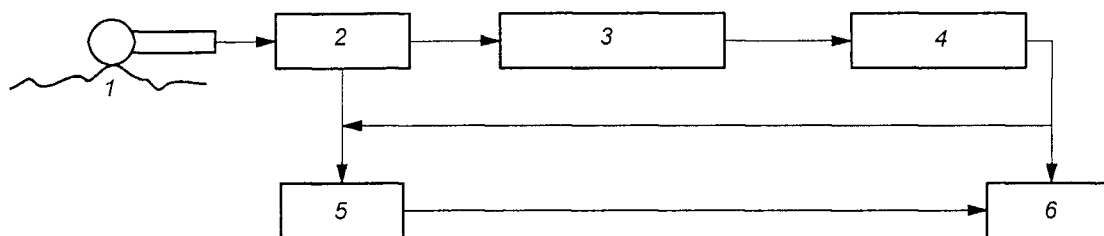
Рисунок 14 — Холостий хід системи вимірювання

Іншим методом вимірювання холостого ходу є наближення до тієї самої позиції на координатній шкалі лімба з протилежних напрямів із давачем напроти фіксованого об'єкта. Різниця між показами давача є холостим ходом. Потрібно звертати увагу на гарантування відсутності холостого ходу в координатній шкалі лімба/головці зчитування, інакше цей метод дасть помилкові результати.

#### 5.4 Фільтрування

Виміри охоплюють відхили багатьох різних довжин хвиль або частот. Фільтр, який зменшує короткохвильові (високочастотні) дані, називають низькочастотним фільтром. Це тільки один тип фільтрування, звичайно застосовуваний приладами метрології зубчастих передач. Воно спричиняє вирівнювання даних і знехтування впливами структури поверхні.

Важливо знати тип використаного фільтрування: механічний, електричний та математичний. Див. рисунок 15.



##### Позначки

- 1 — форма наконечника давача — механічне фільтрування,
- 2 — аналоговий підсилювач давача — електронне або механічне фільтрування,
- 3 — аналог до цифрового перетворювача — вхідний сигнал може бути відформатований активним низькочастотним електронним фільтром,
- 4 — цифровий фільтр програмного забезпечення — після перетворення відхилю до цифрових значень, програмне забезпечення може застосовувати цифрове фільтрування,
- 5 — аналоговий індикатор — вхідний сигнал може бути сформований електромеханічним фільтруванням індикатора,
- 6 — цифровий індикатор — додаткове цифрове фільтрування можна застосовувати до обох проб

Рисунок 15 — Типи фільтрування

##### 5.4.1 Механічне фільтрування

Механічне фільтрування обмежує зібрані дані випробовування довгохвильовими (низькочастотними) значеннями і тому є фільтруванням низькочастотного типу. Це відбувається, коли поверхня наконечника давача перекриває високочастотні (короткохвильові) нерівності поверхні, таким чином придушуючи відхили в тій частині спектра.

У більшості випадків довжини хвиль, усунені з даних випробування механічними фільтрувальними діями сферичного наконечника щупа, не є значними. У застосуваннях, що вимагають доулучення цих дуже високочастотних даних, можна встановити конструкції щупів менших радіусів.



Під час використання давача довгої досяжності з малим наконечником потрібно остерігатися, щоб інерція пружних мас давача вимірювального приладу не згладжувала траєкторію фактичної форми зуба.

#### **5.4.2 Електричне фільтрування**

Електричне фільтрування обмежує зібрані дані випробовування довгохвильовими (низькочастотними) значеннями і тому є фільтром низькочастотного типу. Протягом електричного фільтрування сигнал даних випробовування проходить від головки давача через контур (RC) електричного фільтрування і остаточно до вихідного пристрою спостереження даних.

Контури електричного фільтрування розроблені, щоб досягти усунення високочастотних даних випробування за встановленої довжини хвилі, названої частотою відсічки. Всі дані за частот суттєво вищих, ніж частота відсічки, будуть усунені.

Невдалим ефектом електричного фільтрування RC є фазове зміщення даних, що може впливати на аналізування результатів випробування.

#### **5.4.3 Математичне фільтрування**

Математичне фільтрування вимагає, щоб дані випробування спочатку було перетворено із аналогових до цифрових і дозволило обробку цифровим комп'ютером. Звичайно доступні два загальні типи математичного фільтра. Перший тип емулює характеристики електричних фільтрів (з або без фазозмінної характеристики контура RC). Інший тип спирається на математику Гауса. Рекомендується використання цифрового фільтра Гауса, оснований на характеристиках передавання амплітуди синусоїдальної хвилі і у відповідності зі стандартами ISO.

Корисною була б можливість проглянути дані випробування під час застосування різного математичного фільтрування.

#### **5.5 Оцінювання погрішності**

Заключною процедурою є оцінення погрішності процесу вимірювання. Рекомендовано використання еталонних зразків, таких як ті, що описані в розділі 6, і методики оцінення погрішності вимірювання, такої як ті, що описано в розділах 7, 8 і 9. В розділі 11 наведено правила з визначення придатності до використання процесу вимірювання і рекомендації для зменшення погрішності вимірювання.

### **6 ЕТАЛОННІ ЗРАЗКИ**

Еталонним зразком є будь-який відповідний об'єкт, що має нерозривний ланцюжок просліджуваних калібрувань з правильним трактуванням погрішностей вимірювання на кожному етапі ланцюжка. Еталонні зразки звичайно мають високоточні базові поверхні, щоб встановити базову вісь і високоякісні випробні поверхні типових представників геометрії бічної поверхні зуба евольвентної гелікоїдальної зубчастої передачі. Еталонні зразки мають бути подібні за розміром і геометрією до виготовлених зубчастих передач, інспектованих на вимірювальному приладі. Еталонні зразки мають зберігатися за таких самих умов навколишнього середовища, як і вимірювальний прилад зубчастих передач, і бути захищеними від пошкодження або корозії.

Ключовою характеристикою еталонних зразків є їх геометрична стабільність. Адекватна стабільність є невід'ємною вимогою порівняльного методу оцінювання погрішності вимірювання. Оскільки дуже важко виявити проблеми зі стабільністю в еталонних зразках під час використання, важливо, щоб їх конструкція, матеріал, виготовлення і користування мінімізували нестабільність.

Елементи еталонного зразка, такі як бічна поверхня й основні параметри зуба, мають відповідати ISO/TR 10064-1.

#### **6.1 Установка базових елементів**

Еталонні зразки звичайно встановлюють між центрами на випробувальному приладі. Це зручно і прийнятно, хоча є багато інших можливих конфігурацій. Проте, оскільки фізична орієнтація еталонного зразка до приладу може впливати на результати випробування, то еталонні зразки мають бути забезпечені відповідними базовими поверхнями, щоб дозволити підтвердження правильного установлення. Типово ця вимога реалізується розташуванням ідентифікаційних базових діаметрів у напрямі кожного кінця еталонного зразка. Величина і кутова орієнтація параметрів биття цих базових поверхонь має бути долучена в дані сертифіката еталонного зразка і підтверджуватися як частина методики калібрування випробувального приладу евольвентного профілю.

Еталонні зразки також можуть бути сконструйовані без забезпечення установки між центрами на випробувальному приладі. Такі еталонні зразки мають бути забезпечені або двома базовими діаметрами, розташованими біля кожного кінця еталонного зразка, або одним базовим діаметром і базовою поверхнею, розташованою на одному торці. Для цього типу еталонного зразка вимагається ретельне позиціювання еталонного зразка так, щоб мінімізувати биття базових поверхонь. Еталонні зразки цього типу мають кругову діаграму, що документує величину й орієнтацію биття цих базових елементів, включно з сертифікатом підтвердження.

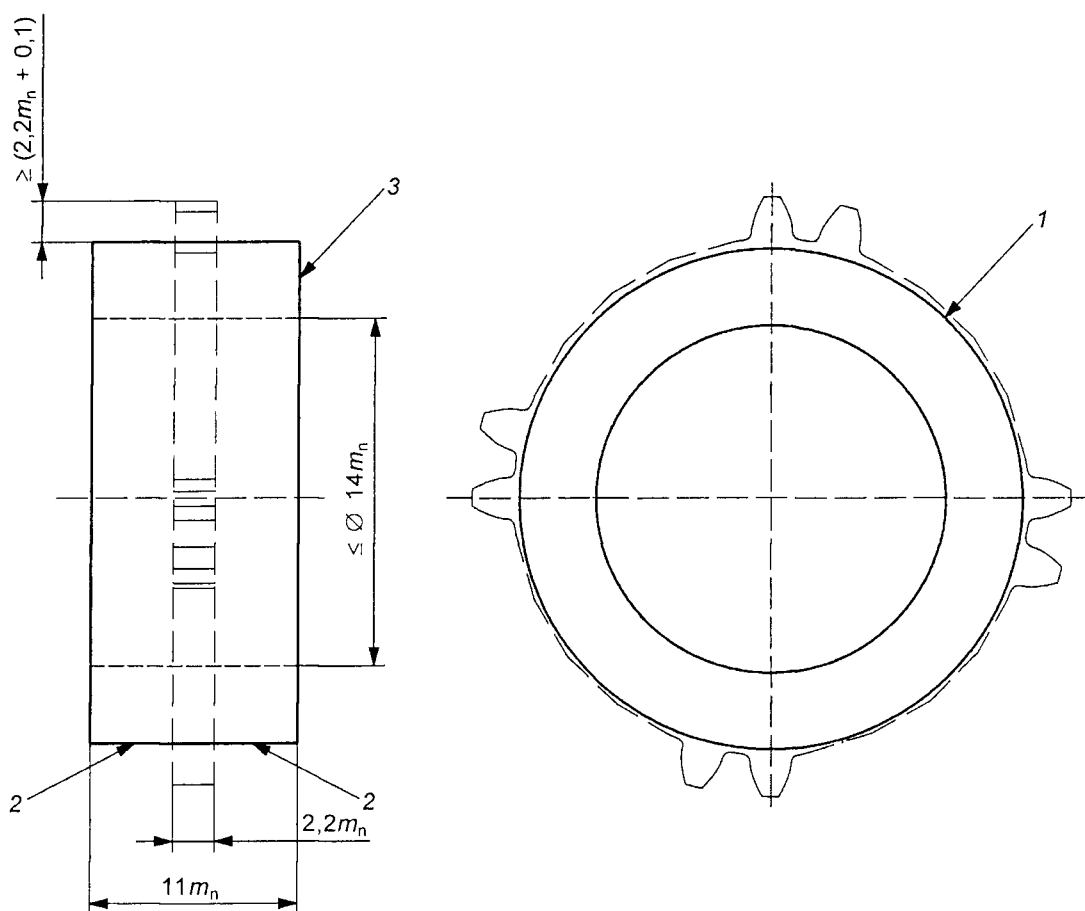
## 6.2 Запропоновані контрольні еталонні зразки

Як указано в ISO 18653, є багато методів і еталонних зразків, які можна використовувати для калібрування. У 6.2.2—6.2.5 наведено запропоновані конструкції еталонних зразків, які використовують фактичну форму евольвентного зуба.

### 6.2.1 Об'єднаний еталон евольвенти основного кола

Еталонний зразок, зображений на рисунку 16, є одним способом використання фактичної форми евольвенти зуба. Ця конструкція дозволяє контролювати евольвенту з основних параметрів за допомогою обкату і суміщення на основному колі.

Розміри у міліметрах



Рекомендовані пропорції: початковий діаметр  $24 m_n$  і стандартний кут профілю  $20^\circ$

#### Позначки

- 1 — основне коло,
- 2 — радіальна база,
- 3 — осьова база

Рисунок 16 — Пропорції еталона евольвенти

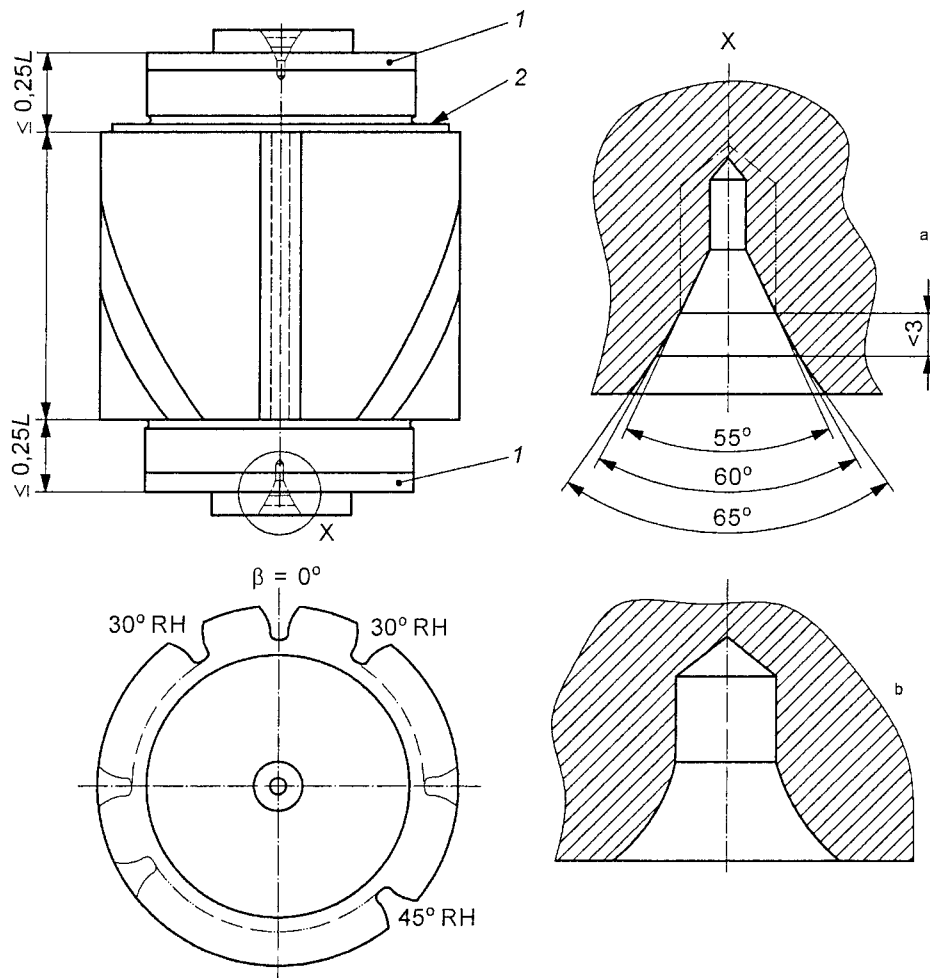
### 6.2.2 Еталонний зразок гвинтової лінії зуба

Є багато методів і еталонних зразків, які можна використовувати для калібрування. Еталонний зразок, зображений на рисунку 17, є одним зі способів використання фактичної форми гвинтової лінії зуба.

Цей еталонний зразок можна використовувати між центрами або розташовувати на нижній відшліфованій поверхні. Осьові і радіальні контрольні заплечики передбачені для визначення, чи еталонний зразок належним чином розміщений на приладі, що калібрують. Використовують або обидві радіальні базові поверхні, або одну радіальну й осьову поверхню. Еталонний зразок має одну праву і одну ліву гвинтові лінії зуба та один проміжок без нахилу лінії зуба. Кут нахилу лінії зуба для проміжків з правою (RH) і лівою (LH) гвинтовими лініями має бути однаковим. Вони мають бути більшими ніж або дорівнювати куту гвинтової лінії зуба зубчастих коліс, що будуть вимірюватися на приладі.

Рекомендована ширина зубчастого вінця — 100 мм або більше від ширини зубчастого вінця виготовленого зубчастого колеса і зовнішній діаметр має бути менше ніж або дорівнювати довжині  $L$ . Подовження вала на будь-якому кінці мають бути не довше ніж 0,25 кратної ширини зубчастого вінця для кращої стабільності.

Розміри у міліметрах



Рекомендовані пропорції: довжина  $L = 100$  мм або більше, ніж ширина зубчастого вінця виготовленого зубчастого колеса. Верхня ділянка і величина биття відносно центрів осьової базової поверхні мають бути позначені на еталонному зразку.

Позначки:

1 — радіальна базова поверхня;

2 — осьова базова поверхня;

a — центри з вузькою смужкою  $60^\circ$ , з мінімальною погрешністю форми;

b — центри радіусного типу.

Рисунок 17 — Запропонована конструкція еталонного зразка гвинтової лінії зуба

### **6.2.3 Еталонний зразок для відхилення кроку, повного накопиченого відхилення кроку і биття**

Запропонована конструкція еталонного зразка калібрування є одним зі способів використання еталонного зразка типу «зубчасте колесо з двома різними радіальними контрольними поверхнями», див. рисунок 18.

#### **6.2.3.1 Опис еталонного зразка для кроку і биття**

Еталонний зразок можна встановити між центрами на оправці або розмістити на нижній шліфованій поверхні. Осьова і радіальна контрольні поверхні передбачені для визначення, чи еталонний зразок належним чином розміщено на приладі, що калібрується. Є дві різні радіальні контрольні поверхні. Еталонний зразок сертифікується на кожній із них незалежно. Одна радіальна контрольна поверхня визначає місце еталонного зразка з мінімальною величиною відхилення кроку, накопиченого кроку і биття. Інша радіальна контрольна поверхня визначає місце еталонного зразка з типовою величиною биття. Це передбачає відому величину радіального биття, щоб дозволити перевірку здатності програмного забезпечення приладу розрахувати биття зі зняття показів стрілки. Також є осьовий контрольний заплечник, який має бути вирівняний або проконтрольований. Якщо еталонний зразок встановлено між центрами, тоді ці контрольні поверхні мають бути належним чином вирівняні, або приведені до мінімального биття.

Еталонний зразок повинен мати від 18 до 30 зубців і бажано просте число. Як мінімум три послідовні западини (або зубці) повинні мати номери, витравлені на них. Це забезпечить контроль початкової точки і послідовність вимірювань навколо еталонного зразка, див. рисунок 18.

Пропорції заготовки можуть варіюватися від запропонованих рекомендацій. Структура поверхні та геометрії зубців і контрольні поверхні мають бути витримані з точністю, достатньою для необхідного калібрування і погрішності.

#### **6.2.3.2 Сертифікація**

Еталонний зразок має бути сертифіковано на максимальне відхилення кроку, накопичене відхилення кроку і биття початкової лінії, відносно обох радіальних контрольних поверхонь. Див. ISO 18653:2003, додаток А, щодо подальшої інформації. Дані для правої і лівої бічних поверхонь зубців має бути ідентифіковано згідно з рисунком В.1.

Розміщення кроку і виміри биття має бути визначено і записано у звіті калібрування.

### **6.2.4 Еталонні зразки товщини зуба**

Товщину зуба вимірюють дуже різними способами, тобто як розміри за роликами, за кульками, як довжину спільної нормалі або як вимір кута між двома бічними поверхнями зубців. На KBM (координатно-вимірювальна машина), ПВП (програмований вимірювальний пристрій) або вимірювальних приладах для зубчастих передач можна виміряти розмір за кульками або можна зробити вимір кута. Щоб перевірити результати вимірювань цих вимірювальних приладів, потрібен просліджуваний калібрований еталонний зразок.

Еталонним зразком товщини зуба є калібрований еталонний зразок, що представляє зубці або западини евольвентної форми з правою і лівою бічними поверхнями. Товщина зуба або ширина западини визначена як дуга діляльного кола між правою і лівою бічними поверхнями. На протилежній стороні завжди мають бути зубці або западини, щоб впливи ексцентричності були мінімальні, розраховують середню величину двох протилежних зубців. Використання западин замість зубців на сталевих зразках має переваги, тому що жорсткість геометрії збільшено і бічні поверхні захищено від пошкодження.

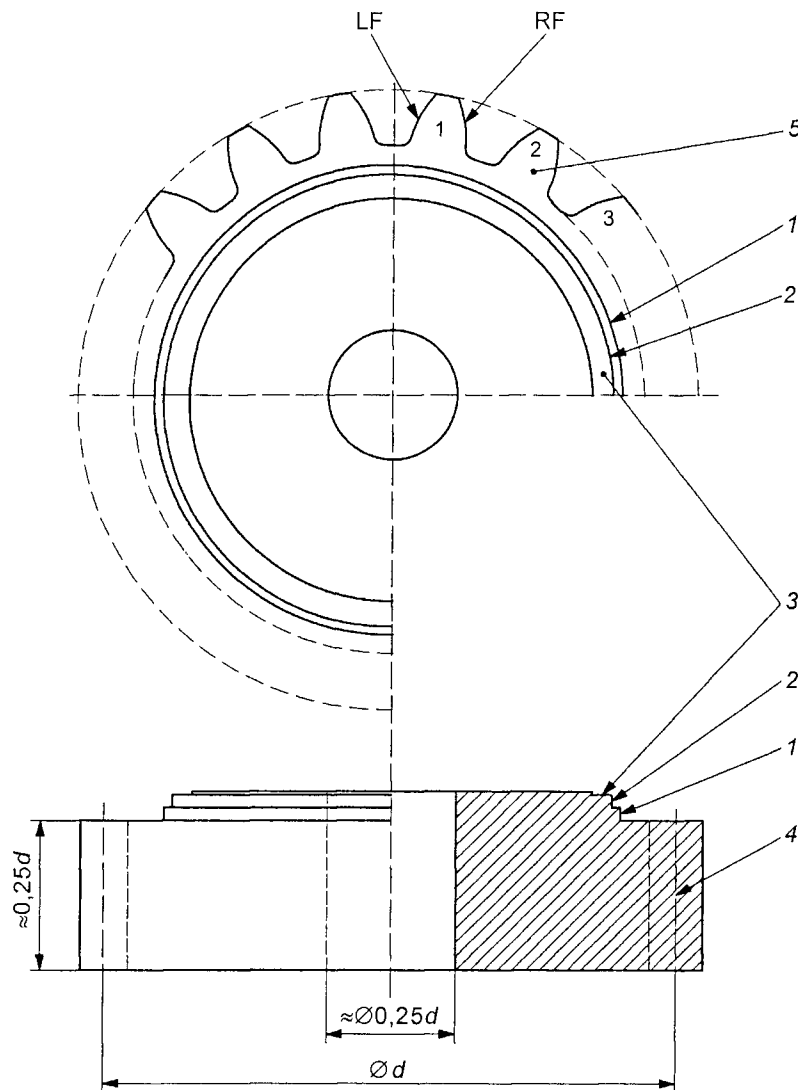
Під час вимірювання товщини зуба за різними методами важливо торкатися тих самих точок, що використовували для калібрування. Щоб отримати мінімальну погрішність, можна робити калібрування сталевих зразків тим самим вимірювальним методом, що використовували для перевірки приладу. Ці впливи є особливо важливі на косозубому сталевому зразку. Щоб отримати подібні результати вимірювання за різними вимірювальними методами, еталонний зразок має бути виготовлено з мінімальним відхилом геометрії, форми і структури поверхні. Див. ISO/TR 10064-2 щодо рекомендованих вимірювальних методів і аналізування товщини зуба.

### **6.2.5 Еталонні зразки, подібні виготовлюваним деталям**

Еталонні зразки, подібні виготовлюваним деталям, можуть забезпечити кожний параметр, вимірюваний приладом, а саме лінію нахилу, евольвенту, крок, биття й товщину зуба, використовуючи тільки один предмет (деталь). Його розмір і геометрія мають бути подібними або близькими до зубчастих коліс, використовуваних на виробничій лінії. Еталонні зразки можуть бути

зовнішнього або внутрішнього типу. Можливі модифікації на бічних поверхнях зубців передач. Рекомендовано, щоб еталонні зразки виготовляли зі стійкого матеріалу і вимірювальні поверхні були з мінімальними похибками форми і шорсткістю. На додаток, еталонні зразки вимагають контрольні заплечики високої точності для того, щоб визначити осьове і радіальне биття. Звичайно сталеві зразки, подібні виготовлюваним деталям, використовують, щоб легко оцінити специфічну погрішність вимірювання, використовуючи прямий порівнювальний метод. Також вони кваліфікуються для проведення проміжних перевірок.

Вимірювальні зубчасті колеса, звичайно виготовлені для комбінованої перевірки обох бічних поверхонь, можна використовувати як контрольні еталонні зразки, коли проводять відповідні просліджувані калібрування. Такі зубчасті колеса типово мають високоточні випробувальні поверхні, а також і відмінну стабільність і стійкість. Звичайно вимірювальні зубчасті колеса також мають високоточні базові поверхні.



Рекомендовано, щоб там були дві радіальні базові поверхні, одна — точна відносно отвору та дільного діаметра  $d$ , і друга — радіальний базовий пояс, приблизно биття 0,07 мм відносно отвору (кожна поверхня від 3 мм до 5 мм завширшки)

*Позначки*

- 1 — первинна радіальна базова поверхня (точна),
- 2 — вторинна радіальна базова поверхня ( $Fr$  0,07 мм),
- 3 — осьовий базовий заплечик,
- 4 — визначене місце вимірювання,
- 5 — базова поверхня

**Рисунок 18** — Запропонована конструкція еталонного зразка для кроку, накопиченого кроку і биття

### 6.3 Перевірка еталонного зразка модифікованої евольвенти основного кола

Також можна перевірити евольвентне вимірювальне зубчасте колесо стосовно більшого або меншого модуля, щоб виробити нахилений слід випробування. Див. ISO 1328-1 та ISO/TR 10064-1 щодо рекомендованих методів аналізування нахилу профілю. Розрахунок, що представляє величину нахилу  $\Delta f_{H\alpha}$ , введена в евольвентний слід випробування за допомогою використання зміни модуля,  $\epsilon$ :

$$m_{n2} = m_{n1} \left[ 1 - \left( \frac{\Delta f_{H\alpha}}{L_{\alpha}} \right) \right], \quad (7)$$

де  $m_{n1}$  — нормальний модуль, пов'язаний з даними калібрування;

$m_{n2}$  — нормальний модуль, щоб утворити модифіковане відхилення нахилу;

$L_{\alpha}$  — діапазон оцінки профілю.

Усі інші параметри зубчастого колеса мають залишатися постійними.

Потрібно зазначити, що цей метод змінює хід ґвинтової хвилі, як і основний діаметр. Ці зміни в нормальному модулі також будуть впливати на результати перевірки ґвинтової лінії. Інший метод, представлений у додатку В, досягає зміни в основному діаметрі модифікацією нормального кута профілю замість нормального модуля, таким чином підтримується той самий хід ґвинтової лінії.

Не рекомендовано мати зміни в модулях, що спричинюють значні відхилення нахилу понад тих, що виміряні на виготовлених зубчастих колесах, вимірюваних цим приладом. Необхідно перевірити, щоб границі оцінки містились у правильному діаметрі після зміни модуля й основного діаметра. Цей спосіб треба застосовувати тільки до зубчастих передач або еталонних зразків зубчастих коліс з малими погрішностями форми і де границями ліній оцінки профілю є точний основний діаметр і діаметр вершин.

### 6.4 Неевольвентні — роликові (циліндричні), плоскі (торцеві) і кулькові (сферичні) еталонні зразки

Неевольвентний еталонний зразок — еталонний зразок калібрування, який представляє елементи відомої форми, іншої, ніж евольвентна. На практиці відому неевольвентну форму перевіряють приладом для перевіряння евольвентного профілю, який сконфігурований, щоб утворити точний евольвентної форми еталон, пов'язаний з установленим основним колом. Відхил заданої неевольвентної форми від установленної евольвентної форми можна обчислити визначенням правильних величин результату випробування, які мають бути представлені приладом. Сертифікація неевольвентних еталонних зразків залучає як метрологічний аналіз особливості геометрії даного еталонного зразка, так і розрахунок елементів відхилення від установленної евольвенти.

#### 6.4.1 Типи неевольвентних еталонних зразків

Неевольвентні еталонні зразки можуть мати різні форми. Більш загальними є плоскі еталонні зразки (також відомі як торцеві еталонні зразки, див. рисунок 19) і роликові еталонні зразки (див. рисунки 20 і 21). Іншою конструкцією є кульковий еталонний зразок (див. рисунок 22). Плоскі еталонні зразки містять елемент плоскої поверхні, який представляє площину, паралельну і зміщену від осі обертання еталонного зразка. Роликові еталонні зразки містять елемент ролика, який являє собою циліндр з його віссю, паралельною і зміщеною від осі обертання еталонного зразка. Кулькові еталонні зразки містять два кулькові елементи, один з яких визначає вісь обертання еталонного зразка, та інший, який представляє вимірювану поверхню. Плоский, роликовий і кульковий еталонні зразки виконують подібні функції в калібруванні приладів перевіряння евольвентних профілів.

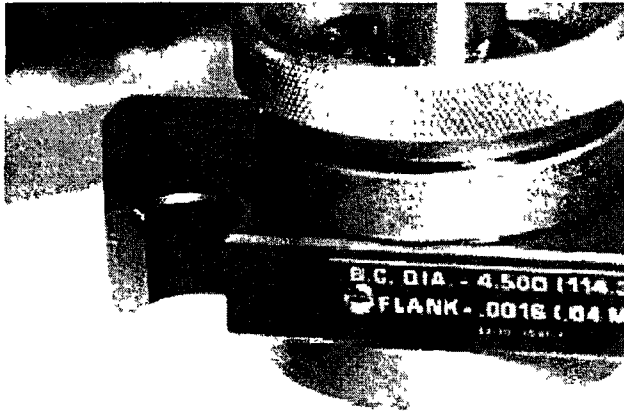


Рисунок 19 — Плоский эталонный зразок  
(торцевий эталонний зразок)

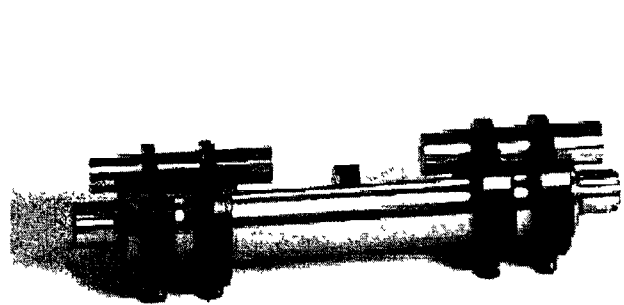


Рисунок 20 — Роликовый эталонный зразок

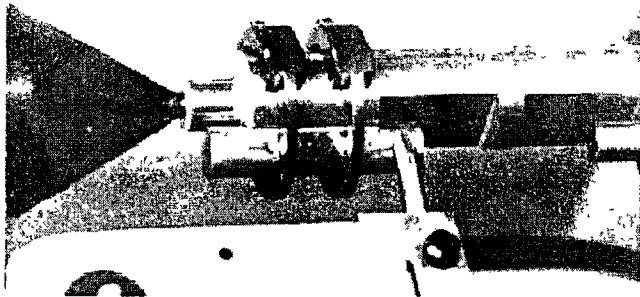


Рисунок 21 — Вимірювання роликового  
еталонного зразка



Рисунок 22 — Кульковый (сферический)  
еталонный зразок

#### 6.4.2 Функція неевольвентного еталонного зразка

Безпосереднє калібрування приладів перевіряння евольвентного профілю може досягатись використанням сертифікованого еталонного зразка евольвенти. Калібрування приладу може бути далі поліпшено використанням неевольвентного (плоского/роликового/кулькового) еталонного зразка. Результати перевіряння неевольвентного зразка представляють сукупний розгляд відповідності приладу, охоплюючи всі окремі джерела відхилів приладу. Проте, на відміну від евольвентного еталонного зразка, неевольвентний еталонний зразок об'єднує окремі джерела відхилів у пропорціях, які непрямо стосуються здатності приладу відтворювати встановлену форму еталона. Деякі джерела відхилів, зокрема відхилення положення вимірювального давача, мають перебільшений вплив. Ця особливість дозволяє подальше удосконалення калібрування випробного приладу евольвентного профілю через розгляд випробувань неевольвентних зразків.

На випробування неевольвентних еталонних зразків безпосередньо впливають відхилення приладу типу нахилу або передатного відношення в тій самій формі, як під час випробування евольвентних еталонних зразків. Ця категорія погрешності пізнається поступовою тенденцією віддалення випробного сліду від номінального еталона з ходом випробування. Проте евольвентний еталонний зразок є переважним еталоном для цього спостереження, оскільки він простіший і більше нагадує основний правильний евольвентний слід, ніж високо скривлений слід неевольвентного еталонного зразка.

Неевольвентний еталонний зразок може також слугувати як еталон спостереження форми або локалізованих відхилень. Проте, внаслідок високо скривленої форми сліду неевольвентного еталонного зразка, віддають перевагу евольвентним еталонним зразкам, виготовленим з мінімальним відхилом від установленого номіналу.

Характерним слідом роликового або кулькового еталонного зразка є плавна крива, яка включає два реверсні ходи значної амплітуди. Цю форму рекомендовано як відмінний еталон для спостереження гістерезису відхилів приладу або коефіцієнта передавання. Слід плоского еталонного зразка, який представляє точний реверсний хід тільки перед зустріччю з максимальним діаметром, не є відповідним еталоном для коефіцієнта передачі приладу.

Неевольвентний еталонний зразок набагато чутливіший до відхилів позиції наконечника давача приладу, ніж евольвентний еталонний зразок. Він особливо чутливий до позиційного відхилення наконечника давача від правильного положення в межах площини зачеплення, дотичної до основного циліндра установленої евольвенти. Неевольвентний еталонний зразок є рекомендованим еталоном для спостереження цієї категорії відхилення приладу.

#### **6.4.3 Калібрування плоского еталонного зразка**

Калібрування плоского еталонного зразка передбачає розмірний контроль і сертифікацію таких геометричних параметрів:

- **плоскопаралельність поверхні.** Будь-який відхил плоскопаралельності поверхні на ділянці розташування випробування буде впливати на калібрування приладу відносно бази. Такі відхилення, звичайно, не долучають у розрахунки відхилів плоского еталонного зразка від установленої евольвенти. Таким чином, важливо, щоб плоска поверхня була виготовлена з мінімальним відхилом плоскопаралельності і сертифікована на ділянці розташування випробування;

- **зміщення площини.** Плоский еталонний зразок має конструюватися з поверхнею площини випробування, паралельною базовій осі плоского еталонного зразка. Розмір зміщення поверхні площини випробування до осі обертання еталонного зразка має бути відомий для того, щоб розрахувати відхил плоского еталонного зразка від установленої евольвенти. Таким чином, сертифікація має містити цю інформацію. Відхил розміру зміщення від сертифікованого розміру буде мати тільки дуже незначний вплив на функційну точність плоского еталонного зразка, оскільки його застосовують у калібруванні випробувальних приладів евольвентного профілю.

#### **6.4.4 Калібрування роликового або кулькового еталонного зразка**

Калібрування роликового або кулькового еталонного зразка передбачає розмірний контроль і сертифікацію таких геометричних параметрів:

- **округлість ролика або кульки.** Будь-який відхил округлості ролика або кульки на ділянці розташування випробування буде впливати на калібрування приладу відносно бази. Такі відхилення, звичайно, не долучають у розрахунки відхилів роликового або кулькового еталонного зразка від установленої евольвенти. Таким чином, важливо, щоб ролик або кульку було виготовлено з мінімальним відхилом округлості й сертифіковано в ділянці розташування випробування;

- **діаметр ролика або кульки.** Діаметр ролика або кульки на ділянці розташування випробування має бути відомий для того, щоб розрахувати відхил роликового або кулькового еталонного зразка від установленої евольвенти. Таким чином, сертифікація має містити цю інформацію. Відхил діаметра ролика або кульки від сертифікованого розміру буде мати тільки незначний вплив на функційну точність роликового або кулькового еталонного зразка, оскільки його застосовують у калібруванні приладів випробування евольвентного профілю;

- **вісь ролика.** Роликовий еталонний зразок треба конструювати з віссю ролика, паралельною базовій осі роликового еталонного зразка;

- **зміщення ролика або кульки.** Розмір зміщення осі ролика або кульки до осі обертання еталонного зразка має бути відомим для того, щоб розрахувати відхилення стрижневого або кулькового еталонного зразка від установленої евольвенти. Таким чином, сертифікація має містити цю інформацію. Відхил розміру зміщення від сертифікованого розміру буде мати вплив (приблизно 50 %) на функційну точність стрижневого або кулькового еталонного зразка, оскільки його застосовують у калібруванні випробування приладів евольвентного профілю.



#### 6.4.5 Впливи наконечника давача під час обчислювання еталонної кривої

Якщо неевольвентний зразок будуть застосовувати під час калібрування приладів генеративного типу для випробування евольвентного профілю, які застосовують сферичні наконечники контактного давача, діаметр наконечника має бути відомим, щоб уможливити обчислення відхилів відповідного контактного вектора. Розрахунки відхилів неевольвентного еталонного зразка від установленної евольвенти мають компенсуватися згідно з відхилами вектора. Сертифікацію діаметра сферичного наконечника давача звичайно проводять окремо від сертифікаційних вимірів неевольвентного еталонного зразка. Проте дані мають бути цілком доступні для повних і точних розрахунків відхилів неевольвентного еталонного зразка від установленної евольвенти. Відхил діаметра наконечника давача від сертифікованого діаметра буде мати дуже незначний вплив на точність випробування неевольвентним зразком.

Сферичність наконечника давача в місці перевіряння впливатиме на калібрування приладу відносно бази. Оскільки відхили сферичності звичайно не долучають у розрахунки, то важливим є те, щоб наконечник було виготовлено з мінімальним відхилом і відповідно сертифіковано.

#### 6.4.6 Розташування під час вимірювання

Також можна обмежити перевірку неевольвентного еталонного зразка на встановленому осьовому розташуванні, щоб мінімізувати впливи відхилень виготовлення.

#### 6.4.7 Інтерпретація неевольвентного калібру

Неевольвентні калібри (плоскі, роликові і кулькові еталони) дають сліди випробування дуже скривлені, які відповідають у перебільшеній формі деяким категоріям відхилів випробувального приладу. До них належать відхили положення вимірювального давача, відхил коефіцієнта передачі і відхил гістерезису. Краще обмежити спостереження слідів випробування неевольвентних калібрів цими характеристиками.

Випробувальний прилад має досягти задовільного функціонування під час перевіряння евольвентних зразків перед подальшим удосконаленням за спроби застосування неевольвентних зразків. До того ж, якщо зробити деякі типи регулювань приладу, щоб поліпшити випробування неевольвентним зразком, потрібно буде повторне випробування евольвентного калібру, тому що такі регулювання мають взаємодіючий характер. Неевольвентні зразки можуть бути цінним інструментом у руках кваліфікованого метролога зубчастих передач, але їх треба застосовувати з обережністю. Див. додаток А щодо інтерпретації неевольвентного еталона калібру.

### 6.5 Перевірка гвинтової лінії еталонного зразка

#### 6.5.1 Перевірка еталонного зразка модифікованого ходу гвинтової лінії

Також можна перевірити гвинтову лінію еталонного зразка стосовно довгого або короткого ходу, щоб отримати нахилений слід. Щодо рекомендованих методів аналізування нахилу, див. ISO/TR 10064-1. Приклад розрахунку формули (8) представляє метод оцінювання величини нахилу, введеної в слід випробування гвинтової лінії модифікацією ходу.

Розрахунок потрібний, щоб визначити модифікований хід, який буде представляти бажану величину модифікації нахилу випробного сліду гвинтової лінії  $\Delta f_{H\beta}$ :

$$\sin \beta_2 = \sin \beta_1 \left( 1 - \frac{\Delta f_{H\beta}}{L_\beta \tan \beta_b} \right), \quad (8)$$

де  $L_\beta$  — діапазон оцінювання гвинтової лінії;

$\beta_b$  — основний кут нахилу лінії зуба,  $\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cos \alpha_n)$ ;

$\beta_1$  — кут нахилу лінії зуба, поєднаний з даними калібрування;

$\beta_2$  — кут нахилу лінії зуба, щоб утворити відхили модифікованого нахилу.

**Примітка 1.** Коли  $\Delta f_{H\beta}$  додатне, тенденція відхилу нахилу гвинтової лінії перебуває в зв'язку з додатним (більшим) відхилом кута гвинтової лінії та від'ємним (меншим) відхилом ходу і навпаки. Поєднана плюсова або мінусова істотна тенденція випробного сліду залежить від напрямку гвинтової лінії, бічної поверхні зуба, що вимірюють, і напрямку випробного сліду.

**Примітка 2.** Відхил  $\Delta f_{H\beta}$  перебуває в торцевій площині, на лінії, дотичній до основного діаметра. Розрахунки допускають, що прилад призначений реєструвати відхил у тому напрямі.

Усі інші параметри зубчастого колеса мають бути постійними.

Потрібно зазначити, що цей метод змінює основний діаметр, як і хід. На результати випробування евольвентного профілю буде, таким чином, також впливати зміна кута ґвинтової лінії. Метод, представлений у додатку В, досягає цього за допомогою зміни ходу модифікації складових параметрів, таким чином підтримуючи той самий основний діаметр.

Не рекомендовано зміни, що спричиняють істотні відхилення нахилу понад тих, що виміряно на виготовлених зубчастих колесах даним приладом. Цей процес треба застосовувати тільки до зубчастих передач або еталонних зразків зубчастих передач з малими погрішностями форми. Необхідно перевірити, що після зміни кута ґвинтової лінії вимір діаметра правильний.

#### **6.5.2 Неевольвентні еталони нахилу ґвинтової лінії**

Є зразки нахилу ґвинтової лінії, які мають прямолінійні профілі в торцевій площині, ґвинтова поверхня яких схожа на невелику фаску в кутку канавки. Звичайно встановлений тільки хід цієї поверхні. Це вимагає використання спеціального програмного забезпечення для калібрування або використання параметрів зубчастого колеса, які представляють евольвентну поверхню зубчастого колеса, яка дотична до прямолінійного профілю на діаметрі вимірювання.

#### **6.6 Перевірка еталонного зразка модифікованої ексцентричності кроку**

Як зазначено в ISO 18653, також можна виміряти еталонний зразок кроку з вимушеною додатковою ексцентричністю. Вплив додаткової ексцентричності на крок і на повний накопичений крок (повна зміна крокового переміщення) може бути визначено використанням розрахунків, описаних у прикладі, наведеному в додатку В.

На приладах, де еталонні зразки мають бути розміщені правильно до осі обертання, ексцентричність має бути зменшена через фізичне переміщення еталонного калібру. На устаткованні, де прилад математично вирівнюють до баз еталонного калібру (КВМи), ексцентричність можна зменшити математичним переміщенням координатної системи деталі.

### **7 НОРМАТИВИ ПІДРАХУНКУ ПОГРІШНОСТІ**

Підрахунок погрішності  $U_{95}$  потрібний, щоб визначити, як різні джерела помилок у комбінації впливають на процеси вимірювання. Коли документ калібрування або акт огляду встановлює погрішність вимірювання  $U_{95}$ , він засвідчує, що виміряні величини будуть дійсними в межах установлених лімітів, на рівні достовірності 95 %.

Визначення погрішності вимірювання тісно пов'язане з калібруванням приладу, можна сказати, що прилад відкалібровано відразу, коли визначено погрішність вимірювання. Проте важливо зрозуміти, що багато чинників поза функціонуванням цього приладу можуть впливати на погрішність процесу вимірювання. Часто вплив приладу є малим порівняно з іншими джерелами. Таким чином, часто краще зважати на погрішність процесу вимірювання, ніж на погрішність приладу.

Застосування будь-якого розрахунку погрішності вимірювання будуть завжди обмежені. Ці обмеження значно змінюються залежно від використовуваного методу. Будь-який документ, що встановлює результати калібрування приладу або підрахунку погрішності процесу вимірювання, має передбачати пов'язані з ним обмеження застосування, охоплюючи параметри вимірювання, обсяг вимірювань, склад обладнання приладу і програмного забезпечення та умови навколишнього середовища.

Методи підрахунку погрішності, описані в цьому розділі, узгоджено з GUM.

#### **7.1 Методи підрахунку погрішності**

Методи підрахунку погрішності вимірювання дуже відрізняються відносно складності, вірогідності і сфери застосування. Звичайно, збільшена вірогідність досягається тільки зі збільшеною складністю або зменшеною сферою застосування. Вибір методу підрахунку погрішності передбачає досягнення балансу між цими чинниками.

Цей документ представляє ряд прикладів методів підрахунку погрішності вимірювання. Деякі методи придатні для використання під час вимірювальних операцій виготовлення зубчастих передач. Інші вимагають комплексного аналізу процесів вимірювання і придатні тільки для багаторівневих вимірювальних операцій, таких як ті, що використовують для калібрування еталонних зразків зубчастих передач.

### 7.1.1 Загальні методи

У деяких випадках даний прилад використовують для дуже широкої сфери вимірювальних застосувань, охоплюючи завдання інші, ніж вимірювання зубчастої передачі. Це часто відбувається для КВМ. Загальний підхід до цієї вимоги — це використання одного дуже неспецифічного методу підрахунку погрішності вимірювання, який може задовольнити дуже широку сферу застосування. Такі методи звичайно передбачають суттєву складність і обмежену вірогідність. Прикладами загальних методів є: глобальний, модифікований глобальний, розкладання і наближення заміщенням.

### 7.1.2 Методи порівняння

Коли сфера застосування підрахунку погрішності вимірювання обмежена вимірюванням зубчастої передачі, можна використовувати метод порівняння. Він може звичайно збільшити вірогідність, у той час значно зменшиться складність. Метод використання оцінює процес вимірювання використанням каліброваного еталонного калібру з геометрією зуба передачі.

Важливо враховувати конфігурацію, точність геометрії, оброблення поверхні і стабільність будь-якого зубчастого колеса або зубчастого еталонного калібру, який використовують під час підрахунку погрішності вимірювання методом порівнювання. Див. 5.1.

Потрібно зазначити, що похибка калібрування еталонного калібру є завжди незначна і тому завжди менша, ніж результативне значення похибки для даного процесу вимірювання.

#### 7.1.2.1 Прямий метод порівняння

Безпосереднє застосування цього методу вимагає, щоб калібрований еталонний зразок і наступний виріб мали еквівалентну установлену геометрію і якісний рівень. Часто це є випадок для проміжного рівня лабораторій еталонних зразків зубчастих передач. Використовують еталонний зразок, калібрований первинною лабораторією калібрування, щоб відкалібрувати процес, який згодом буде використано для калібрування еквівалентних робочих еталонних зразків. Цей метод можна також застосувати для вимірювальних операцій визначеної виготовлюваної зубчастої передачі.

Використання прямого методу порівняння потрібне внаслідок відносно низької складності і високої вірогідності.

#### 7.1.2.2 Розширені методи порівняння

Метод порівняння може бути розширено, щоб долучити вимірювання виробів, які суттєво не схожі на зразок, використовуваний для калібрування вимірювального приладу. Це вважають чинним, доки відмінності між виробом і еталонним зразком перебувають у межах, установлених у формулюванні похибки.

Невідповідність між еталонним зразком і вимірювальними виробами може приймати дві загальні форми. Одну називають впливом подібності геометрії  $u_g$  і охоплює розгляд відмінностей, таких як діаметр, модуль, ширина зубчастого вінця і кут нахилу лінії зуба. Іншу називають характерним впливом виробу  $u_w$ , й вона охоплює відмінності, пов'язані з такими елементами, як оброблення поверхні і ступінь точності. Ці відмінності змушують застосовувати більш складні варіації в підрахунку погрішності і звичайно приводять до більших значень похибок. Коли сфера застосування широка, звичайно потрібне використання багатьох чисельних розмірів і конфігурацій еталонних зразків. Також може бути необхідним долучити виміри зразкових виробів на додаток до випробувань еталонних зразків.

### 7.2 Розрахунок похибки вимірювання $U_{95}$

Рівняння, використані для розрахунку похибки вимірювання  $U_{95}$ , значно змінюються. Загальна форма формули похибки для методів порівняння має такий вигляд:

$$U_{95} = \left[ k \left( u_m^2 + u_n^2 + u_g^2 + u_w^2 \right)^{0.5} \right] + |E|, \quad (9)$$

де, залежно від специфічного методу, що використовують, можна долучити в даний розрахунок похибки компоненти, які представляють джерела вимірювальної похибки:

$U_{95}$  — похибка вимірювання, розширена похибка даного процесу вимірювання з рівнем вірогідності 95 %;

$k$  — коефіцієнт покриття, звичайно встановлюється  $k = 2$ , таким чином, отримуємо розширене значення похибки з рівнем вірогідності 95 %;

- $u_m$  — стандартна похибка, мінливість серій вимірювань (повторюваність), зроблених на тому самому виробі даним приладом;
- $u_n$  — похибка калібрування еталонного калібра; значення  $U_{95}$  має бути очевидно встановлене в документі калібрування еталонного калібра і поділене на 2, дасть результат цього значення  $u_n$ ;
- $u_g$  — вплив подібності геометрії, похибка, пов'язана з відмінністю між еталонним зразком і геометрією міряного виробу;
- $u_w$  — характерний вплив виробу, похибка, пов'язана з відмінністю між еталонним зразком і міряним виробом, такий як обробка поверхні і ступінь точності;
- $E$  — систематична помилка (точність), яка є відхилом середнього значення серії вимірювань, зроблених даним приладом від каліброваного значення виміряного еталонного калібра.

У деяких випадках систематична помилка буде на практиці відрегульована процесом вимірювання, або регулюванням приладу, або корегуванням результатів. Для вимірів евольвентної зубчастої передачі систематична помилка має тільки корегуватися вимірами нахилу і товщини зуба. В інших випадках систематичну помилку має бути долучено в підрахунок похибки.

Усі параметри, за винятком систематичної помилки і коефіцієнта покриття, зазвичай вводяться у розрахунки як стандартні відхили. Стандартним відхилом є статистичний параметр, який звичайно використовують, щоб оцінити послідовність. Комбінацію стандартних відхилів належним чином визначають методом суми квадратів. Результатом є комбіноване значення стандартного відхилу, придатне для даного процесу вимірювання в цілому.

Із застосуванням коефіцієнта покриття  $k = 2$  кінцеве значення  $U_{95}$  процесу буде становити  $2\sigma$  (два стандартних відхили). Статистично це дає рівень достовірності 95 %, що вимірювання, зроблені тим процесом, будуть у межах  $\pm 2\sigma$ .

Якщо використовують інший інтервал вірогідності, значення коефіцієнта покриття  $k$  може бути змінено (як наприклад  $k = 3$  дає  $U_{99,7}$  або інтервал достовірності 99,7 %, що часто використовують для контрольних верстатних систем).

### 7.3 Параметри вимірювання

Вимірювання форми або положення поверхні зуба зубчастого колеса треба аналізувати згідно зі стандартизованими методами, щоб отримати сумісні цифрові значення. Ці значення можна порівнювати з допусками, щоб визначити придатність виробу до використання. Додатково їх можна використовувати для оцінювання похибки вимірювання. Доступна велика різноманітність таких параметрів вимірювання. Вибір таких параметрів для оцінювання похибки вимірювання впливатиме на підсумкові значення  $U_{95}$ .

#### 7.3.1 Параметри припасування лінії

Стандартизованим методом аналізування профілю і слідів випробування гвинтової лінії є припасування лінії. Цей метод передбачає установлену форму лінії, яку вважають конструктивною (ідеальною) формою фактичних випробних слідів виробу. На практиці ця установлена еталонна лінія припасована відповідно до кожного окремого випробного сліду, звичайно за методом найменших квадратів. Тоді різні методи аналізування можна використовувати, щоб виміряти співвідношення між краще припасованою установленою еталонною лінією і фактичними слідами. Загальні параметри вимірювання, що використовують метод припасування лінії, охоплюють сумарні відхили нахилу і форми, такі як ті, що описано в ISO 1328-1.

Відхил форми визначає ступінь подібності форми випробних слідів з установленою еталонною лінією. Цей параметр неможливо компенсувати систематичною помилкою  $E$ . Для високоточних застосувань можна віднайти методи оцінювання вимірювання форми, використовуючи заміни еталонні зразки, такі як стрижневий, кульковий або плоский, що мають простішу геометрію, ніж зубчасті колеса, які можна виготовити з нижчою помилкою форми. Відхил нахилу визначає ступінь подібності орієнтування (кут нахилу) випробних слідів з установленою еталонною лінією. Інколи можливо компенсувати цей параметр систематичною помилкою  $E$ .

Сумарний відхил є, по суті, складеним результатом спостереження, що визначає ступінь поєднання впливів відхилів форми і нахилу. Якщо відхил нахилу компенсовано через  $E$ , таким чином, він може впливати на параметр сумарного відхилу. Проте, оскільки відхилення форми також є складовою сумарного відхилу, то неможливо повністю компенсувати параметр сумарного відхилу систематичною помилкою.

Складовий характер, притаманний параметру сумарного відхилення, робить його кращим вибором для оцінювання погрішності вимірювання. Для погрішності  $U_{95}$  процесу оцінювання параметра сумарного відхилення можна припустити, що похибки вимірювання відхилів форми і нахилу будуть еквівалентні або менші.

### **7.3.2 Параметри припасування смуги**

Іншим стандартизованим методом аналізування профілю і випробних слідів гвинтової лінії є припасування смуги. Цей метод передбачає встановленого розміру і форми смугу, в межах якої кожний окремих випробний слід має бути пригнано, щоб він вважався прийнятним. Оскільки результат цього параметра вимірювання є тільки спостереженням відмови або пропуску, він не прийнятний для статистичного аналізування, яке охоплює оцінювання погрішності вимірювання.

### **7.3.3 Параметри кроку**

Двома стандартизованими методами аналізування положення зуба або кроку є одиночний крок і сумарний накопичений крок, як описано в ISO 1328-1. Параметр відхилення одиночного кроку визначає ступінь подібності положень сусідньої пари зубів до їх правильних положень, які визначають діленням початкового кола на число зубців зубчастого колеса. Параметр відхилення накопиченого кроку визначає ступінь подібності будь-яких двох несусідніх зубців до їх правильних положень. Цей результат спостереження також оснований на діленні початкового кола на число зубців. Під час виконання повторних вимірювань відхилів кроку зубчастого колеса можна мати в результаті дуже малі зміни у вимірах значень для різних пар зубців, які реєструвались. В оцінюванні погрішності вимірювання параметрів кроку важливо обмежити результати спостережень встановленими зубцями. Для погрішності  $U_{95}$  процесу оцінювання параметра накопиченого відхилення кроку можна припустити, що похибки вимірювання відхилів одиночного кроку будуть еквівалентні або менші.

## **8 МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ**

### **8.1 Відслідковування**

Усе устаткування, що використовують для оцінювання погрішності вимірювання, має бути калібровано за національним стандартом. Див. ISO 18653, розділ 4.

### **8.2 Робочі умови**

Має розглядатися два набори робочих умов: ті, що пов'язані з визначенням систематичної помилки  $E$ , і ті, що пов'язані з оцінкою стандартної похибки  $u_m$ . У деяких випадках вони можуть поєднуватися.

#### **8.2.1 Умови визначення систематичної помилки**

Робочі умови під час вимірювання еталонних зразків, які будуть введені в розрахунки систематичної помилки  $E$ , мають узгоджуватися якомога ближче з умовами, установленими в документах калібрування еталонних зразків. Це стосується таких факторів процесу вимірювання, як наприклад умови монтування, місцеположення випробування і параметри вимірювання. Також у значеннях вимірювання має бути компенсовано впливи температури (див. 4.2).

#### **8.2.2 Умови підрахунку стандартної похибки**

Робочі умови під час вимірювань еталонних зразків чи інших виробів, які буде введено в розрахунки стандартної похибки  $u_m$ , мають якомога ближче відображати умови, які буде встановлено в формулюванні підсумкової погрішності вимірювання  $U_{95}$ . Фактори процесу вимірювання, які можуть значно впливати на значення вимірювань, повинні мати можливість змінюватися в межах установлених лімітів. Це стосується умов навколишнього середовища, стану приладу, умов монтування, охоплюючи випробувальні оправки та пристрої й операторів випробування. Для більшої вірогідності випробування мають бути проведені протягом значного періоду часу. Значення вимірювання не мають компенсуватися впливами температури, доки всі зроблені вимірювання, що підпорядковані даному формулюванню погрішності, також не будуть компенсовані.

#### **8.2.3 Умови поєднаних визначень**

Коли робочі умови, які потрібні для вимірювань, що призведуть до розрахунку систематичної помилки і стандартної похибки, є еквівалентні, тоді можна провести один набір вимірювань, щоб виконати обидві вимоги. Ця обов'язковість еквівалентності може стосуватися ряду факторів, охоплюючи умови монтування вимірювання і умови навколишнього середовища. Також розмір, конфігурація і ступінь точності еталонного калібру мають відповідати вимогам еквівалентності.

### 8.3 Виміри

Попередньо візуально перевіряють прилад і необхідну апаратуру, щоб підтвердити відсутність незвичайного зношування або пошкодження. Приводять прилад у вихідний стан і виконують необхідні процедури, як наприклад тарування давача.

Мінімальне число вимірів для підрахунку погрішності вимірювання  $U_{95}$  має бути десять. Поліпшеної вірогідності можна досягти додатковими вимірюваннями, близько тридцяти, до точки відмови. Еталонний зразок або виріб має бути повністю демонтовано і перемонтовано, охоплюючи оправки або пристрої, якщо долучені в методику, між кожним випробуванням. Вимірювання має бути проведено в кількох різних положеннях на приладі, щоб охопити діапазон позиціонування вимірів виробу. Коли можливо, вимірювання еталонного зразка має охоплювати обернену орієнтацію. Також доцільно зробити вимірювання протягом певного періоду часу, наприклад, кілька днів, щоб долучити впливи процесу вимірювання. Дані має бути нанесено на графік, щоб бачити, чи це нормальний розподіл.

### 8.4 Методика калібрування

Типові методики калібрування, що використовують під час початкового і подальшого оцінювання приладу, має бути розроблено відповідно до рекомендацій виробника приладу, якщо є

#### 8.4.1 Початкова установка і регулювання

Передумови методики такі:

— для калібрування навколишнє середовище і умови вимірювальної системи мають бути відповідно до розділів 4 і 5;

— початкове статистичне оцінювання вимірювального приладу виконують, використовуючи еталонний зразок калібрування, коли додатково оцінюють іншими еталонними зразками, як описано в розділі 10.

#### 8.4.2 Початкова методика калібрування

Потрібно мінімум десять окремих перевірок без будь-яких калібрувальних налагоджень приладу. Для кожної з них застосовують такі етапи.

- a) Установлюють прилад, щоб виміряти еталонний зразок.
- b) Розміщують калібрувальний еталонний зразок у приладі.
- c) Виміряють і записують потрібні параметри.
- d) Розбирають установку.
- e) Повторюють етапи від a) до d) як мінімум дев'ять разів.
- f) Наносять точки даних у графік  $X - MR$ , як описано в розділі 10.
- g) Розглядають контрольний графік, щоб побачити, чи він відповідає вимогам, наведеним у 10.3. Оцінювання контрольного графіка може вказати на необхідність додаткових точок даних і повторного оцінювання.
- h) Якщо необхідно, регулюють систему. Не треба продовжувати, якщо система не контролювана. Якщо потрібні контрольні регулювання, визначають обумовлені причини, виправляють і повторюють вищезазначені етапи.
- i) Установлюють систематичну помилку, якщо необхідно, і підтверджують.

З цього моменту прилад можна вважати каліброваним і придатним для оцінювання відповідно до технічних умов.

#### 8.4.3 Методика подальшого калібрування

Потрібне подальше калібрування, щоб підтримувати статистичне довір'я до придатності приладу для використання. Інтервал між вимірюваннями еталонного зразка можна розширити, коли це підтверджується даними, наприклад, раз на зміну, щодня, щотижня. Коли статистика показує, що потрібне регулювання систематичної помилки, то вимірювання еталонного зразка проводять частіше, див. розділ 10 та ISO 18653.

Графік  $X - MR$  розширяють і розраховують нові контрольні обмеження з кожним вимірюванням, використовуючи понад 100 попередньо записаних точок даних.

Методики, наведені в розділі 10, треба повторювати на регулярній основі.

У будь-який час, доки вимірюють виріб, сумнівні дані можуть указати, що потрібно перевірити калібрування.

#### 8.4.4 Технічне оснащення і калібри

Будь-яке технічне оснащення і калібри, використовувані в установці або калібруванні вимірювального приладу, також мають бути калібровані на регулярній основі.

### 9 НАСТАНОВИ КОМПАРАТОРНОГО ПІДРАХУНКУ ПОГРІШНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ

Цей розділ представляє ряд настановних прикладів підрахунку погрішності вимірювання. Він не охоплює всі можливі випадки.

#### 9.1 Приклад А прямого компаратора

Представлено один метод прямого підрахунку погрішності  $U_{95}$ . Його можна використовувати, коли міряють вироби, які еквівалентні до, але не однакові з еталонним зразком, що використовують для калібрування вимірювального процесу. Ця методика може дати надійну вірогідність з мінімальною складністю в межах її лімітованої сфери застосування. Вона представляє ряд застосувань, доки вимагають використання тільки одного еталонного зразка.

Щоб відповідати вимозі еквівалентності геометрії, дільний діаметр, модуль, ширина зубчастого вінця і кут нахилу лінії зуба даного виробу мають бути в межах  $\pm 25\%$  від відповідних установлених параметрів еталонного зразка. Понад  $10\%$  різниці обговорюваного має бути віддано на доповнення іншої компоненти погрішності. Можливе долучення інших вимог еквівалентності геометрії, як наприклад маси і розташування, випробування.

Щоб відповідати вимозі еквівалентності характеристики, установлена точність виробу має бути 5 ступеня або краща згідно з ISO 1328-1 і мати шорсткість поверхні вимірювання,  $R_a$ , 0,4 мкм або кращу.

**Примітка.** Фактори обов'язковості еквівалентності, перелічені тут, були довільно вибрані для цього прикладу. Точні фактори, що використовують, можуть змінюватися згідно з розглянутим застосуванням.

Методика калібрування така:

- Виконують ряд вимірювань на відкаліброваному еталонному зразку, дотримуючись методики, наведеної в розділі 8. Мінімальна кількість вимірювань — 10.
- Визначають середнє значення  $\bar{X}$  результатів, виконаних на 1 етапі. Систематичну помилку  $E$  тоді знаходять відніманням відкаліброваного значення еталонного зразка від середнього значення результатів.
- Визначають стандартну похибку  $u_m$  результатів, виконаних на 1 етапі, використовуючи формулу:

$$u_m = \left( \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1} \right)^{0.5}, \quad (10)$$

де  $u_m$  — стандартна похибка;

$X_i$  — окреме виміряне значення відкаліброваного параметра;

$\bar{X}$  — середнє виміряних значень;

$n$  — кількість вимірювань.

- Визначають погрішність еталонного зразка  $u_n$ , пов'язаного з калібруванням еталонного зразка, використовуючи формулу:

$$u_n = \frac{U_{95(\text{cal})}}{2}, \quad (11)$$

де  $u_n$  — погрішність калібрування еталонного зразка;

$U_{95(\text{cal})}$  — погрішність вимірювання  $U_{95}$ , установлена в документі калібрування еталонного зразка.

- Визначають погрішність вимірювання  $U_{95}$  для цього методу, використовуючи формули (12) або (13), залежно від того, чи буде вилучено систематичну помилку  $E$ .

Формулу (12) застосовують тільки тоді, коли систематичну помилку, визначену на 2 етапі, вилучено з процесу вимірювання або регулюванням дії приладу, або компенсуванням результатів.

$$U_{95} = 2(u_m^2 + u_n^2)^{0.5}. \quad (12)$$

Формулу (13) застосовують тоді, коли систематичну помилку, визначену на 2 етапі, не вилучено з цього процесу вимірювання.

$$U_{95} = 2(u_m^2 + u_n^2)^{0,5} + |E|. \quad (13)$$

**Цифровий приклад:** Результати вимірювання нахилу профілю  $f_{H\alpha}$  на відкаліброваній лівій поверхні зуба прямозубого колеса (нормальний модуль  $m_n = 3,0$  мм, число зубців,  $z = 33$ ; кут зачеплення  $\alpha_n = 20^\circ$ ; кут нахилу лінії зуба  $\beta = 0^\circ$ ) випробувано десять разів, подано як:

Елемент	Випробування										Середнє $\bar{X}$	Стандартна погрішність, $u_m$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
$f_{H\alpha}$	2,3	2,4	2,4	2,8	2,8	2,6	1,5	2,8	1,7	1,9	2,32	0,47

Значення калібрування  $f_{H\alpha}$ ,  $X_{cal} \in 3,3$  мкм з  $U_{95} \pm 1,5$  мкм (стандартна погрішність 0,75 мкм).

Дані використовують у цьому прикладі й підсумовують так:

Виміряні дані:  $\bar{X} = 2,32$  мкм, стандартна погрішність 0,47 мкм.

Дані калібрування:  $X_{cal} = 3,3$  мкм,  $U_{95} = \pm 1,5$  мкм (стандартна погрішність 0,75 мкм)

Якщо систематичну помилку в процесі вимірювання компенсовано або відрегульовано, тоді можна використовувати формулу (12), отримуючи такі результати:

$$U_{95} = 2(0,47^2 + 0,75^2)^{0,5} = \pm 1,77 \text{ мкм.}$$

Якщо систематичну помилку, визначену калібруванням, не вилучено, тоді погрішність вимірювання можна підрахувати, використовуючи формулу (13).

Систематичну помилку  $E$  знаходять відніманням відкаліброваного значення еталонного зразка від середнього значення результатів:

$$U_{95} = 2(0,47^2 + 0,75^2)^{0,5} + |0,98| = \pm 2,75 \text{ мкм.}$$

## 9.2 Компараторний підхід, розширений впливом характеристики виробу

Представлено два приклади розширених методів підрахунку погрішності  $U_{95}$ , які можна використовувати, коли процес вимірювання, про який ідеться, буде застосований до виробів, які відповідають вимогам еквівалентності геометрії  $u_g$  з еталонним зразком, використовуваним для калібрування того процесу, але який не відповідає вимогам еквівалентності характеристик  $u_w$ . Приклад геометрії і вимог еквівалентності характеристики запропоновано в 9.1.

### 9.2.1 Приклад компаратора В

Цей метод враховує вплив характеристики виробу (ступінь точності й оброблення поверхні) за допомогою модифікації методу підрахунку стандартної погрішності  $u_m$  так, щоб впливи характеристики було долучено до тих спостережень. Вплив характеристики виробу  $u_w$  не буде оцінено як окрему змінну в розрахунку погрішності вимірювання  $U_{95}$ . Ця методика може дати значну вірогідність з помірною складністю в межах її помірної сфери застосування. Вона представляє широкий діапазон застосування характеристики з обмеженим діапазоном застосування геометрії. Потрібен тільки один еталонний зразок.

Методику калібрування можна проводити так:

а) Виконують ряд вимірювань на відкаліброваному еталонному зразку, дотримуючись процедури, наведеної в розділі 8.

Мінімальна кількість вимірювань становить десять.

б) Визначають середнє значення  $\bar{X}$  результатів, отриманих на етапі а). Тоді систематичну помилку  $E$  знаходять відніманням каліброваного значення еталонного зразка від середнього значення результатів.

с) Вибирають виріб з установленим ступенем точності й обробкою поверхні, які еквівалентні найгіршому ступеню точності й обробці поверхні, що будуть долучені в сферу застосування установленної для цієї оцінки погрішності. Виконують ряд вимірювань на вибраному виробі, дотримуючись процедури, наведеної в розділі 8. Мінімальна кількість вимірювань становить десять.



Прийнятною альтернативою є зібрання цих даних застосуванням методик повторюваності і відтворюваності вимірів (GR&R) для виробів з установленим ступенем точності й обробкою поверхні, еквівалентними до найгіршого ступеня точності й обробки поверхні, які будуть долучені в дану погрішність сфери застосування. Якщо використовують цей метод, то важливо вивести відповідні значення з набору даних GR&R, дотримуючись методик, рекомендованих на етапі d).

d) Визначають стандартну погрішність  $u_m$  результатів, отриманих на етапі c), використовуючи формулу (10). Якщо використовують альтернативний метод збору даних GR&R, то визначають стандартну погрішність таким методом:

Методики GR&R звичайно описують три значення похибки: повторюваності (змін устаткування), відтворюваності (змін оцінювача) і похибки вимірювання. Значення похибки вимірювання, яке являє собою комбінацію помилкових значень повторюваності і відтворюваності методом суми квадратів, має бути основою для визначення стандартної погрішності  $u_m$ .

Значення R&R, описане дослідженням GR&R, представляє стандартні відхилення 5,15. Таким чином, значення R&R має бути поділене на 2,575, щоб отримати значення, що представляє стандартну погрішність  $u_m$ .

e) Визначають погрішність калібрування еталонного зразка  $u_n$ , пов'язану з калібруванням еталонного зразка, використовуючи формулу (11).

f) Визначають погрішність вимірювання  $U_{95}$  для цього методу, використовуючи формули (12) або (13), залежно від того, чи буде долучена систематична помилка  $E$ .

**Цифровий приклад:** Цей метод дозволяє характеристикам виробу, що охоплюють помилки монтуння, геометрії і впливи поверхні, бути долученими в аналізування.

Використовуючи дані з 9.1, як наприклад вимірювання профілю відкаліброваного еталонного зразка, такі значення залишаються незмінними.

Виміряні дані:  $\bar{X} = 2,32$  мкм, стандартна погрішність 0,47 мкм.

Дані калібрування:  $X_{cal} = 3,3$  мкм,  $U_{95} = \pm 1,5$  мкм (стандартна погрішність 0,75 мкм).

Результати вимірювання відхилення нахилу профілю  $f_{H\alpha}$  на лівій бічній поверхні вибраного характерного зубчастого колеса випробувано десять разів, представлено як:

Елемент	Випробування										Стандартна погрішність $u_m$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$f_{H\alpha}$	11,0	10,4	9,4	10,2	10,1	7,8	7,1	10,7	8,0	9,3	1,34

Якщо систематична помилка в процесі вимірювання компенсована або відрегульована, тоді можна використовувати рівняння (12), отримуючи такі результати:

$$U_{95} = 2(1,34 + 0,75^2)^{0,5} = \pm 3,07 \text{ мкм.}$$

Якщо систематичну помилку, визначену під час калібрування еталонного зразка, не вилучено, тоді погрішність вимірювання можна підрахувати, використовуючи формулу (13):

$$U_{95} = 2(1,34^2 + 0,75^2)^{0,5} + |0,98| = \pm 4,05 \text{ мкм.}$$

### 9.2.2 Приклад компаратора С

Цей приклад представляє спосіб оцінювання впливу характеристик виробу  $u_w$ , де  $u_g$  відповідає вимогам еквівалентності геометрії, установленим у 9.1. Ця методика може забезпечити прийнятну вірогідність з низькою складністю в межах її помірної сфери застосування. Вона забезпечує широкий діапазон характерної застосовності з обмеженим діапазоном застосовності геометрії. Потрібен тільки один еталонний зразок.

Процедуру калібрування можна виконувати, як зазначено нижче:

a) Проводять ряд вимірювань на відкаліброваному еталонному зразку, дотримуючись методики, наведеної в розділі 8. Мінімальна кількість вимірювань становить десять.

b) Визначають середнє значення  $\bar{X}$  результатів, отриманих на етапі a). Систематичну помилку  $E$  тоді знаходять відніманням відкаліброваного значення еталонного зразка від середнього значення результатів.

с) Оцінюють вплив ступеня точності виробу на погрішність вимірювання за формулою:

$$u_{wg} = F_x(k_{wg}), \quad (14)$$

де  $u_{wg}$  — вплив ступеня точності виробу;

$F_x$  — допуск для даного параметра вимірювання представленого зубчастого колеса. Розміри зубчастого колеса і ступінь точності мають бути в межах лімітів, установлених у формуванні погрішності вимірювання;

$k_{wg}$  — постійний коефіцієнт, який представляє частину допуску, що враховує вплив ступеня точності виробу.

**Примітка.** Представлений тут постійний коефіцієнт впливу точності виробу було довільно вибрано для цього прикладу. Використовуваний точний коефіцієнт може змінюватися згідно із застосуванням, що розглядають.

d) Оцінюють вплив оброблення поверхні виробу на погрішність вимірювання, використовуючи формулу:

$$u_{ws} = R_a(k_{ws}), \quad (15)$$

де  $u_{ws}$  — вплив оброблення поверхні виробу;

$R_a$  — допуск на оброблення поверхні представленого зубчастого колеса. Це значення має бути в межах лімітів, установлених у формулюванні погрішності вимірювання;

$k_{ws}$  — постійний коефіцієнт, який представляє частину допуску, що враховує вплив оброблення поверхні виробу.

**Примітка.** Представлений тут постійний коефіцієнт впливу оброблення поверхні виробу  $k_{ws}$  було довільно вибрано для цього прикладу. Використовуваний точний коефіцієнт може змінюватися згідно із застосуванням, що розглядають.

e) Оцінюють вплив характеристики виробу  $u_w$  для цього методу, використовуючи формулу:

$$u_w = (u_{wg}^2 + u_{ws}^2)^{0,5}. \quad (16)$$

f) Визначають стандартну погрішність  $u_m$  результатів, отриманих на етапі a), використовуючи формулу (10).

g) Визначають погрішність калібрування еталонного зразка  $u_n$ , пов'язану з калібруванням еталонного зразка, використовуючи формулу (11).

h) Визначають погрішність вимірювання  $U_{95}$  для цього методу, використовуючи формули (17) або (18), залежно від того, чи була вилучена систематична помилка  $E$ :

— формулу (17) застосовують тільки тоді, коли систематична помилка, визначена на етапі b), вилучена з цього процесу вимірювання, або регулюванням дії приладу чи компенсацією результатів:

$$U_{95} = 2(u_m^2 + u_{wg}^2 + u_w^2)^{0,5}; \quad (17)$$

— формулу (18) застосовують, коли визначена систематична помилка на етапі b) не вилучена з цього процесу вимірювання

$$U_{95} = 2(u_m^2 + u_{wg}^2 + u_w^2)^{0,5} + |E|. \quad (18)$$

**Цифровий приклад:** Використовуючи дані з 9.1 як приклад вимірювання профілю відкаліброваного еталонного зразка, такі значення залишаються незмінними.

Виміряні дані:  $\bar{X} = 2,32$  мкм, стандартна погрішність 0,47 мкм.

Дані калібрування:  $X_{cal} = 3,3$  мкм,  $U_{95} = \pm 1,5$  мкм (стандартна погрішність 0,75 мкм).

Допуск ( $f_{H\alpha}$ ) для виробу становить 12,0 мкм.

Підраховано, що вплив точності зубчастого колеса на процес вимірювання не перевищуватиме 10 % значення допуску.

Використовуючи формулу (14), визначають вплив ступеня точності виробу  $U_{wg}$ :

$$u_{wg} = 12,0(0,10) = 1,2 \text{ мкм.}$$

Вплив обробки поверхні  $R_a$ , 1,6 мкм, оцінено, що не перевищує 10 % допуску. Отже, використовуючи формулу (15), визначають  $U_{ws}$ :

$$u_{ws} = 1,6(0,1) = 0,16 \text{ мкм.}$$

Тому, із формули (16), характеристику виробу оцінено як:

$$u_w = (1,2 + 0,16^2)^{0,5} = 1,21 \text{ мкм.}$$

Повний процес погрішності  $U_{95}$  оцінено з формули (17), якщо вилучена систематична помилка:

$$U_{95} = 2(0,47^2 + 0,75^2 + 1,21^2)^{0,5} = \pm 3,0 \text{ мкм.}$$

Якщо систематична помилка  $U_{95}$  не вилучена, процес погрішності оцінюють із формули (18), що дає:

$$U_{95} = 2(0,47^2 + 0,75^2 + 1,21^2)^{0,5} + |0,98| = \pm 3,98 \text{ мкм.}$$

### 9.3 Компараторний підхід, поширений для характеристики виробу і впливів подібності геометрії

Можна створити методики оцінювання погрішності вимірювання для використання, якщо процес вимірювання, що розглядають, буде застосований до виробів, які не відповідають вимогам еквівалентності характеристик  $u_w$ , або геометрії  $u_g$ , з еталонним зразком, що використовують для калібрування цього процесу. Приклад геометрії і вимог еквівалентності характеристик запропоновано в 9.1.

Можна розробити велику різноманітність таких методик. Звичайно це залучить вибірку і комбінацію концепцій, намічених згідно з вимогами даного застосування. Ці методи є поза сферою застосування цього стандарту.

## 10 КОНТРОЛЬ СТАТИСТИЧНОГО ПРОЦЕСУ

Якщо еталонний зразок вимірюють кілька разів вимірювальним пристроєм достатньої роздільної здатності, то всі виміри виявляються не однаковими. Системі вимірювання, як і виробам від деталі до деталі, властива мінливість. Мінливість системи вимірювання часто називають помилкою вимірювання, але мінливість завжди наявна і її не вважають за помилку. В нормальному процесі вимірювання еталонні зразки, отримані в результаті вимірювання, мають тільки мінливість системи вимірювання. Виміряний еталонний зразок вважають постійним.

Щоб застосувати контроль статистичного процесу до дослідження калібрування, рекомендовано одиночні покази і метод контрольної діаграми (X і MR) рухомого розмаху. В деяких випадках необхідно, щоб процес контролювання краще ґрунтувався на одиночних показах, ніж на підгрупах. Метод діаграми (X і MR) вибрано з таких причин:

- визначення в режимі реального часу статистичної однорідності для кожного спостереження визначає, що трапляється з одиночними показами в часовій послідовності;
- нанесені точки можна порівнювати безпосередньо з конструктивними параметрами;
- визначена величина передбачуваного розкиду завдяки теорії загальних випадків;
- звичайний розкид і щоденні коливання процесу вирізняє з розкидів приписаної причини, які є унікальними й ідентифікованими причинами для зміни систематичної помилки. Хоча статистична діаграма виявляє існування розкиду приписаної причини, що лежить поза системою, вона не ідентифікує причину.

Контрольні діаграми для одиночних показів можна побудувати, як описано в цьому розділі.

### 10.1 Визначення

**LCL:** Нижня контрольна границя (Lower control limit).

**Статистичний контроль:** Умова, що описує процес, із якого всі спеціальні причини відхилів вилучені й залишаються тільки загальні причини, тобто виміряний відхил може стосуватися постійної системи причин випадку; слугує доказом на контрольній діаграмі відсутності точок поза контрольними границями і відсутністю невідповідних зразків або тенденцій у межах контрольних границь.

**UCL:** Верхня контрольна границя (Upper control limit).

### 10.2 Побудова діаграми X і MR

На рисунку 23 показано побудову діаграми X і MR.

а) Використовують одиночні покази, зібрані з еталонних калібрів (краще 30 або більше, але початкові оцінки можна зробити з 10 показів).

b) Обчислюють значення рухомого розмаху (MR). Значення рухомого розмаху отримують за різницею між двома послідовними спостереженнями, в результаті завжди буде додатне число. Відзначають, що перше спостереження не матиме відповідного значення MR.

c) Обчислюють середнє значення  $\bar{X}$  величин, щоб установити центральну лінію ( $\bar{X}$ ) для одиначної частини діаграми.

d) Обчислюють середнє значення MR величин, щоб установити центральну лінію (MR) для частини діаграми рухомого розмаху.

e) Обчислюють контрольні границі для обох частин діаграми:

— для одиначної частини:

$$UCL(X) = \bar{X} + (2,66\bar{R}); \quad (19)$$

$$LCL(X) = \bar{X} - (2,66\bar{R}); \quad (20)$$

— для частини діапазону переміщення:

$$UCL(MR) = 3,27\bar{R}; \quad (21)$$

$$LCL(MR) = 0. \quad (22)$$

f) Наносять центральну лінію і контрольні границі. Установлюють масштаб для обох частин діаграми, щоб відповідав даним. Визначившись, накреслюють центральні лінії і контрольні границі на відповідних частинах і помічають їх.

g) Наносять дані. Наносять значення  $\bar{X}$  і MR на відповідних частинах. Потім з'єднують точки лінією для зручності під час візуального аналізування даних. Відмічають усі покази відсутності контролю.

### 10.3 Критерії ознаки відсутності контролю

Критерії, придатні для одиначних показів ( $\bar{X}$ ) і «значень  $\bar{X}$  діаграми MR», показано на рисунку 23. Приймають нормальний розподіл. Коли проявляються один або більше критеріїв, це означає, що процес не є «під контролем»:

a) Одна точка поза межами 3-сігма.

b) Дві з трьох послідовних точок вище межі плюс 2-сігма, або дві з трьох послідовних точок нижче межі мінус 2-сігма.

c) Чотири з п'яти послідовних точок вище межі плюс 1-сігма, або чотири з п'яти послідовних точок нижче межі мінус 1-сігма.

d) П'ятнадцять послідовних точок у межах плюс 1-сігма або мінус 1-сігма.

e) Вісім послідовних точок, жодна не є в межах плюс 1-сігма або мінус 1-сігма.

f) Вісім послідовних точок на одній стороні центральної лінії.

g) Сім послідовних точок постійно піднімаються або опускаються.

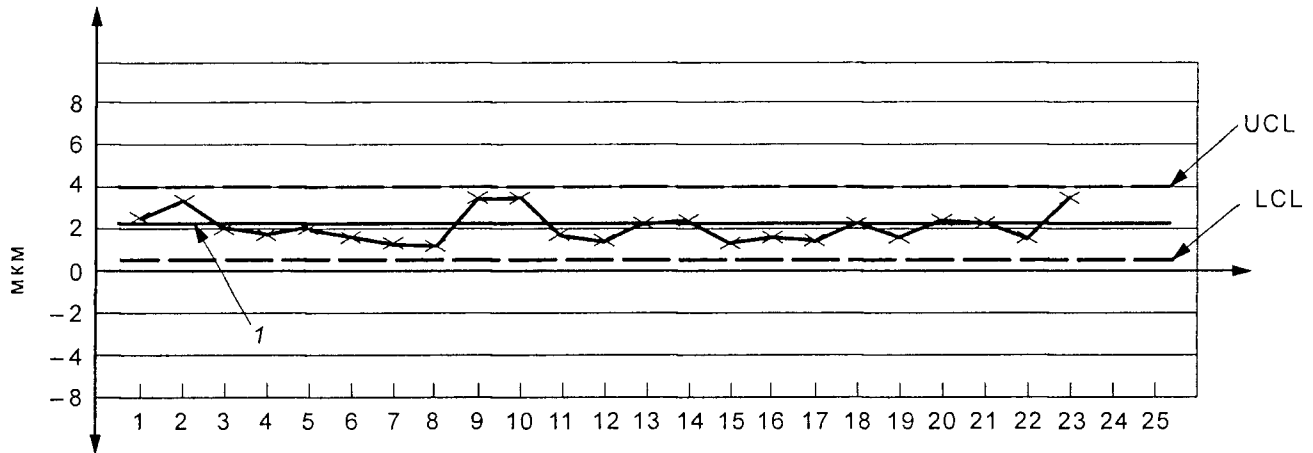
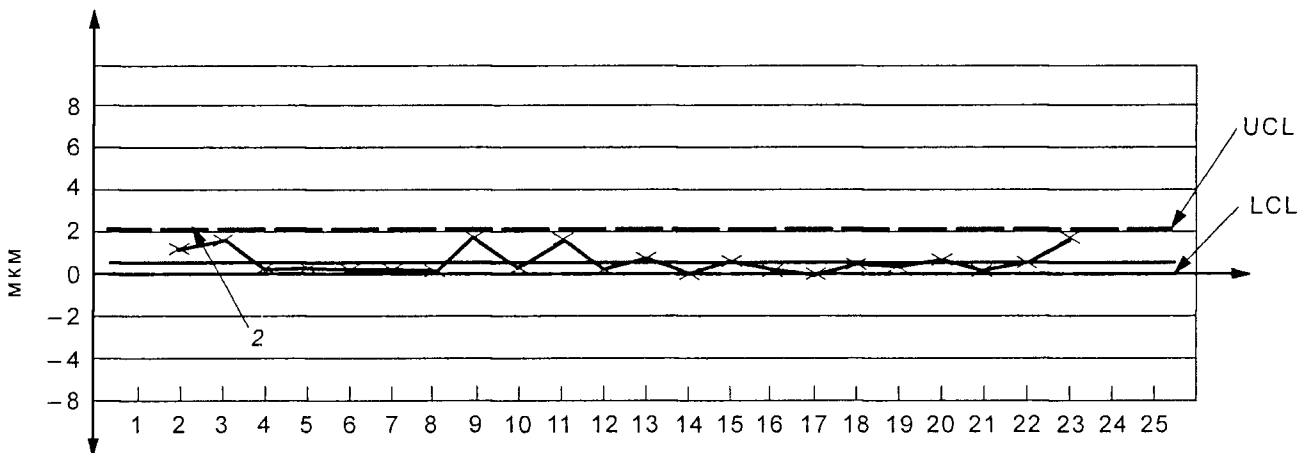
h) Число перетинів центральної лінії не є в межах  $K/2$  плюс квадратний корінь з  $K$ , або  $K/2$  мінус квадратний корінь з  $K$ , де  $K$  дорівнює повному числу точок.

Якщо один або більше вищезгаданих критеріїв наявні, то потрібно зробити коригувальні дії.

### 10.4 Коли дані контрольної діаграми не відповідають одному або більше критеріям згідно з 10.3

Контрольну діаграму використовують, щоб дати сигнал, коли установленому нормальному або стабілізованому процесу загрожують негативні, з небажаними наслідками, впливи. У виробництві ці впливи можуть походити від наступних загальних сфер: людина, машина, матеріал, метод, вимірювання і управління. У калібруванні ці впливи більш імовірні від навколишнього середовища (див. розділ 4), системи вимірювання (див. розділ 5) і оператора. Коли дані калібрування не відповідають одному з випробувань у 10.3, тоді ці останні впливи потрібно перевірити, щоб ідентифікувати причину небажаного впливу.

Головним фактором під час визначання серйозності небажаних впливів і використовуваних джерел і, щоб знайти і виправити ці впливи, є мінливість, що наявна у виробництві зубчастих передач, які мають бути виміряні цією системою вимірювання. Якщо стандартний відхил виробу є вищим за стандартний відхил системи вимірювання, тоді потрібно витратити тільки обмежені ресурси, щоб знайти і виправити впливи. Якщо запас незначний, тоді пошук і виправлення впливів обов'язкові.

а) Значення  $\bar{X}$  діаграми MR

б) Значення розмаху діаграми MR

Позначки:

1 — середнє значення ( $\bar{X}$ );

2 — середнє значення (R).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Середнє значення
Показання	2,4	3,7	2,0	1,8	2,1	1,8	1,6	1,7	3,5	3,5	1,8	1,6	2,5	2,5	1,6	1,8	1,7	2,2	1,8	2,5	2,3	1,7	3,7			2,25
Розмах		1,3	1,7	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	1,8	0	1,7	0,2	0,9	0	0,9	0,2	0,1	0,5	0,1	0,7	0,2	0,6	2,0			0,65

с) Дані калібрування

 $\bar{X}$  UCL = середній показ плюс 2,66 (середній розмах)

 $\bar{X}$  UCL =  $2,25 + 2,66(0,65)$ 
 $\bar{X}$  UCL = 3,98

 $\bar{X}$  LCL = середній показ мінус 2,66 (середній розмах)

 $\bar{X}$  LCL =  $2,25 - 2,66(0,65)$ 
 $\bar{X}$  LCL = 0,52

 $R$  UCL = 3,27 (середній розмах)

 $R$  UCL =  $3,27 (0,65)$ 
 $R$  UCL = 2,13

 $R$  LCL = 0
Рисунок 23 — Побудова діаграми  $\bar{X}$  і MR

## 11 ПРИДАТНІСТЬ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ

Відразу, як прилад відкалібровано оцінюванням погрішності вимірювання  $U_{95}$  для даного набору умов і сфери застосування, має бути вирішено, чи ця погрішність відповідна для завдань вимірювання, які будуть робити з цим калібруванням. Взагалі, це дає змогу порівнювати погрішність з відповідним допуском виготовлення.

### 11.1 Обмеження невпевненості приладу

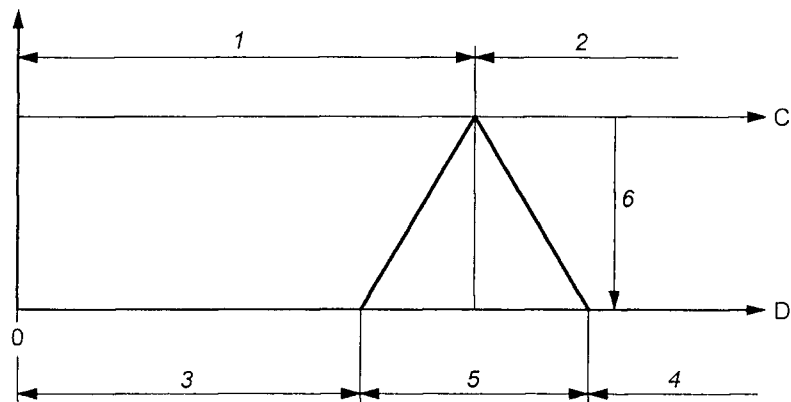
Прилад, який може вимірювати з похибкою до 100 % даного допуску, очевидно непридатний. Прилад, який може помилятися на 50 % допуску, має можливість помилково пропустити або забракувати неприйнятно велику кількість деталей. Якщо потенційна помилка опускається нижче 10 % допуску, то вимірювальний процес вважають звичайно прийнятним.

Рішення тоді є точним, коли для визначення допустимого відсотка помилки обумовлюють компроміс між поліпшеною надійністю виготовлення, яка досягається точними вимірюваннями, і збільшеною вартістю більш точних вимірювань. Тут описано три методи, щоб представити рекомендації до цього процесу рішення. Якщо операція виготовлення має бути ефективною, обґрунтованість відповідних операцій вимірювання має бути підтверджено одним із цих методів.

Рекомендовано прийняти метод згідно з 11.1.1, якщо немає спеціальної угоди між замовником і постачальником, згідно з установленим методом ISO.

#### 11.1.1 Метод GPS зменшення допуску

В ISO/TS 14253-1:1995 запропоновано гнучкий підхід. Цей метод ґрунтується на визнанні, що помилки вимірювання зменшують частину поля допуску, де випробні зразки будуть прийнятні. Див. рисунок 24.



Позначки:

- C — етап проектування/технічних вимог;
- D — етап контролювання;
- 1 — поле технічних вимог (у межах заданих технічних вимог);
- 2 — за межами заданих технічних вимог;
- 3 — поле відповідності;
- 4 — поле невідповідності;
- 5 — інтервал погрішності;
- 6 — збільшення погрішності вимірювання,  $U$ .

**Примітка.** Вимога проектування, показана на лінії C, і фактичні потреби вимірювання, показані на D, пояснюють погрішність вимірювання. Інвестування в здатність до вимірювання збільшує поле допуску, доступне для виробника.

Рисунок 24 — Графічне представлення методу GPS

Щоб проілюструвати цей метод, розглянемо зубчасте колесо з установленим допуском 9 мкм нахилу евольвентного профілю і пов'язаною  $U_{95}$  погрішністю вимірювання 2 мкм. Якщо результат випробування показує відхил профілю між 7 мкм і 9 мкм, то ймовірно, що деталь, яка фактично є за межами допуску, буде неправильно прийнята. (Навпаки, результат випробування, що показує відхил між 9 мкм і 11 мкм, має значну ймовірність неправильного забракування деталі, що була фактично в допуску). За методом зменшення допуску, допуск має бути зменшено до 7 мкм, що суттєво зменшує ймовірність прийняття деталі поза допуском внаслідок помилки вимірювання. Див. рисунок 25.

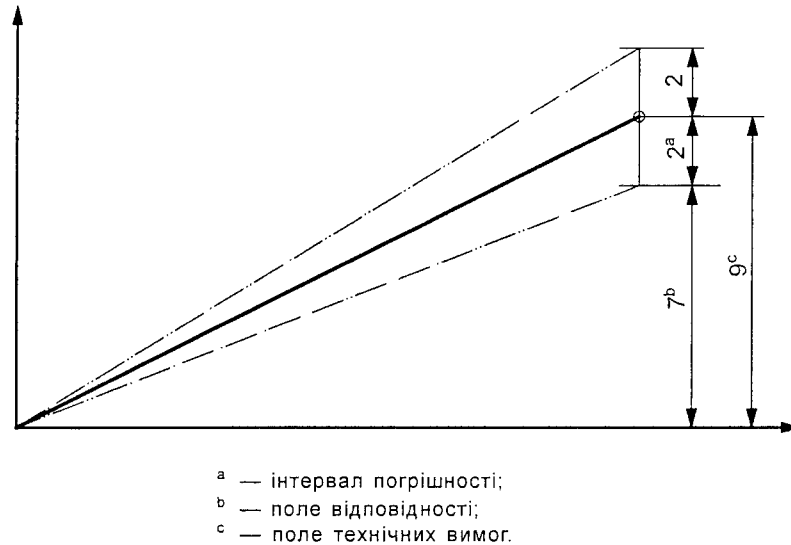


Рисунок 25 — Приклад підходу GPS з метою визначення придатності

Метод зниження допуску переносить предмет обговорення відповідності використання інструменту з царини довільної до економічної. В прикладі, наведеному в попередньому абзаці, співвідношення допуску та погрішності мають бути 28 %  $[2/(9-2)]$ . З довільною вимогою співвідношення допуску 25 % інструмент вважають неприйнятним без подальшого розгляду. Проте, у випадку виробничого процесу, який міг би надійно виготовляти деталі з допуском 5 мкм, інструмент можна вважати задовільним без подальшого впливу. Якщо виробничий процес був відомий для виготовлення деталей у межах 6 мкм на узгодженій основі, то можна вважати доцільним продовжити поліпшення у вимірювальному процесі, щоб зменшити погрішність.

#### 11.1.2 Метод співвідношення допусків

Традиційно виникає питання відповідності використання інструмента за вимоги, що погрішність вимірювання буде менша, ніж установлений відсоток пов'язаного допуску на обробку. Для виготовлення зубчастих коліс це співвідношення звичайно встановлено від 25 % до 30 %.

Цей метод співвідношення допуску приваблює простотою. Але встановлення довільного відсотка може призвести до більшої або меншої погрішності вимірювання (і пов'язаної вартості), ніж оптимум для застосування.

#### 11.1.3 Норми погрішності інструмента

Цей метод представлено, щоб визначити робочі параметри інструмента з відкаліброваними еталонними зразками зубчастих коліс. Щоб зменшити погрішність, впливи елементів, наведені в розділі 5, має бути мінімізовано. Вимоги залежать від ступеня точності зубчастого колеса, що контролюють, але вимоги стосуються методу калібрування, погрішності і використовуваного відкаліброваного еталонного зразка зубчастого колеса. У таблиці 3 подано деякі норми погрішності вимірювального процесу зубчастих коліс.

Обмеження цього методу в тому, що він представляє єдину вимогу погрішності, яку застосовують до широкого діапазону допусків зубчастих коліс, які залежать від геометрії зубчастого колеса.

Таблиця 3 — Норми погрішності вимірювального процесу зубчастих коліс

Ступінь точності, що контролюють згідно з ISO 1328-1 та ISO 1328-2	Рекомендована максимальна погрішність $U_{95}$ , мкм				
	Одиночний крок <sup>a</sup>	Биття	Повна гвинтова лінія на 100 мм ширини зубчастого вінця <sup>b,c</sup>	Повний профіль	Повний накопичений крок
2	1,0	1,5	2,5	2	2
3					

Кінець таблиці 3

Ступінь точності, що контролюють згідно з ISO 1328-1 та ISO 1328-2	Рекомендована максимальна погрішність $U_{95}$ , мкм				
	Одиночний крок <sup>a</sup>	Биття	Повна гвинтова лінія на 100 мм ширини зубчастого вінця <sup>b,c</sup>	Повний профіль	Повний накопичений крок
4	1,5	2,5	3,5	3	3
5					
6					
7	3,0	5,0	6,0	6	6
8					
9					
10	4,0	7,0	8,0	8	8
11					
12					

<sup>a</sup> Погрішність вимірювання застосовують до оцінення з еталонними зразками до модуля 5 і дільного діаметра 400 мм та числа зубців  $\geq 30$ .

<sup>b</sup> Погрішність вимірювання ґрунтується на косозубих сталевих зразках з кутом нахилу зубців  $\beta \leq 30^\circ$ .

<sup>c</sup> Для ширин зубчастого вінця менше ніж або рівних 100 мм застосовують табличні значення. Для ширин зубчастого вінця більше ніж 100 мм значення мають бути пропорційно збільшені.

### 11.2 Джерела погрішності вимірювання

На рисунку 26 показано зведення джерел погрішності з ISO/TS 14253-2 для калібрування вимірювального устаткування під час контролювання продукції.



Рисунок 26 — Фактори впливу на погрішність під час вимірювання



Загальні проблеми можуть охоплювати:

- невідповідність технічних вимог;
- помилки биття через виготовлення і вимірювання зубчастого колеса;
- помилки установки на вимірювальних приладах і металорізальних верстатах;
- невідповідні методи вимірювання.

Рекомендації з удосконалення процесу мають бути в наявності у виробника приладу.

### 11.3 Зменшення погрішності вимірювання

Для зменшення погрішності вимірювального процесу, яка визначена незадовільно великою, дотримуються трьох загальних методів.

#### 11.3.1 Дотримання іншої методики калібрування

Методи оцінювання погрішності, наведені в цьому документі, дають збільшення значення  $U_{95}$ , оскільки зменшується подібність між даною методикою і точним методом компаратора. Дотримання методики, що є ближча до методу компаратора, буде поліпшувати погрішність вимірювання.

Одним способом поліпшення відповідності з методом компаратора потрібно удосконалити подібність еталонного зразка з даною випробною деталлю. Використовують інший або додатковий еталонний зразок так, що поліпшення подібності зменшить погрішність калібрування.

Іншим способом для зменшення погрішності вимірювання є вилучення систематичної помилки, виміряної протягом процесу калібрування, з процесу вимірювання, або регулюванням дії приладу чи компенсацією результатів.

Коли встановлено точність виробу 5 ступеня або вище, згідно з ISO 1328-1, або еквівалентну, тоді погрішність  $U_{95}$  можна оптимізувати використанням еталонного зразка того самого розміру і конфігурації, як даний виріб. Вилучення систематичної помилки, виміряної протягом процесу калібрування, також може бути потрібним. Це може призвести до значень погрішності вимірювання трохи більших від погрішності, пов'язаної з сертифікацією еталонного зразка.

#### 11.3.2 Зменшення погрішності сертифікації еталонного зразка

Значення погрішності приладу не може бути меншим, ніж значення погрішності сертифікації еталонного зразка. Залежно від методу, погрішність сертифікації може бути домінуючим фактором.

Зменшення погрішності сертифікації звичайно викликає зменшення числа етапів у ієрархії калібрування. Також можна домовитися про спеціальні випробні методики, щоб зменшити погрішність сертифікації.

#### 11.3.3 Удосконалення процесу вимірювання

Список факторів процесу вимірювання, що можуть потенційно зменшити погрішність вимірювання, насправді буде дуже довгий. Загальні категорії мають охоплювати:

- впливи навколишнього середовища;
- стан приладу та регулювання;
- навчання оператора;
- оправки та затискні пристрої.

Погрішність можна зменшити використанням повторних вимірювань виробу та використанням засобу вимірювань і стандартного відхилення засобу, де:

$$\sigma_m = \frac{u_m}{\sqrt{n}}$$

Деякі з цих тем обговорені детальніше в інших місцях цього стандарту. Крім того, рекомендації удосконалення процесу мають бути доступні від виробника приладу.

## 12 КОРЕЛЯЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ (ПРИЛАД)

Коли випробна деталь виміряна різними процесами вимірювання, в результаті будуть різні значення. Порівняння результатів випробування, отриманих від різних процесів вимірювання, пояснюється, як кореляція процесу вимірювання.

### 12.1 Основа для порівнювання

Перед тим, як може бути проведена кореляція процесу вимірювання, важливо впевнитися, що порівнювані процеси вимірювання дотримуються еквівалентних випробних методик. Загальні джерела відмінностей охоплюють:

- умови установки;
- найменування бічної поверхні зуба;
- нумерацію зуба;
- розташування вимірювання;
- напрям вимірювання;
- фільтрацію даних реєстрації;
- метод дослідження;
- практику оператора;
- умови навколишнього середовища.

### 12.2 Кореляція вимірювання

Можна також визначити значення кореляційного відношення. Наступний метод статистично комбінує окремі погрішності вимірювання.

Кореляцію можна розглядати в межах статистичної ймовірності з довірчим інтервалом 95 %, де  $E_N$  є менше ніж або рівне 1. Щоб вирахувати  $E_N$ , використовують таку формулу:

$$E_N = \frac{|x_a - x_b|}{\left[ (U_{95a})^2 + (U_{95b})^2 \right]^{0.5}}, \quad (23)$$

де  $E_N$  — кореляційне відношення з довірчим рівнем 95 %;

$x_a$  — окремий результат випробування з першого процесу вимірювання;

$x_b$  — окремий результат випробування з другого процесу вимірювання;

$U_{95a}$  — погрішність вимірювання  $U_{95}$  першого процесу вимірювання;

$U_{95b}$  — погрішність вимірювання  $U_{95}$  другого процесу вимірювання.

Якщо обчислене  $E_N$  буде більше ніж 1, то окремі результати випробування не співвідносяться в межах довірчого інтервалу 95 %. Може бути потрібна подальша робота, щоб визначити причину різниці.

## ДОДАТОК А (довідковий)

### ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЗУБЧАСТІ КОЛЕСА Й ЕТАЛОННІ ЗРАЗКИ

#### А.1 Мета

Метою цього додатка є визначення температурних впливів на нахил евольвентного профілю  $f_{H\alpha}$ , нахил лінії зуба  $f_{H\beta}$  і виміри товщини зуба зовнішнього зачеплення та еталонних зразків. Такі розрахунки припускають рівномірну температуру даної випробної деталі, локалізовані зміни температури неможливо зручно моделювати.

#### А.2 Розрахунок впливу температури на профіль

Під час вимірювання евольвентного профілю вплив температури можна змодельовати врахуванням пов'язаної зміни в діаметрі основного кола. Вплив на нахил профілю  $f_{H\alpha}$  можна обчислити так:

а) Задані (типові) дані:

$z = 14$  — число зубців;

$m_n = 8$  мм — нормальний модуль;

$\beta = 23^\circ$  — кут нахилу лінії зуба;

$\alpha_n = 20^\circ$  — нормальний кут профілю;

$L_s = 7$  мм — довжина обкату на початку дослідження профілю;

$L_e = 37$  мм — довжина обкату в кінці дослідження профілю.

**Примітка.** Коли точки на початку і в кінці дослідження профілю встановлено в градусах кута обкату ( $\xi_y$ ), перетворення в довжину обкату можна зробити за формулою:

$$L_y = \left( \frac{\xi_y}{360} \right) (d_b \pi) \quad (\text{A.1})$$

$\text{СТЕ} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  — коефіцієнт теплового розширення сталі;

$\Delta_t = + 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  — різниця температури ( $t_a - t_s$ ) = ( $22,5^\circ - 20^\circ$ ) =  $+ 2,5^\circ$ .

де  $t_a$  — фактична (виміряна) температура;

$t_s$  — стандартна температура ( $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

b) Обчислюють поперечний модуль,  $m_t$ :

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = 8,690 \text{ } 88 \text{ мм.} \quad (\text{A.2})$$

c) Обчислюють дільний діаметр  $d$ :

$$d = m_t z = 121,672 \text{ } 36 \text{ мм.} \quad (\text{A.3})$$

d) Обчислюють торцевий кут профілю  $\alpha_t$ :

$$\alpha_t = \arctan \left( \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) = 21,573 \text{ } 98^\circ. \quad (\text{A.4})$$

e) Обчислюють немодифікований основний діаметр  $d_b$ :

$$d_b = d \cos \alpha_t = 113,148 \text{ } 43 \text{ мм.} \quad (\text{A.5})$$

f) Обчислюють діапазон оцінення профілю  $L_\alpha$  (досліджена частина профілю):

$$L_\alpha = L_e - L_s = 30 \text{ мм.} \quad (\text{A.6})$$

g) Обчислюють новий основний діаметр  $d_{b2}$ , збільшений або скорочений від впливу температури:

$$d_{b2} = d_b + (d_b \Delta_t \text{СТЕ}) = 113,151 \text{ } 68 \text{ мм.} \quad (\text{A.7})$$

h) Обчислюють нову функційну довжину профілю  $L_{\alpha2}$ , подовжену або скорочену від впливу температури:

$$L_{\alpha2} = L_\alpha \left( \frac{d_{b2}}{d_b} \right) = 30,000 \text{ } 86 \text{ мм.} \quad (\text{A.8})$$

i) Обчислюють відхил нахилу профілю  $f_{H\alpha}$  в результаті впливу температури:

$$f_{H\alpha} = (L_{\alpha2} - L_\alpha) = 0,000 \text{ } 86 \text{ мм} = 0,86 \text{ мкм.} \quad (\text{A.9})$$

Обчислений відхил  $f_{H\alpha}$  міститься вздовж лінії, дотичної до основного кола, в межах поперечної площини. Знаком цього відхилу є плюс, коли дана фактична температура є вище стандартної температури  $20^\circ$  за шкалою Цельсія, таким чином збільшуючи основний діаметр і зменшуючи кут профілю. Цей напрям відхилу нахилу і полярності узгоджуються згідно з ISO 1328-1.

### А.3 Обчислення впливу температури на нахил лінії зуба

Під час вимірювання нахилу лінії зуба вплив температури можна змодельовати врахуванням пов'язаної зміни в ході лінії зуба. Вплив на нахил лінії зуба  $f_{H\beta}$  можна оцінити так:

a) задані (типіві) дані:

$z$	$= 14$	— число зубців;
$m_n$	$= 8 \text{ мм}$	— нормальний модуль;
$\beta$	$= 23^\circ$	— кут нахилу лінії зуба;
$\alpha_n$	$= 20^\circ$	— нормальний кут профілю;
$L_b$	$= 45,72 \text{ мм}$	— діапазон оцінення нахилу лінії зуба;

- СТЕ =  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$  — коефіцієнт теплового розширення сталі;  
 $\Delta t = + 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  — різниця температури ( $t_a - t_s$ ) =  $(22,5^{\circ} - 20^{\circ}) = + 2,5^{\circ}$ ,  
 де  $t_a$  — фактична (виміряна) температура;  
 $t_s$  — стандартна температура ( $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).  
 б) Обчислюють торцевий модуль  $m_t$ :

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = 8,690 \ 88 \text{ мм.} \quad (\text{A.10})$$

- с) Обчислюють ділительний діаметр  $d$ :

$$d = m_t z = 121,672 \ 36 \text{ мм.} \quad (\text{A.11})$$

- д) Обчислюють торцевий кут профілю  $\alpha_t$ :

$$\alpha_t = \arctan \left( \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) = 21,573 \ 98^{\circ}. \quad (\text{A.12})$$

- е) Обчислюють основний діаметр  $d_b$ :

$$d_b = d \cos \alpha_t = 113,148 \ 43 \text{ мм.} \quad (\text{A.13})$$

- ф) Обчислюють хід  $L$ :

$$L = \frac{d \pi}{\tan \beta} = 900,512 \ 79. \quad (\text{A.14})$$

- г) Обчислюють основний кут лінії нахилу зуба  $\beta_b$ :

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cos \alpha_n) = 21,54101^{\circ}. \quad (\text{A.15})$$

- h) Обчислюють новий хід  $L_2$ , подовжений або скорочений від впливу температури:

$$L_2 = L + (L \Delta t \text{СТЕ}) = 900,538 \ 68 \text{ мм.} \quad (\text{A.16})$$

- і) Обчислюють новий основний кут лінії нахилу зуба  $\beta_{b2}$ , збільшений або зменшений від впливу температури:

$$\beta_{b2} = \arctan \left[ \frac{(d_b \pi)}{L_2} \right] = 21,540 \ 45^{\circ}. \quad (\text{A.17})$$

- ж) Обчислюють частину кола основного діаметра  $C_1$ , пов'язану з діапазоном оцінення нахилу лінії зуба:

$$C_1 = L_b \tan \beta_b = 18,047 \ 40 \text{ мм.} \quad (\text{A.18})$$

- к) Обчислюють нову частину кола основного діаметра  $C_2$ , пов'язану з діапазоном оцінення нахилу лінії зуба, збільшену або зменшену від впливу температури:

$$C_2 = L_b \tan \beta_{b2} = 18,046 \ 88 \text{ мм.} \quad (\text{A.19})$$

- л) Обчислюють відхил лінії нахилу зуба  $f_{H\beta}$  в результаті впливу температури:

$$f_{H\beta} = (C_2 - C_1) = -0,000 \ 52 \text{ мм} = -0,52 \text{ мкм.} \quad (\text{A.20})$$

Обчислений відхил  $f_{H\beta}$  є вздовж лінії, дотичної до основного кола, в межах поперечної площини. Знаком цього відхилу є мінус, коли дана фактична температура є вище стандартної температури  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , таким чином збільшуючи хід і зменшуючи кут лінії нахилу зуба. Цей напрям відхилу нахилу і полярність узгоджуються з установленими в ISO 1328-1.

Температуру не вважають значним впливом на зубчасті колеса з нульовим кутом лінії нахилу зуба.

#### А.4 Обчислення температурного впливу на товщину зуба

На додаток до евольвентного профілю і нахилу лінії зуба температура може значно впливати на товщину зуба. Ці впливи можна змодельовувати врахуванням пов'язаної зміни в ділянці зуба, яку перетинає ділительний діаметр, де звичайно міряють товщину зуба. Вплив температури на нормальну товщину зуба колеса зовнішнього зачеплення можна оцінити так:

а) задані (типові) дані:

- $z = 14$  — число зубців;  
 $m_n = 8$  мм — нормальний модуль;  
 $\beta = 23^\circ$  — кут нахилу лінії зуба;  
 $\alpha_n = 20^\circ$  — нормальний кут профілю;  
 $s_n = 12,566\ 37$  мм — нормальна товщина зуба на ділільному діаметрі;  
 $CTE = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$  — коефіцієнт теплового розширення сталі;  
 $\Delta t = + 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$  — різниця температури  $(t_a - t_s) = (22,5^\circ - 20^\circ) = + 2,5^\circ$ ,

де  $t_a$  — фактична (виміряна) температура;

$t_s$  — стандартна температура ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

б) Обчислюють торцевий модуль  $m_t$ :

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = 8,690\ 88 \text{ мм.} \quad (\text{A.21})$$

в) Обчислюють ділільний діаметр  $d$ :

$$d = m_t z = 121,672\ 36 \text{ мм.} \quad (\text{A.22})$$

г) Обчислюють торцевий кут профілю  $\alpha_t$ :

$$\alpha_t = \arctan \left( \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) = 21,573\ 98^\circ. \quad (\text{A.23})$$

е) Обчислюють основний діаметр  $d_b$ :

$$d_b = d \cos \alpha_t = 113,148\ 43 \text{ мм.} \quad (\text{A.24})$$

ф) Обчислюють діаметр  $d_2$  нової частини зуба, присутньої на ділільному діаметрі внаслідок впливу температури:

$$d_2 = d - (d \Delta t CTE) = 121,668\ 86 \text{ мм.} \quad (\text{A.25})$$

г) Обчислюють торцевий кут профілю  $\alpha_{t2}$  на діаметрі  $d_2$ :

$$\alpha_{t2} = \arccos \left( \frac{d_b}{d_2} \right) = 21,569\ 82^\circ. \quad (\text{A.26})$$

h) Обчислюють кут обкату  $\xi$  на ділільному діаметрі:

$$\xi = (\tan \alpha_t) \left( \frac{180}{\pi} \right) = 22,654\ 91^\circ. \quad (\text{A.27})$$

і) Обчислюють кут обкату  $\xi_2$  на діаметрі  $d_2$ :

$$\xi_2 = \tan \alpha_{t2} \left( \frac{180}{\pi} \right) = 22,650\ 10^\circ. \quad (\text{A.28})$$

ж) Обчислюють евольвентну функцію  $\text{inv } \alpha_t$  на ділільному діаметрі:

$$\text{inv } \alpha_t = \xi - \alpha_t = 1,080\ 93^\circ. \quad (\text{A.29})$$

к) Обчислюють евольвентну функцію  $\text{inv } \alpha_{t2}$  на діаметрі  $d_2$ :

$$\text{inv } \alpha_{t2} = \xi_2 - \alpha_{t2} = 1,080\ 28^\circ. \quad (\text{A.30})$$

л) Обчислюють торцеву товщину зуба  $s_t$  на ділільному діаметрі:

$$s_t = \frac{s_n}{\cos \beta} = 13,651\ 61 \text{ мм.} \quad (\text{A.31})$$

м) Обчислюють кут торцевої товщини зуба  $\phi_t$  на ділільному діаметрі:

$$\phi_t = \left( \frac{s_t}{d \pi} \right) 360 = 12,857\ 14^\circ. \quad (\text{A.32})$$

н) Обчислюють кут торцевої товщини зуба  $\phi_{tb}$  на основному діаметрі:

$$\phi_{tb} = \phi_t + (2 \operatorname{inv} \alpha_t) = 15,019\ 00^\circ. \quad (\text{A.33})$$

о) Обчислюють кут торцевої товщини зуба  $\phi_{t2}$  на діаметрі  $d_2$ :

$$\phi_{t2} = \phi_{tb} - (2 \operatorname{inv} \alpha_{t2}) = 12,858\ 45^\circ. \quad (\text{A.34})$$

р) Обчислюють торцеву товщину зуба  $s_{t2}$  на діаметрі  $d_2$ :

$$s_{t2} = \left( \frac{\phi_{t2}}{360} \right) (d_2 \pi) = 13,652\ 60\ \text{мм}. \quad (\text{A.35})$$

q) Обчислюють торцеву товщину зуба  $s_{tp}$  на ділільному діаметрі, збільшеному або скороченому впливом температури:

$$s_{tp} = s_{t2} \left( \frac{d}{d_2} \right) = 13,652\ 99\ \text{мм}. \quad (\text{A.36})$$

г) Обчислюють нормальну товщину зуба  $s_{n2}$  на ділільному діаметрі, збільшеному або скороченому впливом температури:

$$s_{n2} = s_{tp} \cos \beta = 12,567\ 64\ \text{мм}. \quad (\text{A.37})$$

с) Обчислюють зміну нормальної товщини зуба  $\Delta_{sn}$  внаслідок впливу температури:

$$\Delta_{sn} = (s_{n2} - s_n) = 0,00127\ \text{мм} = 1,27\ \text{мкм}. \quad (\text{A.38})$$

Обчислена зміна  $\Delta_{sn}$  в нормальній товщині зуба має додатну полярність, коли дана фактична температура є вище стандартної температури  $20\ ^\circ\text{C}$ .

#### ДОДАТОК В (довідковий)

### ПЕРЕВІРЯННЯ ЕТАЛОННОГО ЗРАЗКА МОДИФІКОВАНИХ ЕВОЛЬВЕНТИ, ХОДУ ҐВИНТОВОЇ ЛІНІЇ, КРОКУ

#### В.1 Мета

Цей додаток представляє приклади розрахунку під час перевіряння модифікованої евольвенти, модифікованого нахилу лінії зуба і модифікованого кроку еталонного зразка. Див. ISO 1328-1 та ISO/TR 10064-1 щодо рекомендованих методів дослідження. Наступні приклади розрахунків представляють методи оцінювання величини введенного відхилення в перевіряння за різних модифікацій.

Не рекомендовано істотні зміни понад тих, що виміряні на виготовлених зубчастих колесах даним приладом.

#### В.2 Перевіряння еталонного зразка модифікованої евольвенти основного кола

В.2.1 Задані дані, що описують об'єкт евольвентного еталона:

- $z = 14$  — число зубців;
- $m_n = 8\ \text{мм}$  — нормальний модуль;
- $\beta = 23^\circ$  — кут нахилу лінії зуба;
- $\alpha_n = 20^\circ$  — кут профілю;
- $L_{a1} = 7\ \text{мм}$  — довжина обкату на початку дослідження профілю;
- $L_{a2} = 37\ \text{мм}$  — довжина обкату в кінці дослідження профілю.

**Примітка 1.** Коли точки на початку і в кінці дослідження профілю встановлені в градусах кута обкату ( $\xi_a$ ), перетворення в довжину обкату можна виконати за формулою:

$$L_{ax} = \left( \frac{\xi_x}{360} \right) (d_b \pi) \quad (\text{B.1})$$

$\Delta f_{H\alpha} = 50$  мм — потрібна величина модифікації нахилу профілю між початком і кінцем дослідження профілю.

**Примітка 2.** Коли  $f_{H\alpha}$  додатне, то тенденція відхилу нахилу профілю є в напрямі «з тіла» на вершині зуба, що перебуває в зв'язку з від'ємним (меншим) відхиленням кута профілю і додатним (більшим) відхиленням основного діаметра та навпаки

**Примітка 3.** Відхилення  $f_{H\alpha}$  перебуває в поперечній площині, на лінії, дотичній до основного діаметра. Розрахунки передбачають, що прилад розташований так, щоб реєструвати відхили в тому напрямі.

**В.2.2** Розрахунки необхідні, щоб визначити модифікований діаметр основного кола, який має утворити потрібну величину модифікації нахилу; слід випробуваного профілю круга, який утворить потрібну величину модифікації нахилу сліду випробуваного профілю.

а) Обчислюють торцевий модуль  $m_t$ :

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = 8,690\ 88\ \text{мм}. \quad (\text{В.2})$$

б) Обчислюють ділительний діаметр  $d$ :

$$d = m_t z = 121,672\ 36\ \text{мм}. \quad (\text{В.3})$$

в) Обчислюють торцевий кут профілю  $\alpha_t$ :

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}\right) = 21,573\ 98^\circ. \quad (\text{В.4})$$

г) Обчислюють немодифікований основний діаметр  $d_b$ :

$$d_b = d \cos \alpha_t = 113,148\ 43\ \text{мм}. \quad (\text{В.5})$$

е) Обчислюють діапазон оцінювання профілю  $L_\alpha$  (досліджувану частину профілю):

$$L_\alpha = L_{\alpha 2} - L_{\alpha 1} = 30\ \text{мм}. \quad (\text{В.6})$$

ф) Обчислюють модифікацію діаметра основного кола  $\Delta d_b$ , необхідну, щоб утворити бажане відхилення нахилу профілю:

$$\Delta d_b = d_b \left( \frac{\Delta f_{H\alpha}}{L_\alpha} \right) = 0,188\ 58\ \text{мм}. \quad (\text{В.7})$$

г) Обчислюють модифікований діаметр основного кола  $d_{b2}$ , який утворить бажаний відхил нахилу профілю:

$$d_{b2} = d_b - \Delta d_b = 112,959\ 85\ \text{мм}. \quad (\text{В.8})$$

х) Обчислюють модифікований торцевий кут профілю  $\alpha_{t2}$  для модифікованого основного діаметра  $d_{b2}$  (передбачаючи незмінний ділительний діаметр  $d$ ).

$$\alpha_{t2} = \arccos\left(\frac{d_{b2}}{d}\right) = 21,814\ 22^\circ. \quad (\text{В.9})$$

і) Обчислюють модифікований нормальний кут профілю  $\alpha_{n2}$  для модифікованого основного діаметра  $d_{b2}$ :

$$\alpha_{n2} = \arctan(\tan \alpha_{t2} \cos \beta) = 20,225\ 85^\circ. \quad (\text{В.10})$$

Початкові значення числа зубців ( $z$ ), нормального модуля ( $m_n$ ) і кута нахилу лінії зуба ( $\beta$ ) потрібно тоді використовувати з модифікованим нормальним кутом профілю ( $\alpha_{n2}$ ), щоб утворити модифікований основний діаметр ( $d_{b2}$ ).

### В.3 Перевіряння еталонного зразка модифікованого ходу нахилу лінії зуба

Може бути потрібним перевіряння стосовно довшого або коротшого ходу, щоб утворити нахилений слід. Див. ISO/TR 10064-1 щодо рекомендованих методів дослідження нахилу. Приклад розрахунку представляє метод оцінювання величини нахилу, введеного в слід випробування нахилу лінії зуба модифікованого ходу.

Зміни в ходах, що утворюють істотні відхили нахилу понад тих, що виміряні на виготовлених зубчастих колесах, виміряних даним приладом, не рекомендовано.

**В.3.1** Задані дані, що описують об'єкт еталона нахилу лінії зуба:

- $z = 14$  — число зубців;
- $m_n = 8$  мм — нормальний модуль;
- $\beta = 23^\circ$  — кут нахилу лінії зуба;
- $\alpha_n = 20^\circ$  — кут профілю;
- $L_b = 90$  мм — діапазон оцінювання нахилу лінії зуба;
- $\Delta f_{H\beta} = 50$  мкм — потрібна величина модифікації нахилу лінії зуба в межах діапазону оцінювання нахилу лінії зуба.

**Примітка 1.** Коли  $f_{H\beta}$  додатне, то тенденція відхилу нахилу лінії зуба перебуває в зв'язку з додатним (більшим) відхилом кута нахилу лінії зуба і від'ємним (меншим) відхилом ходу та навпаки. Пов'язаний напрям «з тіла» або «в тіло» тенденції сліду випробування залежить від напрямку нахилу лінії зуба, бічної поверхні зуба, що вимірюють, і напрямку сліду випробування.

**Примітка 2.** Відхил  $f_{H\beta}$  перебуває в поперечній площині, на лінії, дотичній до основного діаметра. Розрахунки передбачають, що прилад скомпонований так, щоб реєструвати відхил у цьому напрямі.

**В.3.2** Розрахунки потрібні, щоб визначити модифікований хід, який має утворити потрібну величину модифікації нахилу лінії випробуваного зуба.

a) Обчислюють торцевий модуль  $m_t$ :

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = 8,690\ 88\ \text{мм}. \quad (\text{B.11})$$

b) Обчислюють ділительний діаметр  $d$ :

$$d = m_t z = 121,672\ 36\ \text{мм}. \quad (\text{B.12})$$

c) Обчислюють торцевий кут профілю  $\alpha_t$ :

$$\alpha_t = \arctan \left( \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) = 21,573\ 98^\circ. \quad (\text{B.13})$$

d) Обчислюють основний діаметр  $d_b$ :

$$d_b = d \cos \alpha_t = 113,148\ 43\ \text{мм}. \quad (\text{B.14})$$

e) Обчислюють хід  $L$ :

$$L = \frac{(d\pi)}{\tan \beta} = 900,512\ 79\ \text{мм}. \quad (\text{B.15})$$

f) Обчислюють основний кут нахилу лінії зуба  $\beta_b$ :

$$\beta_b = \arctan \left[ \frac{(d_b \pi)}{L} \right] = 21,54101^\circ. \quad (\text{B.16})$$

g) Обчислюють частину  $C_a$  основного кола, пов'язану з діапазоном оцінювання нахилу лінії зуба  $L_b$ :

$$C_a = L_b \tan \beta_b = 35,526\ 39\ \text{мм}. \quad (\text{B.17})$$

h) Обчислюють  $C_{a2}$ , модифіковане значення  $C_a$ , потрібне, щоб утворити модифікацію нахилу лінії зуба  $\Delta f_{H\beta}$ :

$$C_{a2} = C_a + (\Delta f_{H\beta} \cdot 10^{-3}) = 35,576\ 39\ \text{мм}. \quad (\text{B.18})$$

i) Обчислюють модифікований основний кут нахилу лінії зуба  $\beta_{b2}$ , потрібний, щоб утворити модифікацію нахилу лінії зуба  $\Delta f_{H\beta}$ :

$$\beta_{b2} = \arctan \left( \frac{C_{a2}}{L_b} \right) = 21,568\ 55^\circ. \quad (\text{B.19})$$

j) Обчислюють модифікований хід  $L_2$ , потрібний, щоб утворити модифікацію нахилу лінії зуба  $\Delta f_{H\beta}$ :

$$L_2 = \frac{d_b \pi}{\tan \beta_{b2}} = 899,247\ 18\ \text{мм}. \quad (\text{B.20})$$



к) Обчислюють модифікований кут нахилу лінії зуба  $\beta_2$ , потрібний, щоб утворити модифікацію нахилу лінії зуба  $f_{Hb}$  (передбачаючи незмінний ділительний діаметр  $d$ ):

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{d\pi}{L_2}\right) = 23,029\ 00^\circ. \quad (B.21)$$

л) Обчислюють модифікований нормальний модуль  $m_{n2}$  для модифікованого ходу нахилу лінії зуба  $\beta_2$  (передбачаючи незмінний ділительний діаметр  $d$ ):

$$m_{n2} = m_t \cos \beta_2 = 7,998\ 28. \quad (B.22)$$

м) Обчислюють модифікований нормальний кут профілю  $\alpha_{n2}$  для модифікованого основного діаметра  $d_{b2}$ :

$$\alpha_{n2} = \arctan(\tan \alpha_t \cos \beta_2) = 19,996\ 04^\circ. \quad (B.23)$$

Початкове число зубців ( $z$ ) потрібно тоді використовувати з модифікованим кутом нахилу лінії зуба ( $\beta_2$ ), нормальним модулем ( $m_{n2}$ ) і нормальним кутом зачеплення ( $\alpha_{n2}$ ), щоб утворити модифікований хід ( $L_2$ ).

Коли потрібний основний кут нахилу лінії зуба для налагодження механічного приладу вимірювання нахилу лінії зуба, використовують  $\beta_{b2}$ . Основний діаметр  $d_b$  залишається незмінним за цих розрахунків.

#### **В.4 Перевіряння еталонного зразка модифікованої ексцентричності кроку**

Як зазначено в ISO 18683, може бути потрібним виміряти еталонний зразок кроку з уведеною додатковою ексцентричністю. Вплив доданої ексцентричності на крок і повний накопичений крок (повна варіація крокового переміщення) можна визначити використанням розрахунків, описаних у наступному прикладі. В цьому прикладі всі обчислення зроблені в поперечній площині, дотичній до установленого діаметра.

##### **В.4.1 Методи введення ексцентричності**

На прикладах, де еталонний зразок має бути фізично встановлений правильно до осі обертання, ексцентричність мають вводити фізичним зміщенням еталонного зразка. На устаткованні, де прилад математично вирівнюють до баз еталонного зразка (СММи), ексцентричність можна ввести математичним зміщенням частини системи координат.

#### **Розрахунок зміни кроку і значень крокового переміщення, спричинених введеною ексцентричністю**

Значення кроку можна обчислити як різницю між послідовними значеннями крокового переміщення, або значення крокового переміщення можна розрахувати підсумовуванням послідовних значень кроку. Використання будь-якого методу приведе до тих самих результатів.

Значення крокового переміщення:

- обертання проти годинникової стрілки (CCW) лівої бічної поверхні зуба;
- обертання за годинниковою стрілкою (CW) правої бічної поверхні зуба:

$$M_{x1} = \frac{f_e}{\cos \alpha_{yMt}} \sin[\varphi_{fe1M} + \alpha_{yMt} - \psi_{pMt} + \tau(k-1)]. \quad (B.24)$$

- обертання CCW правої бічної поверхні зуба;
- обертання CW лівої бічної поверхні зуба:

$$M_{x2} = \frac{f_e}{\cos \alpha_{yMt}} \sin[\alpha_{yMt} - \psi_{pMt} - \varphi_{fe1M} + \tau(k-1)]. \quad (B.25)$$

Значення кроку:

- обертання CCW лівої бічної поверхні зуба;
- обертання CW правої бічної поверхні зуба:

$$M_{p1} = \frac{f_e}{\cos \alpha_{yMt}} \frac{2\pi}{z} \cos[\varphi_{fe1M} - \alpha_{yMt} - \psi_{pMt} + \tau(k-1)]. \quad (B.26)$$

- обертання CCW правої бічної поверхні зуба;
- обертання CW лівої бічної поверхні зуба:

$$M_{p2} = \frac{f_e}{\cos \alpha_{yMt}} \frac{2\pi}{z} \cos[80 - \varphi_{fe1M} + \alpha_{yMt} - \psi_{pMt} + \tau(k-1)]. \quad (B.27)$$

Оскільки розрахунок зміни в значеннях крокового переміщення є більш прямим, цей метод використовують у наступному прикладі.

Використані визначення зуба і позначення бічних поверхонь показано на рисунку В.1. Таблиця В.1 містить визначення позначень і джерел даних. Дані конструкції зубчастого колеса і дані налашки перевіряння, використані в прикладі, показано в таблиці В.2. Значення крокового переміщення, викликані доданою ексцентричністю, показано для кожної бічної поверхні в таблиці В.3. Сертифіковані значення крокового переміщення, без доданої ексцентричності, показано в таблиці В.4.

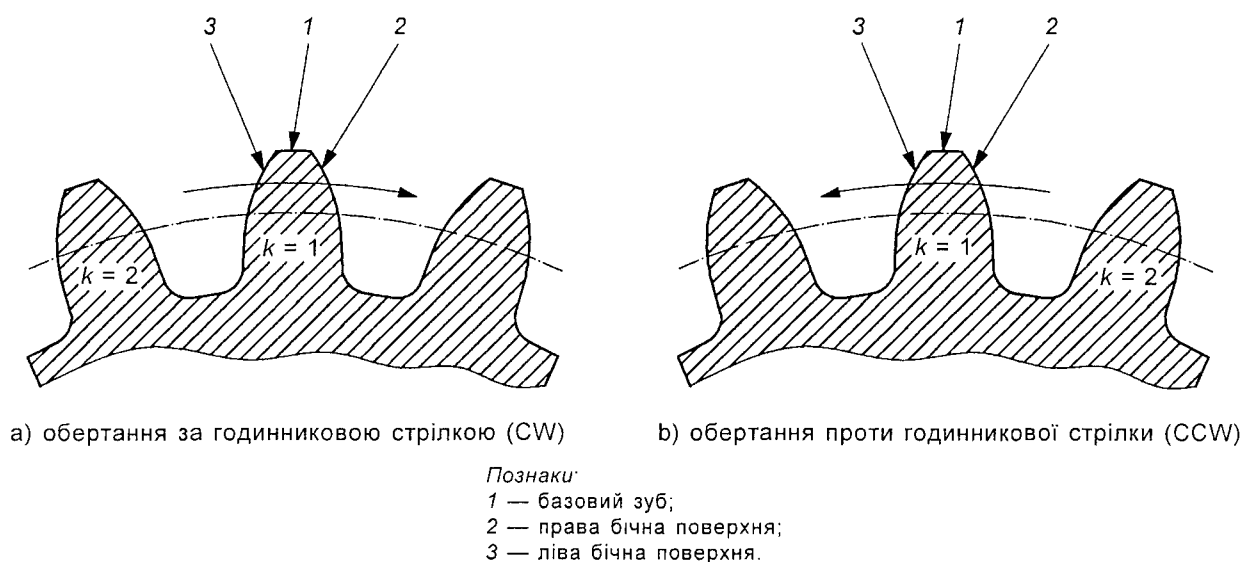


Рисунок В.1 — Зуб і позначка бічної поверхні

Таблиця В.1 — Позначки, їх описи і джерела даних

Позначки	Визначення	Джерела даних	Приклад
$d$	Стандартний дільний діаметр	$= \frac{zm_n}{\cos \beta}$	156
$d_b$	Діаметр основного кола	$= d \cos \alpha_t$	146,592
$d_p$	Діаметр кулькового наконечника (використовують 0, якщо компенсується приладом)	Наладка випробування	0
$d_M$	Діаметр вимірювання	Наладка випробування	156
$F_r$	Зміна биття (тільки від ексцентричності)	Наладка випробування $= 2f_e$	67,4
$f_e$	Ексцентричність	Наладка випробування $= \frac{F_r}{2}$	33,7
$k$	Номер зуба (від 1 до N)	Наладка випробування	від 1 до 24
$m_n$	Нормальний модуль	Дані зубчастого колеса	6,5
$M_{p1}$	Значення кроку доданої ексцентричності (поперечна площа, дотична до кола вимірювання), бічна поверхня 1	Формула 28	—

Кінець таблиці В 1

Позначки	Визначення	Джерела даних	Приклад
$M_{p2}$	Значення кроку доданої ексцентричності (поперечна площина, дотична до кола вимірювання), бічна поверхня 2	Формула 29	—
$M_{x1}$	Значення крокового переміщення доданої ексцентричності (поперечна площина, дотична до кола вимірювання), бічна поверхня 1	Формула 26	—
$M_{x2}$	Значення крокового переміщення доданої ексцентричності (поперечна площина, дотична до кола вимірювання), бічна поверхня 2	Формула 27	—
$p_z$	Хід (від'ємний для обертання CCW лівого напрямку лінії зуба і для обертання CW правого напрямку лінії зуба)	$= \pi z \frac{m_n}{\sin \beta}$	0 (прямозубе)
$s_n$	Нормальна товщина зуба на ділільному діаметрі	Дані зубчастого колеса	10,137 5
$s_t$	Торцева товщина зуба на ділільному діаметрі	$= \frac{s_n}{\cos \beta}$	10,137 5
$X_M$	Осьова відстань від ділільної поверхні до площини вимірювання	Наладка випробування	23,8
$z$	Число зубців	Дані зубчастого колеса	24
$\alpha_{yM}$	Торцевий кут профілю на діаметрі вимірювання	$= \arccos \left( \frac{d_b}{d_M} \right)$	20
$\alpha_n$	Нормальний кут профілю на ділільному діаметрі	Дані зубчастого колеса	20
$\alpha_t$	Торцевий кут профілю на ділільному діаметрі	$= \arctan \left( \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right)$	20
$\beta$	Кут нахилу лінії зуба на ділільному діаметрі, додатний для правого напрямку лінії зуба	Дані зубчастого колеса	0
$\beta_b$	Основний кут нахилу лінії зуба	$= \arccos \left( \frac{\sin \alpha_n}{\sin \alpha_t} \right)$	0
$\psi_{bt}$	Напівкут основної товщини зуба в поперечній площині	$\left( \frac{s_t}{d} + \text{inv} \alpha_t \right) \frac{180}{\pi}$	4,577 26
$\psi_{pbt}$	Напівкут основної товщини зуба з регулюванням для діаметра давача, поперечна площина	$= \psi_{bt} + \left( \frac{d_p}{d_b \cos \beta_b} \right) \frac{180}{\pi}$	4,577 26
$\psi_{pMt}$	Напівкут товщини зуба на діаметрі вимірювання з регулюванням давача, поперечна площина	$= \psi_{bt} - (\text{inv} \alpha_{yM}) \frac{180}{\pi}$	3,723 31
$\tau$	Кут кроку зуба	$= \frac{360}{z}$	15
$\varphi_{fe1}$	Кут від напрямку ексцентричності до центра зуба номер 1 на ділільній поверхні в напрямі підрахунку зубців (протилежному напрямку обертання)	Наладка випробування	136,2
$\varphi_{fe1M}$	Кут від напрямку ексцентричності до центра зуба номер 1 у площині вимірювання	$= \varphi_{fe1} + 360 \frac{X_M}{p_z}$	136,2

Таблиця В.2 — Вихідні дані прикладу

Конструктивні дані зубчастого колеса (основні)	Число зубців $z$	24
	Нормальний модуль $m_n$ , мм	6,5
	Нормальний кут зачеплення $\alpha_n$	20
	Кут нахилу лінії зуба $\beta$	0 (прямозубе)
	Нормальна товщина зуба $s_n$ , мм	10,137 5
Дані налагодження перевіряння	Ексцентричність $f_e$ , мкм	33,7
	Кут від напрямку ексцентричності до центра номера зуба номер 1 на ділильній поверхні в напрямі підрахунку зубців (протилежному напрямку обертання) $\varphi_{fe1}$	136,2
	Напрямок обертання під час вимірювання крокового переміщення	CW
	Діаметр кулькового наконечника $d_p$ , мм	0
	Діаметр вимірювання $d_m$ , мм	156
	Осьова відстань від ділильної поверхні до площини вимірювання $X_m$ , мм	23,8

Таблиця В.3 — Зміни крокового переміщення, спричинені доданою ексцентричністю

Значення у мікрометрах

Номер зуба	Обчислені формула 3 лівої бічної поверхні і формула 2 правої бічної поверхні		Значення для зуба 1, відняте від значень установленого значення для зубців від 1 до 0	
	Додана зміна крокового переміщення лівої бічної поверхні	Додана зміна крокового переміщення правої бічної поверхні	Додана зміна крокового переміщення лівої бічної поверхні	Додана зміна крокового переміщення правої бічної поверхні
1	– 31,1	16,6	0,0	0,0
2	– 25,4	7,8	5,7	– 8,8
3	– 18,0	– 1,5	13,1	– 18,1
4	– 9,3	– 10,8	21,8	– 27,3
5	0,0	– 19,3	31,0	– 35,8
6	9,2	– 26,4	40,3	– 43,0
7	17,9	– 31,8	49,0	– 48,4
8	25,3	– 35,0	56,4	– 51,6
9	31,0	– 35,8	62,1	– 52,4
10	34,6	– 34,2	65,7	– 50,8
11	35,9	– 30,3	66,9	– 46,8
12	34,7	– 24,2	65,7	– 40,8
13	31,1	– 16,6	62,2	– 33,1
14	25,4	– 7,8	56,5	– 24,3
15	18,0	1,5	49,1	– 15,0
16	9,3	10,8	40,4	– 5,8
17	0,0	19,3	31,1	2,7
18	– 9,2	26,4	21,8	9,9
19	– 17,9	31,8	13,2	15,2

Кінець таблиці В 1

Номер зуба	Обчислені формула 3 лівої бічної поверхні і формула 2 правої бічної поверхні		Значення для зуба 1, відняте від значень встановленого значення для зубців від 1 до 0	
	Додана зміна крокового переміщення лівої бічної поверхні	Додана зміна крокового переміщення правої бічної поверхні	Додана зміна крокового переміщення лівої бічної поверхні	Додана зміна крокового переміщення правої бічної поверхні
20	25,3	35,0	5,8	18,4
21	31,0	35,8	0,0	19,3
22	34,6	34,2	– 3,5	17,6
23	– 35,9	30,3	– 4,8	13,7
24	– 34,7	24,2	– 3,6	7,7
1	– 31,1	16,6	0,0	0,0

Таблиця В.4 — Сертифіковані значення крокового переміщення (без доданої ексцентричності)

Значення у мікрометрах

Номер зуба	Значення крокового переміщення лівої бічної поверхні	Значення крокового переміщення правої бічної поверхні
1	0,0	0,0
2	– 0,1	– 1,1
3	– 0,1	0,4
4	0,7	– 1,1
5	0,0	– 0,3
6	1,1	1,3
7	1,1	– 0,1
8	0,4	– 1,2
9	0,6	– 0,8
10	1,3	– 0,7
11	1,7	– 1,4
12	1,1	– 1,0
13	1,5	– 0,4
14	1,2	– 0,6
15	1,3	– 0,9
16	1,4	– 0,7
17	0,6	0,0
18	1,2	– 0,1
19	0,8	– 0,1
20	0,4	0,0
21	– 0,3	– 0,1
22	0,1	– 1,0
23	0,2	– 0,6
24	0,9	– 0,2
1	0,0	0,0

**В.4.2 Порівняння прогнозованих значень з фактичними**

Щоб отримати прогнозовані значення крокового переміщення для цього випробування, значення крокового переміщення від доданої ексцентричності і сертифіковані значення крокового переміщення для кожного зуба додаються. Прогнозовані значення показані в цифрах у таблиці В.5. Прогнозовані значення і їх взаємовідношення з биттям показані графічно на рисунку В.2. Фактичні виміряні значення для цього випробування можна порівняти (відніманням) з цими прогнозованими значеннями, щоб оцінити здатність вимірювальної системи точно міряти результатні зміни крокового переміщення.

**Таблиця В.5 — Прогнозовані значення крокового переміщення, мікрометри**

Значення у мікрометрах

Номер зуба	Прогнозоване крокове переміщення лівої бічної поверхні LF	Прогнозоване крокове переміщення правої бічної поверхні RF
1	0,0	0,0
2	5,6	– 9,9
3	13,0	– 17,7
4	22,5	– 28,4
5	31,0	– 36,1
6	41,5	– 42,7
7	50,0	– 48,4
8	56,8	– 52,7
9	62,7	– 53,2
10	67,0	– 51,5
11	68,6	– 48,2
12	66,8	– 41,8
13	63,7	– 33,5
14	57,7	– 25,0
15	50,4	– 16,0
16	41,8	– 6,5
17	31,8	2,7
18	23,1	9,7
19	14,0	15,1
20	6,2	18,5
21	– 0,2	19,1
22	– 3,5	16,6
23	– 4,6	13,1
24	– 2,7	7,5
1	0,0	0,0

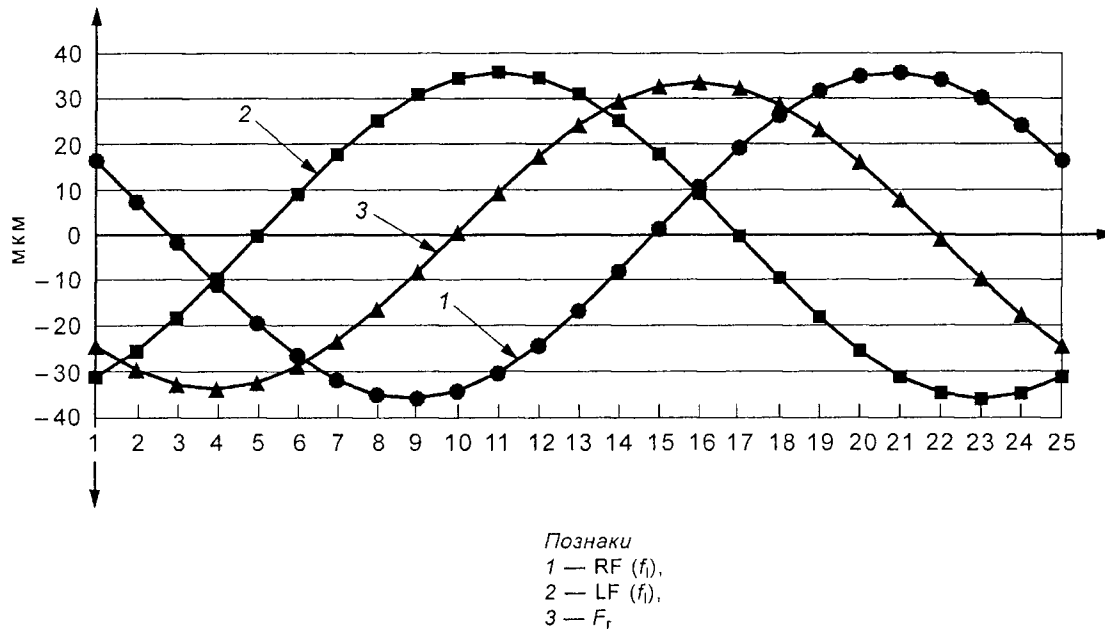


Рисунок В.2 — Значення крокового переміщення ( $f_i$ ) від доданої ексцентричності і взаємовідношення з биттям  $F_r$

#### ДОДАТОК С (довідковий)

### ІНТЕРПРЕТАЦІЯ НЕЕВОЛЬВЕНТНОГО РОЛИКОВОГО, КУЛЬКОВОГО АБО ПЛОСКОГО (ТОРЦЕВОГО) ЕТАЛОННОГО ЗРАЗКА

#### С.1 Мета

Цей додаток представляє приклади інтерпретації неевольвентних еталонних зразків. На практиці відому неевольвентну форму перевіряють контрольно-вимірювальним приладом евольвентного профілю, який скомпонований, щоб утворити еталон правильної евольвентної форми, асоційований з установленим основним колом. Теоретичні відхилення, які потрібно виміряти приладом, можна розрахувати і порівняти з фактичними виміряними результатами.

Концепцією є заміна евольвентної форми простою геометрією, як наприклад пряма лінія або круг, які можна виготовити з вищою точністю. Це дає можливість під час випробовування перевіряти стан давача, розташування давача і коефіцієнт передачі приладу.

#### С.2 Типи неевольвентних еталонних зразків

Неевольвентні еталонні зразки можуть приймати різноманітні форми. Найзагальнішими є плоскі еталонні зразки (також відомі як торцеві еталонні зразки, див. рисунок 19) і роликові еталонні зразки (див. рисунки 20 і 21). Іншою конструкцією є кульковий еталонний зразок (див. рисунок 22). Плоскі еталонні зразки складаються з елементу плоскої поверхні, яка представляє площину, що паралельна і зміщена від осі обертання еталонного зразка. Роликові еталонні зразки складаються з роликового елемента, який представляє циліндр з його віссю, паралельною і зміщеною від осі обертання еталонного зразка. Кулькові еталонні зразки складаються з двох кулькових елементів, один з яких визначає вісь обертання еталонного зразка, а інший — поверхню вимірювання. Плоский, роликовий і кульковий еталонні зразки обслуговують подібні функції в калібруванні приладів перевірки евольвентного профілю.

### **С.2.1 Функція неевольвентного еталонного зразка і калібрування**

Щодо обговорення функції плоского, роликового і кулькового еталонного зразка і калібрування, див. від 6.4.2 до 6.4.5.

### **С.2.2 Вплив наконечника давача**

Розрахунки відхилу неевольвентного еталонного зразка від установленної евольвенти мають компенсуватися відповідно відхилам вектора. Сертифікація діаметра наконечника давача звичайно проводиться окремо від сертифікаційних вимірів неевольвентного еталонного зразка. Проте дані мають бути цілком доступні для повних і точних розрахунків відхилу неевольвентного еталонного зразка від установленної евольвенти. Відхил діаметра наконечника давача від сертифікованого розміру матиме тільки дуже незначний вплив на точність випробувань неевольвентного еталонного зразка.

### **С.2.3 Місце вимірювання**

Може бути потрібним обмежити перевірку плоского і роликового еталонного зразка до установленого осьового розташування для того, щоб мінімізувати впливи відхилів виготовлення. Кульковий еталонний зразок має бути досліджено точно на екваторі кулі.

## **С.3 Монтуювання елементів еталона**

Еталонні зразки звичайно монтують між центрами на приладі перевіряння евольвентного профілю. Це зручно і прийнятно, бо існують інші різноманітні можливі конфігурації. Проте, оскільки фізична орієнтація еталонного зразка на приладі може впливати на результати перевіряння, еталонні зразки мають бути забезпечені відповідними еталонними поверхнями, щоб дозволити підтвердження відповідного монтуювання. Звичайно, ця вимога стосується ідентифікації розташувань центрувального діаметра в напрямі будь-якого кінця еталонного зразка. Амплітуда і кутова орієнтація характеристик биття цих еталонних поверхонь мають бути долучені в дані сертифікації еталонного зразка і підтверджені як частина методики калібрування приладу перевіряння еталонного профілю. Еталонні зразки можна також конструювати без забезпечення монтуювання між центрами на приладі перевіряння евольвентного профілю. Такі еталонні зразки мають забезпечуватися розташуваннями або двома центрувальними діаметрами біля будь-якого кінця еталонного зразка, або одним розташуванням центрувального діаметра і центрувальним пояском, розміщеним на одній поверхні. Точне позиціювання еталонного зразка, так щоб мінімізувати биття еталонних поверхонь, вимагається для цього типу еталонного зразка. Еталонні зразки цього типу мають містити кругову діаграму, що документує величину й орієнтацію биття цих еталонних елементів, включно з підтвердженням сертифікації.

Кулькові еталонні зразки потребують точного позиціювання центра кулі, який визначає розташування осі обертання, якщо прилад не може компенсувати ексцентричність. Вісь обертання визначається лінією, перпендикулярною до осьової базової поверхні і проходить через центр кулі.

## **С.4 Інтерпретація неевольвентного калібра**

### **С.4.1 Рекомендована практика калібра**

Неевольвентні калібри (плоскі, роликові і кулькові калібри) дають дуже вигнуті сліди випробування, які відповідають у перебільшеній формі певним категоріям варіації приладу випробування. Включеними є варіація позиції вимірювального давача, варіація коефіцієнта передавання і варіація гістерезису. Краще обмежити обстеження слідів випробування неевольвентних калібрів цими характеристиками.

Контрольно-вимірювальний прилад має задовільно функціонувати під час перевіряння евольвентних калібрів перед подальшим удосконаленням за спроби використання неевольвентних калібрів. До того ж, якщо певні типи регулювань зробити в приладі, щоб поліпшити випробування неевольвентних калібрів, то перевіряння евольвентного калібра буде необхідно через взаємовпливовий характер таких регулювань. Неевольвентні калібри можуть бути цінним інструментом у руках кваліфікованого метролога зубчастих коліс, але їх потрібно застосовувати із застереженням.

### **С.4.2 Інтерпретація сліду випробування**

Чотири типи варіації контрольно-вимірювального приладу буде змодельовано в наступних прикладах. Буде представлено отримані в результаті сліди плоского, роликового і кулькового калібрів. Також буде представлено для додаткової довідки поєднані сліди евольвентних калібрів. Важливо відзначити, що різні джерела варіації приладу буде представлено окремо з іншими



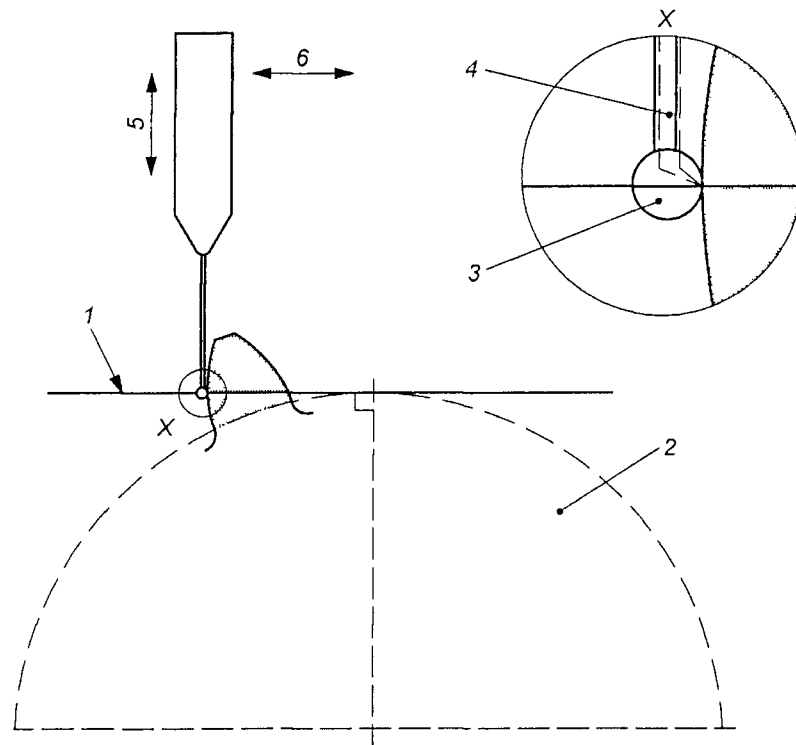
джерелами варіації приладу, старанно відрегульованого, щоб гарантувати ясність прикладу. Звичайно, на практиці існують одночасно кілька або всі джерела варіації, надаючи інтерпретації комплексне завдання.

#### С.4.2.1 Зміщення базової площини давача

Для того, щоб утворити встановлену евольвенту, точка контакту між давачем і поверхнею калібру має лежати в межах площини, дотичної до встановленого основного циліндра. Варіація розташування давача в напрямі, перпендикулярному до цієї площини, буде вважатися як варіація зміщення базової площини давача. Зміщення базової площини давача відбувається в  $90^\circ$  від напрямку зміщення описаної доріжки обкату, див. рисунок С 1.

Загальною причиною цього типу варіації приладу є зношування наконечника давача. Деякі прилади застосовують наконечники давача різцевого типу, щоб контактувати з евольвентним профілем гострим наконечником. Установка цього типу наконечника давача на прилад передбачає позиціювання кінця наконечника в межах необхідної площини. Проте, якщо гострий різцевий наконечник зношений, це може достатньо полегшити контактування сторони різця швидше, ніж кінця з евольвентним профілем. Цього стану краще уникати підтриманням гостроти наконечника різця.

Як плоский, так і роликівий еталони відтворюють сліди від'ємної тенденції від початку за нульових градусів обкату до нижньої точки або відбувається реверсування напрямку з послідовною додатною тенденцією. Будь-яка варіація в зміщенні базової площини давача спричинить точку контакту між давачем і еталоном, що відбувається на іншому діаметрі еталона на початку випробування. Ділянка від'ємної тенденції на початку слідів випробування досить чутлива до цього. Якщо давач контактує з калібром малого діаметра, то амплітуда від'ємної частини сліду буде збільшуватися від початку до точки реверсування напрямку. Якщо давач контактує з більшим діаметром, то амплітуда буде зменшуватися. Фактично, якщо початкова точка сліду точно визначена, то виявляється, що весь слід буде йти вниз або підійматися, оскільки ввідна частина сліду таким чином продовжується або скорочується.



#### Позначки

- 1 — основна дотична площина,
- 2 — основний циліндр,
- 3 — кульковий давач,
- 4 — давач з гострим наконечником,
- 5 — напрям зміщення основної площини давача (див С 4 2 1),
- 6 — напрям зміщення доріжки обкату давача (див С 4 2 2)

Рисунок С.1 — Зміщення давача

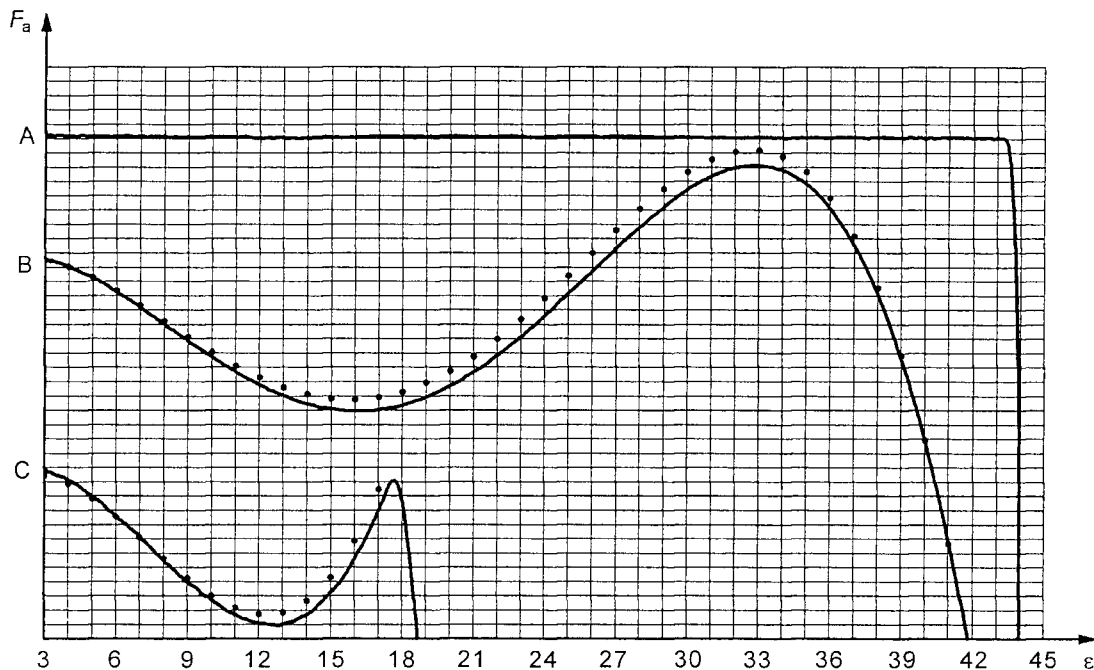
Щоб виправити ситуацію, переміщують давач подалі від осьової лінії, якщо від'ємна частина сліду довша, ніж установлена; переміщують давач ближче до осьової лінії, якщо від'ємна частина сліду коротша, ніж установлена. Регулювання є відносно чутливим. Зміна на 38 мм представлена на рисунку С.2. Це призведе аж до 5 мкм зміни в переміщенні слідів, див. рисунок С.2, сліди В і С.

Відзначають також, що регулювання не має значного впливу на евольвентний калібр, див. рисунок С.2, слід А. У випадках великої варіації зміщення основної площини давача може трапитися варіація нахилу евольвенти. Таким чином, у випадку будь-якого регулювання зміщення основної площини давача, щоб поліпшити робочу характеристику неевольвентного калібра, потрібно провести повторні випробування для гарантії, щоб не було несприятливого впливу на його робочу характеристику нахилу.

#### С.4.2.2 Зміщення доріжки обкату давача

Оскільки вимірювальний давач проводиться уздовж елемента калібра від нижнього до вищого діаметрів, він переміщується дотично до основного циліндра в межах площини зачеплення. Величина зміщення давача від осьової лінії, де площина зачеплення контактує з основним циліндром, буде визначати діаметр, на якому давач контактує з калібром. Варіація зміщення давача в цьому напрямі буде вважатися варіацією зміщення доріжки обкату давача. Зміщення обкату давача відбувається в  $90^\circ$  від напрямку зміщення основної площини давача, описаного вище, див. рисунок С.1.

Більше зміщення доріжки обкату давача закінчиться контактом на вищому діаметрі, тоді як менше зміщення закінчиться контактом на нижчому діаметрі. Важливо відзначити, що ця категорія варіації приладу не має впливу на точність евольвенти, яка утворюється. Вона тільки впливає на точність ступенів масштабування обкату, змушуючи правильні дані випробування евольвенти зміщуватися вбік із місця розташування. За наявності цього типу помилки, сліди плоского і роликового калібрів також прагнуть зміщуватися вбік. Проте, оскільки сліди направляються значно вниз для першої частини їх довжини, слід може здаватися переміщеним із місця розташування вертикально на наступний тип характеристики сліду, що трапляється за наявності варіації зміщення основної площини давача. Інтерпретація цього типу варіації може бути важкою.



Крапкові криві зображають теоретичні значення.

Позначки:

$F_a$  — 0,05 мм/поділ;

А — евольвентний калібр;

В — роликовий калібр;

С — плоский калібр.

Рисунок С.2 — Зміщення основної площини давача

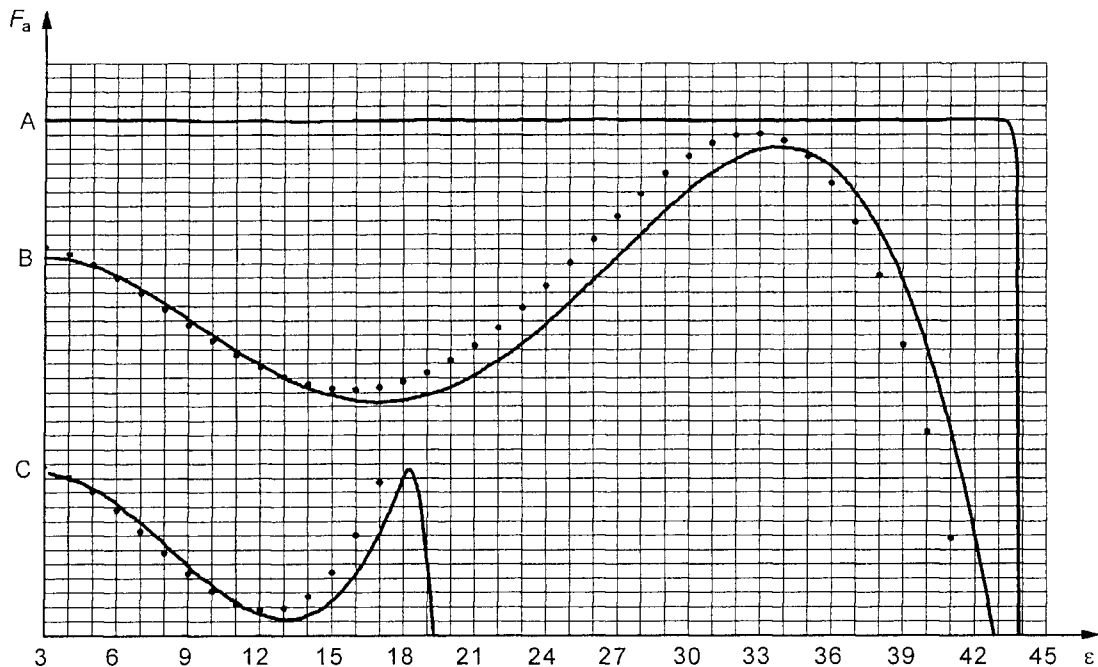
Переміщення давача ближче до основної лінії змістить слід вище уздовж ступенів масштабування обкату. Від'ємна тенденція ввідної частини сліду може також продовжуватися уздовж вертикального масштабування, спричиняючи поєднане вертикальне переміщення в місці розташування. Протилежні тенденції можна очікувати, якщо давач рухається далі від осової лінії. Регулювання не дуже чутливе. Зміна в 760 мкм потрібна, щоб утворити зміни, показані на рисунку С.3.

Відзначають, що евольвентний калібр не піддається регулюванню. У випадках великої варіації зміщення доріжки обкату давача може виникнути явна варіація значних особливостей у ступенях розташування обкату, як наприклад поступове зменшення зовнішнього діаметра.

#### С.4.2.3 Коефіцієнт передавання

Калібрувальна частина випробувального приладу евольвентного профілю має бути здатна точно виміряти величину варіації, що трапляється протягом контрольних процесів. Якщо калібрування має тенденцію показувати більшу або меншу варіацію, ніж фактичну, то це вважається проявленням варіації коефіцієнта передавання.

Проста варіація коефіцієнта передавання націлена збільшити або зменшити виміряні значення у процентному відношенні. Тому виміри малих варіацій будуть охоплювати відносно малі варіації коефіцієнта передавання, в той час більші варіації будуть охоплювати пропорційно більші варіації коефіцієнта передавання. Лінійнісна варіація є скорочена версія варіації коефіцієнта передавання, в якій відношення виміряної варіації до варіації коефіцієнта передавання не є фіксованим процентним відношенням. Виявлення лінійнісної варіації вимагає скоріше комплексних методик випробування, ніж простої варіації коефіцієнта передавання.



Крапкові криві зображують теоретичні значення.

Позначки.

$F_a$  — 0,05 мм/поділ,

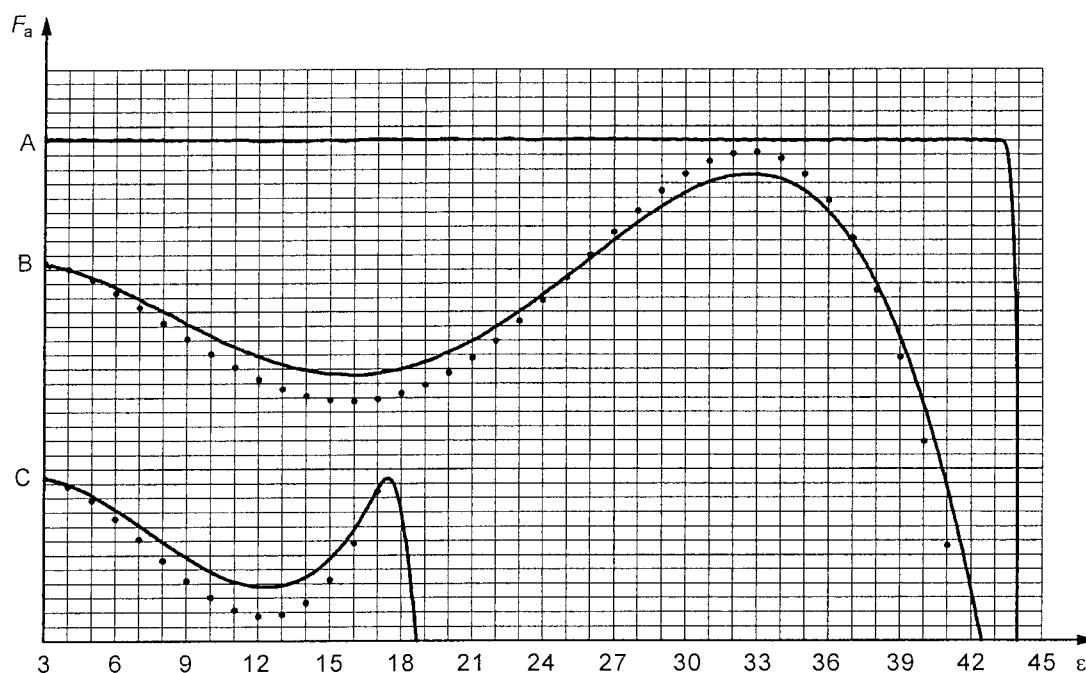
A — евольвентний калібр,

B — роликовий калібр;

C — плоский калібр.

Рисунок С.3 — Зміщення доріжки обкату давача

Типовий слід роликового калібра охоплює дві зміни ходу даних сліду, які можуть слугувати для знаходження простої варіації коефіцієнта передавання. Якщо амплітуда сліду від зміни до зміни є більша або менша, ніж установлена, то можливо необхідне регулювання коефіцієнта передавання. На рисунку С.4, слід В, чітко показано регулювання 17 мкм коефіцієнта передавання.



Крапкові криві зображують теоретичні значення.

Позначки

$F_a$  — 0,05 мм/поділ,

A — еволюентний калібр,

B — роликовий калібр;

C — плоский калібр

Рисунок С.4 — Коефіцієнтні передавання

Типовий слід плоского калібру охоплює тільки одну зміну ходу між початковим і зовнішнім діаметром. Це не вважається відповідним еталоном для цього типу регулювання, навіть якщо на його слід буде впливати варіація передавання.

#### С.4.2.4 Гістерезис

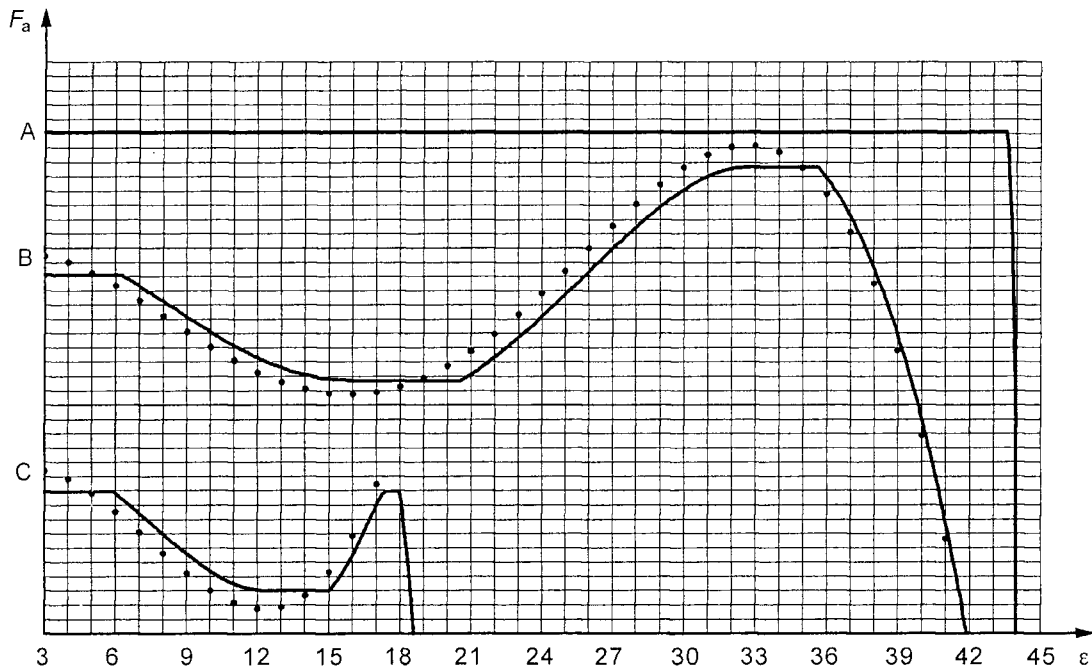
Якщо потрібно виконувати точні вимірювання приладом перевірення еволюентного профілю, то його калібрування має бути відповідно чутливим до варіацій малої амплітуди. Калібрування, яке має тенденцію відповідати тільки на варіації вище порога значимості, вказує на проявлення гістерезисної варіації.

Обидва калібри, роликовий і плоский, дають дуже вигнуті сліди, які можуть слугувати як допомога у визначенні гістерезисної варіації. На рисунку С.5, сліди B і C, видно, що кожного разу, коли трапляється початок зміни ходу або реверса зміни ходу, калібрування не в змозі відповідати на цю варіацію, доки не мине порога. Це типово закінчується невідповідними рівними місцями, в яких має бути безперервний вигнутий слід.

Гістерезис спонукає еволюентний слід A на рисунку С.5 бути досить рівним, оскільки фактичне відхилення старанно виготовленого калібру ніколи не перевищує поріг значимості калібрування. Це можна неправильно зрозуміти як ознаку чудового функціонування приладу. Але для проникливого спостерігача абсолютно рівний слід означає значний гістерезис приладу перевірення.

#### С.4.2.5 Нахил і варіація форми

Ці два важливі типи варіації приладу перевірення еволюентного профілю зазначено в ISO/TR 10064-1. Інформація, що має відношення до нахилу і варіації форми, не долучена в цей пункт тому, що еволюентний калібр вважають кращим еталоном для контролювання цього типу варіації. Проте будь-який нахил або варіація форми у випробних слідах впливатиме на випробні сліди неевольвентних калібрів у дуже подібній формі. Тому потрібно, щоб ці типи варіацій контрольно-вимірного приладу були підпорядковані контролюванню під час перевірення еволюентного калібру перед початком перевірення неевольвентного калібру, описаного в С.3.



Крапкові криві зображають теоретичні значення.

Позначки:  
 $F_a$  — 0,05 мм/поділ;  
 А — евольвентний калібр;  
 В — роликовий калібр;  
 С — плоский калібр.

Рисунок С.5 — Гістерезис

### С.5 Розрахунки плоских (торцевих) калібрів

Розрахунки передбачають порівняння перетинів плоского калібру й евольвентного калібру зі спільною лінією зачеплення за вибраних кутів обкату. Початкове положення для нуля градусів обкату обох евольвентного і плоского калібрів визначається місцем перетину з лінією зачеплення в їх точці дотику з основним колом. Для кута обкату  $\varepsilon$  довжина, розрахована від точки дотику з основним колом до евольвенти, відповідно до площини, див. рисунок С.6. Потрібно зробити поправку, оскільки точка контакту сферичного наконечника є звичайно не на тій самій лінії дотику. Ця поправка прямує до нуля для наконечника давача різцевого типу.

#### С.5.1 Розрахунки плоского калібру

Задані дані:

$r_b$  — радіус основного кола;  
 $r_s$  — радіус наконечника давача;  
 $L_o$  — відстань від центра основного кола до площини;  
 $\varepsilon$  — кут обкату;  
 $\Delta r_\varepsilon$  — теоретично виміряний відхил між площиною і евольвентою.

$$A_z = \arcsin\left(\frac{L_o}{r_b}\right) \quad (C.1)$$

$$L_i = r_b \varepsilon \left(\frac{\pi}{180}\right) \quad (C.2)$$

$$Y = 360 - 180 - \varepsilon - (90 - A_z) \quad (C.3)$$

$$\gamma = 90 - (\varepsilon - A_z) \quad (C.4)$$

$$\beta = \varepsilon - A_z \quad (\text{C.5})$$

$$L_p = \tan \beta \left( r_b + \frac{L_o}{\sin \beta} \right) \quad (\text{C.6})$$

$$L_p = r_b \tan \beta + \left( \frac{L_o}{\cos \beta} \right) \quad (C.7)$$

$$\Delta p_t = L_p - L_i + \left[ \left( \frac{r_s}{\cos \beta} \right) - r_s \right] \quad (\text{C } 8)$$

$$\Delta p_{\varepsilon} = \left[ r_b \tan(\varepsilon - A_z) + \frac{L_o}{\cos(\varepsilon - A_z)} \right] - \left[ r_b \varepsilon \left( \frac{\pi}{180} \right) \right] + r_s \left[ \frac{1}{\cos(\varepsilon - A_z)} - 1 \right] \quad (C.9)$$

Рівняння (С.9) описує теоретичну криву відхилу між площиною і формою евольвенти.

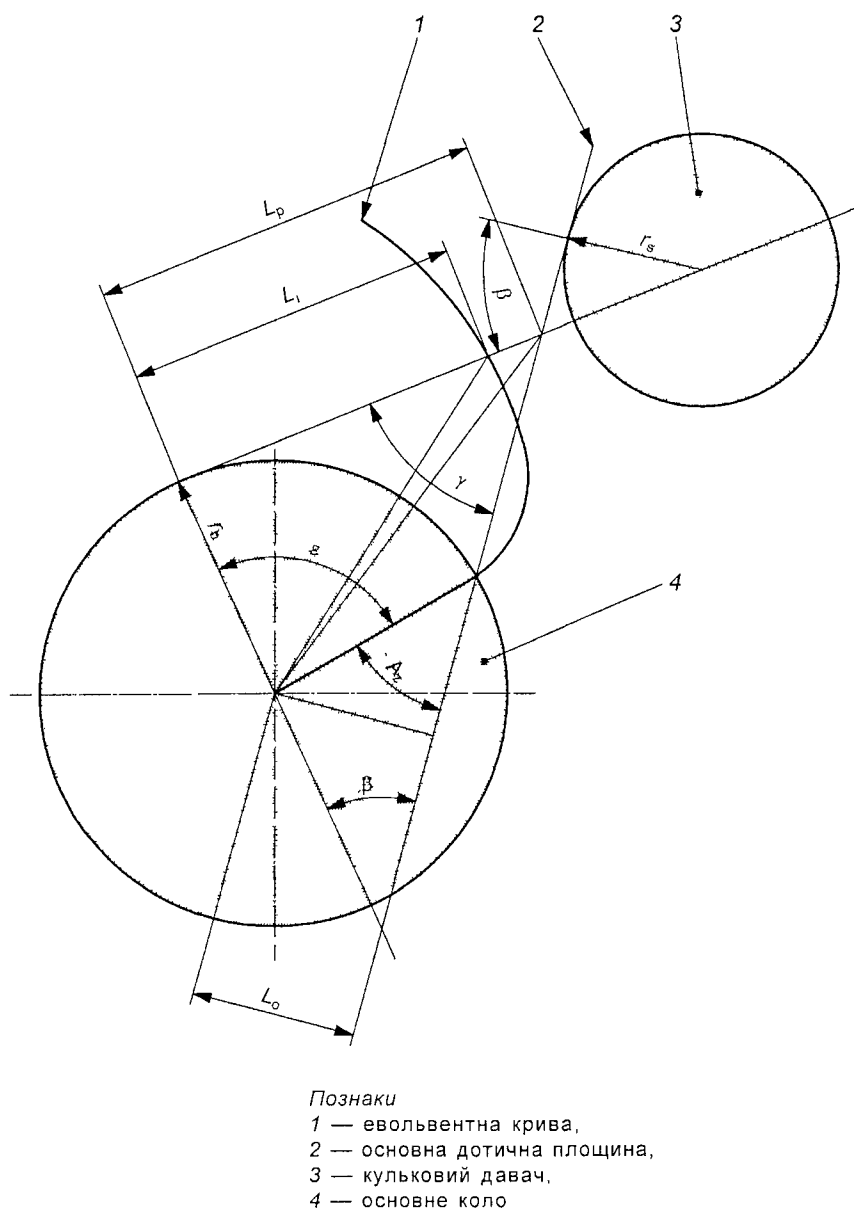


Рисунок С.6 — Визначення кута обкату

**С.5.2 Приклад плоского калібра**

Приклад розрахунку плоского калібра ґрунтується на типовому основному колі 115 мм.  
Типові задані дані:

$d_b = 115$  мм — діаметр основного кола;  
 $r_b = d_b/2 = 57,5$  мм — радіус основного кола;  
 $d_s = 1$  мм — діаметр наконечника сферичного давача;  
 $r_s = d_s/2 = 0,5$  мм — радіус наконечника сферичного давача;  
 $L_o = 9,233$  мм — зміщення площини від осьової лінії.

Розрахунок:

$$A_z = \arcsin\left(\frac{L_o}{r_b}\right)$$

$$A_z = 9,2403^\circ$$

$\varepsilon^\circ$	0,0	0,5	9,2403	10,0	13,0
$\Delta p_\varepsilon$ , мкм	0,0066	-0,0212	-0,0401	-0,0392	-0,0137

Для щупа давача різцевого типу ми маємо  $r_s = 0,0$ :

$\varepsilon^\circ$	0,0	0,5	9,2403	10,0	13,0
$\Delta p_\varepsilon$ , мкм	0,0000	-0,0226	-0,0401	-0,0393	-0,0148

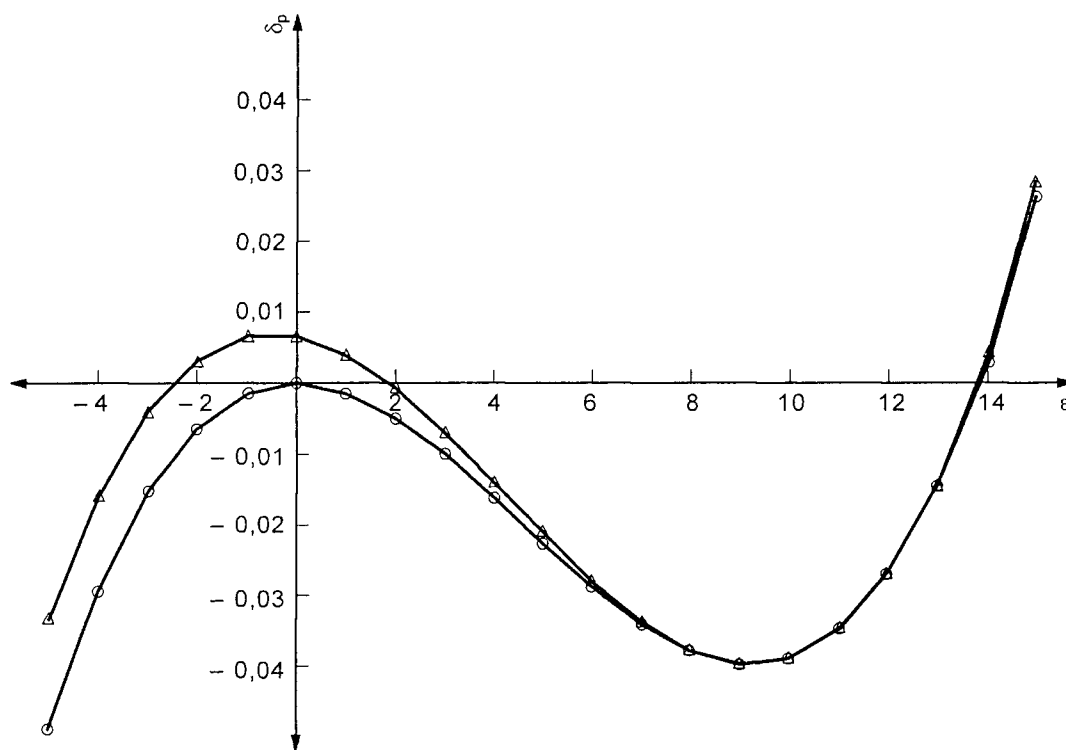


Рисунок С.7 — Графік плоского калібру для  $r_s = 0,0$  і  $r_s = 0,5$

**С.6 Розрахунки типового роликового або кулькового калібрів**

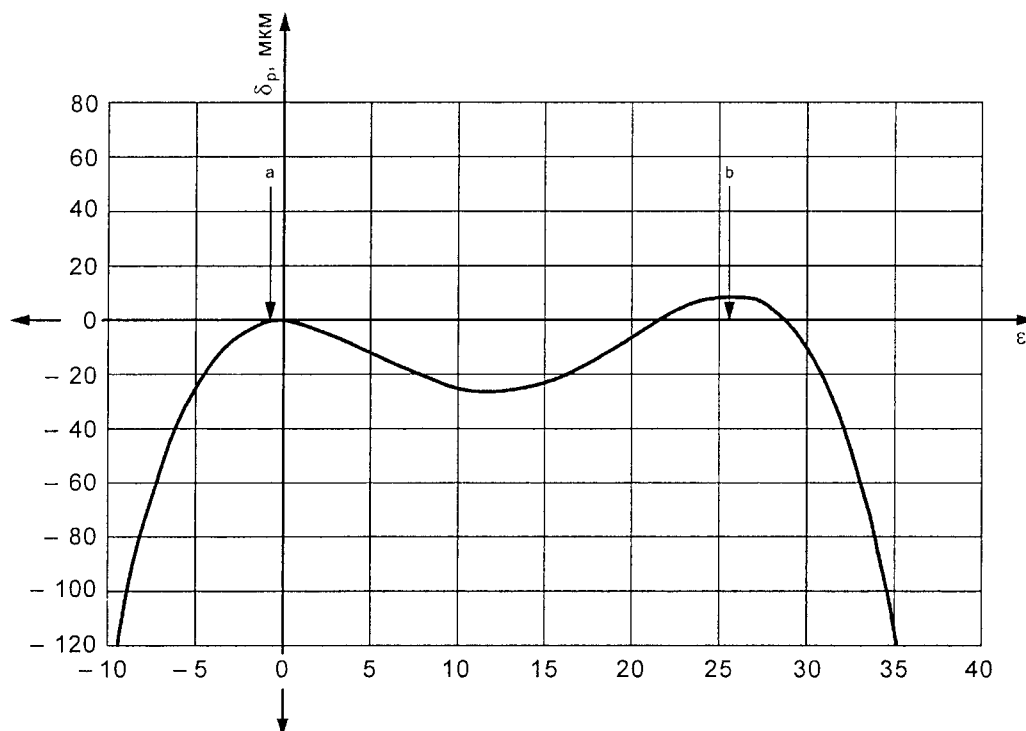
Проектування радіальної установки ролика або кульки не є частиною методики калібрування вимірювального приладу зубчастих передач. Цей параметр разом з основним діаметром і діаметром ролика/кульки визначає геометрію цього типу неевольвентного калібру і має бути відомим та сертифікованим із калібрування калібру.

Для даного завдання радіус ролика або кульки  $r_c$ , радіус наконечника щупа  $r_p$  і радіус основного кола  $r_b$  є просте взаємовідношення, щоб визначити позиційний радіус  $C$ , щоб утворити майже рівну висоту піка вихідної кривої у формі спини верблюда, див. рисунок С.8.

Формула така:

$$C = 0,994r_b + 0,038(r_c + r_p). \quad (\text{С.10})$$

Формула (С.10) дає прийнятні результати, коли  $r_b/r_c$  є між 2,5 та 5,5. Кут обкату для вимірювання в даному випадку є достатньо широко пов'язаний з фактичною перевіркою форми зуба. Див. рисунок С.9.



Позначки:

- <sup>a</sup> — пік А існує при нульовому або від'ємному куті обкату, близько точки А і зазнає сильного впливу радіуса наконечника щупа.
- <sup>b</sup> — пік В існує на ділянці додатного кута обкату і зазнає сильного впливу від значення установки основного кола.

**Рисунок С.8** — Вихідна крива роликового або кулькового еталонного зразка з вимірювального приладу зубчастих передач

### С.6.1 Визначення теоретичної кривої для кулькового давача

#### С.6.1.1 Обчислення наконечника давача кулькового типу

Задані дані:

- $r_b$  — радіус основного кола;
- $r_c$  — радіус ролика або кульки;
- $r_p$  — радіус наконечника щупа;
- $C$  — міжосьова відстань ролика або кульки;
- $\varepsilon$  — кут обкату.

Примітка. Кути в градусах.

$$\tau = \arccos \left[ \frac{r_b^2 + C^2 - r_c^2}{2r_b C} \right] \quad (\text{С.11})$$

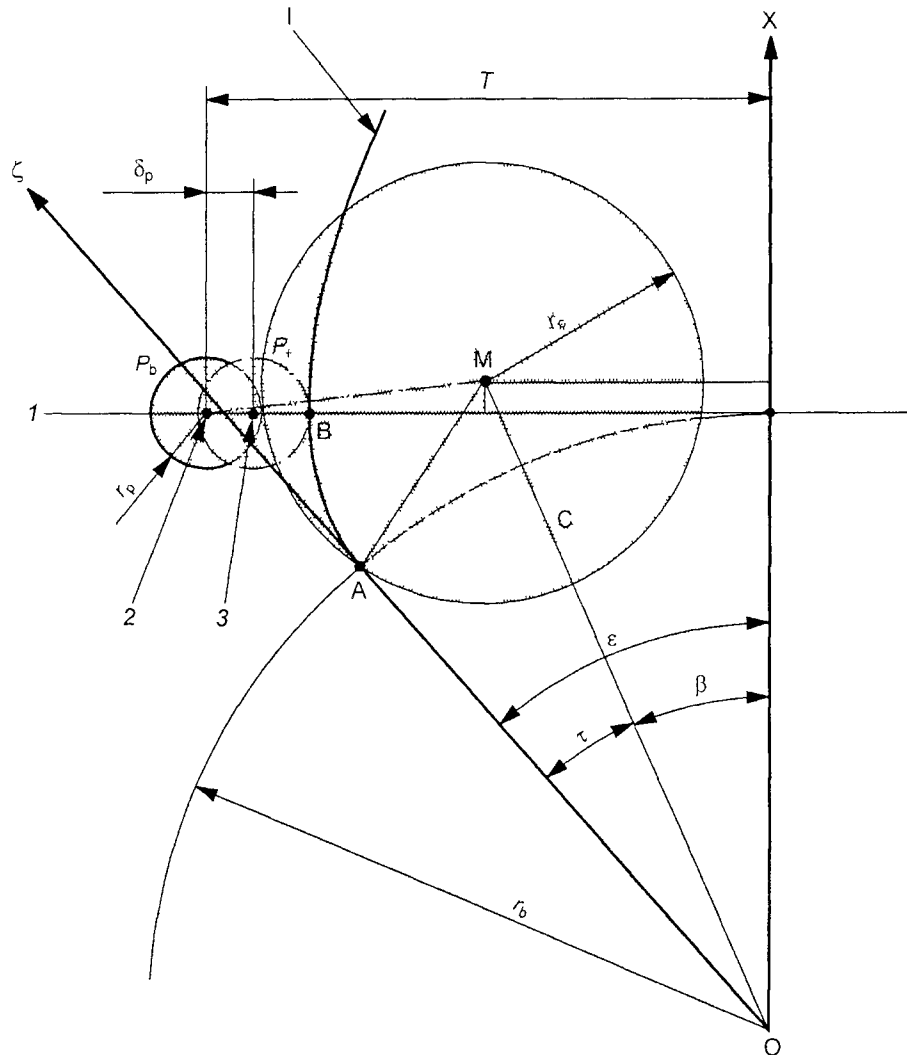


$$\beta = \varepsilon - \tau \quad (\text{C.12})$$

$$T = \sqrt{(r_c + r_p)^2 - (C \cos \beta - r_b)^2} + C \sin \beta \quad (\text{C.13})$$

$$\delta_p = T - \left[ r_b \varepsilon \left( \frac{\pi}{180} \right) + r_p \right] \quad (\text{C.14})$$

де  $\delta_p$  — різниця ролика або кульки від евольвенти за використання кулькового давача.



#### Позначки

1 — лінія зачеплення,  
 2 — центр наконечника щупа контактної  
 кола,  
 3 — центр наконечника щупа контактної  
 евольвенти,  
 O — центр основного кола  
 (центр обертання),  
 M — центр ролика або кульки,  
 $r_c$  — радіус ролика або кульки,  
 $C$  — відстань між O і M,  
 $r_b$  — радіус основного кола,  
 A — точка перетину основного кола  
 з окружністю ролика або кульки,  
 I — евольвента від точки A,  
 Z — вісь від початку O через точку A,

X — вісь ординат контрольного обладнання  
 зубчастого колеса,  
 $r_p$  — радіус наконечника щупа,  
 B — точка контакту наконечника щупа  
 з евольвентою кривою еталона,  
 $P_i$  — центр наконечника щупа, коли щуп  
 перебуває на евольвенті,  
 $P_b$  — центр наконечника щупа, коли щуп  
 перебуває на колі,  
 T — відстань від точки  $P_b$  до осі X,  
 $\varepsilon$  — кут обкату,  
 $\tau$  — кут  $\angle AOM$ ,  
 $\beta$  — кут  $\angle MOX$ ,  
 $\delta_p$  — відхил кругової форми від евольвенти

Рисунок С.9 — Відхил кругової форми від евольвенти ( $\varepsilon > 0$ )

**С.6.1.2 Приклад з наконечником давача кулькового типу**

Для

$$r_b = 25 \text{ мм}$$

$$r_c = 10 \text{ мм}$$

$$r_p = 1 \text{ мм}$$

$$C = 25,303 \text{ 6 мм}$$

$$\varepsilon = 10^\circ$$

$$\tau = \arccos \left[ \frac{25^2 + 25,303 \text{ 6}^2 - 10^2}{2(25)(25,303 \text{ 6})} \right] = 22,922 \text{ 472}^\circ$$

$$\beta = 10^\circ - \tau = 12,922 \text{ 472}^\circ$$

$$T = \sqrt{(10+1)^2 - (25,303 \text{ 6} \cos \beta - 25)^2} + 25,303 \text{ 6} \sin \beta = 5,336 \text{ 124 мм}$$

$$\delta_p = 5,336 \text{ 124} - \left[ 25(10) \left( \frac{\pi}{180} \right) + 1 \right] = -0,027 \text{ 199 мм}$$

**С.6.2 Приклад з наконечником давача різцевого типу**

Коли використовують евольвентний контрольно-вимірювальний прилад з наконечником давача різцевого типу, радіус кульки  $r_p$  потрібно встановити нульовим у формулах у С.6.1.

Для

$$r_b = 25 \text{ мм}$$

$$r_c = 10 \text{ мм}$$

$$r_p = 0$$

$$C = 25,303 \text{ 6 мм}$$

$$\varepsilon = 10^\circ$$

$$\tau = \arccos \left[ \frac{25^2 + 25,303 \text{ 6}^2 - 10^2}{2(25)(25,303 \text{ 6})} \right] = 22,922 \text{ 472}^\circ$$

$$\beta = 10^\circ - \tau = 12,922 \text{ 472}^\circ$$

$$T = \sqrt{(10)^2 - (25,303 \text{ 6} \cos \beta - 25)^2} + 25,303 \text{ 6} \sin \beta = 4,335 \text{ 606 мм}$$

$$\delta_p = 4,335 \text{ 606} - \left[ 25(10) \left( \frac{\pi}{180} \right) \right] = -0,027 \text{ 717 мм}$$

На рисунку С.10 показано різні виміри з кульковим або різцевим наконечником. Верхня крива є результатом відхилення для радіуса наконечника давача  $r_p = 1 \text{ мм}$ , нижня — для різцевого типу з  $r_p = 0$ .

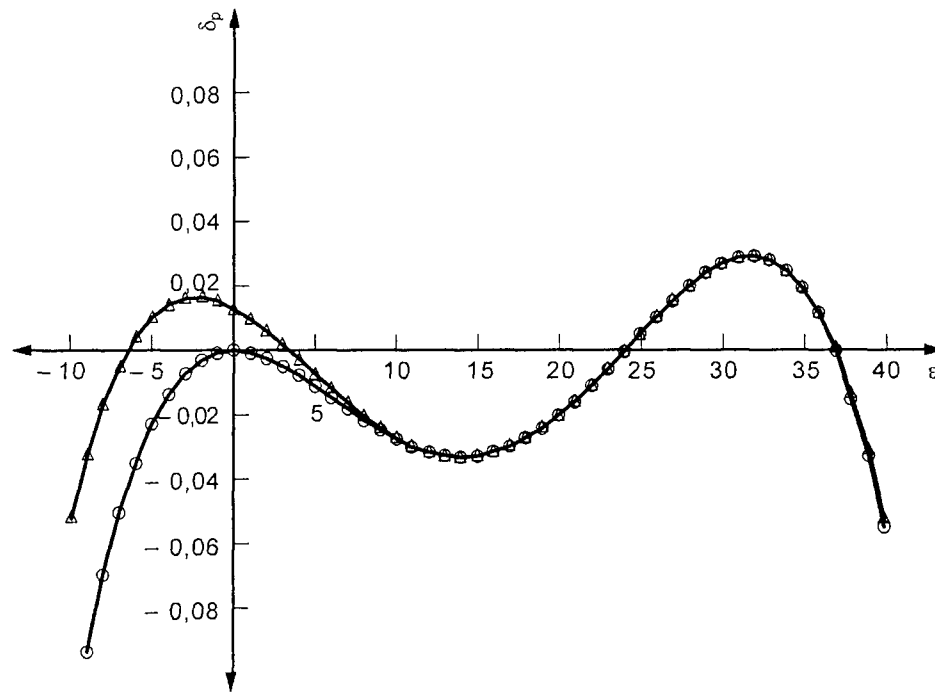


Рисунок С.10 — Різні виміри з кульковим або різцевим наконечником

### С.6.3 Впливи систематичних помилок

Взагалі, неможливо встановити еталонний зразок без помилок монтування на контрольному обладнанні зубчастого колеса, що буде калібруватися. Проте ми можемо обчислити вплив помилок монтування, який вони мають на результат вимірювання.

Припустимо, що еталонний зразок встановлений з деякими помилками установки з елементами (див. рисунок С.11):

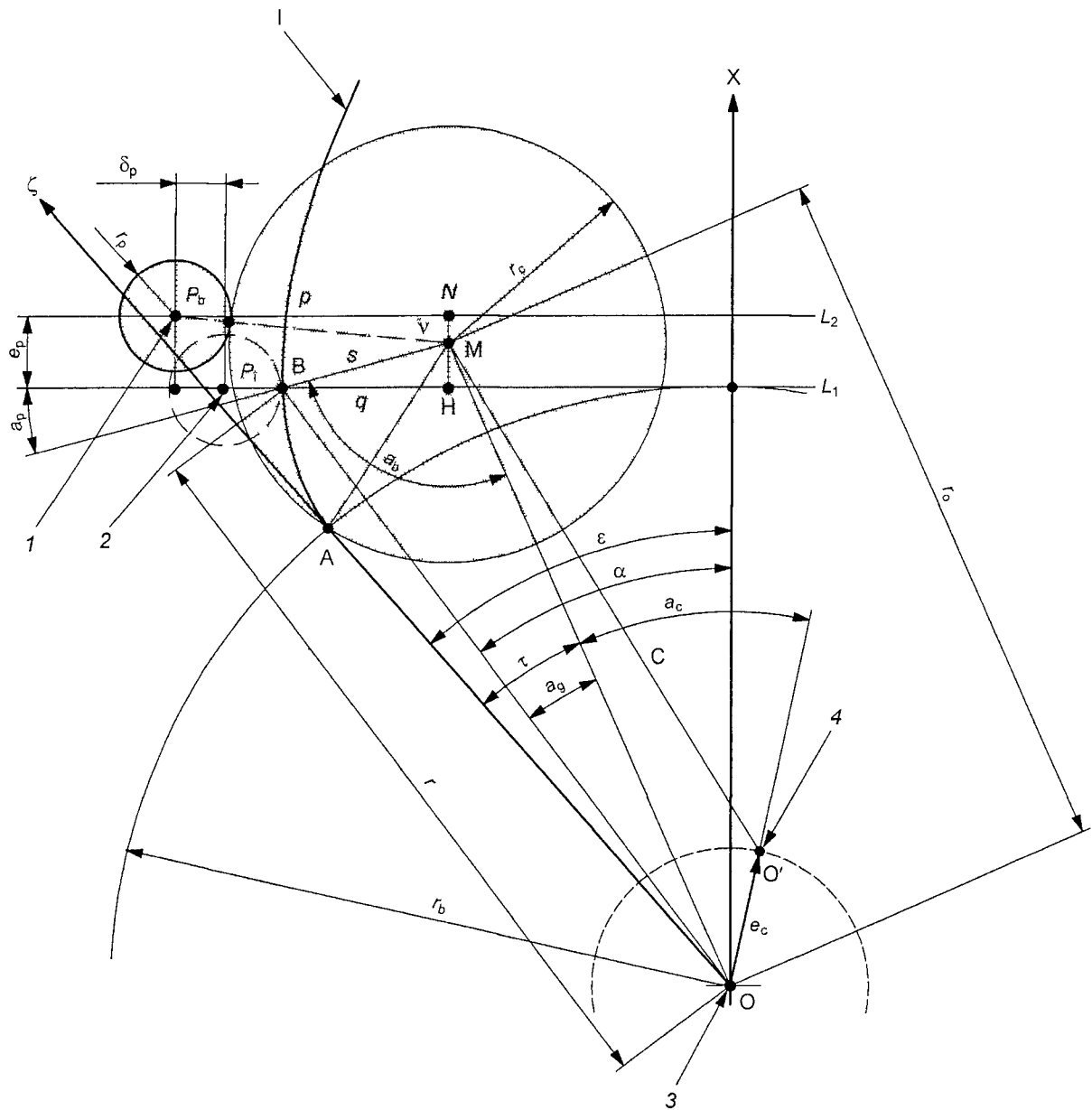
$e_p$  — величина зміщення позиції щупа від лінії зачеплення;

$e_c$  — величина зміщення центра еталонного зразка від центра обертання контрольного обладнання зубчастого колеса, що буде калібруватися;

$a_c$  — кут зміщення центра еталонного зразка від центра обертання контрольного обладнання зубчастого колеса, що буде калібруватися.

Розрахунки показують, як ці впливи можна врахувати для визначення  $\delta_p$ , тобто теоретично виміряною різницею між евольвентою і колом.

На рисунку С.11 показано вплив помилок монтування на результати. Він може дати користувачу деякі рекомендації про допустимі помилки монтування під час використання роликового або кулькового еталонного зразка.

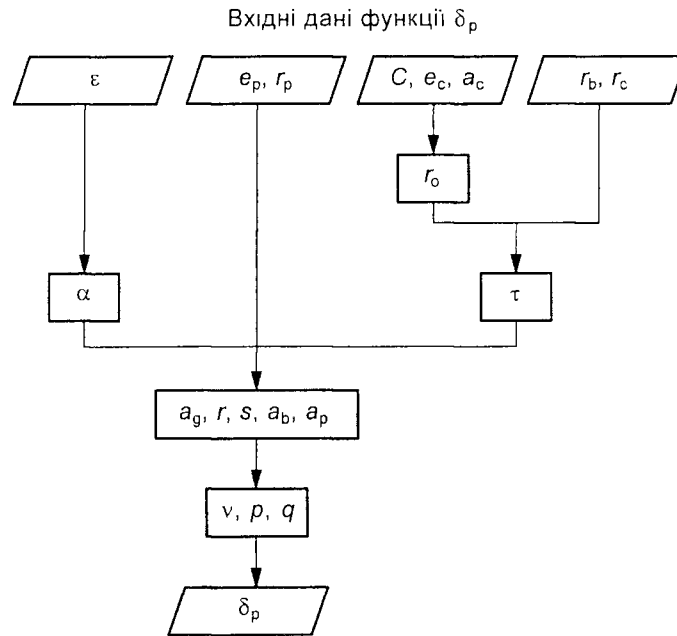


**Позначки**

- 1 — центр наконечника щупа під час контактування кола,
- 2 — центр наконечника щупа під час контактування евольвенти,
- 3 — центр основного кола центральної осі роликів або кульового еталонного зразка,
- O' — центральна вісь роликів або кульового еталонного зразка,
- e<sub>c</sub> — ексцентриситет центра еталонного зразка від осі обертання,
- a<sub>c</sub> — кут < MOO',
- L<sub>1</sub> — лінія зачеплення для евольвенти I за кута обкату ε,
- L<sub>2</sub> — лінія паралельна до L<sub>1</sub>, яка містить центр наконечника щупа P<sub>b</sub>,

- e<sub>p</sub> — відстань між L<sub>1</sub> і L<sub>2</sub> (додатна, коли лінія L<sub>2</sub> міститься з боку осі O),
- a<sub>p</sub> — кут між лінією BM і L<sub>1</sub> (a<sub>p</sub> буде від'ємним на рисунку 5),
- HN — лінія перетину перпендикуляра через M до ліній L<sub>1</sub> і L<sub>2</sub>,
- α — кут зачеплення в точці B,
- a<sub>g</sub> — кут < BOM
- r — довжина BO,
- s — довжина BM,
- a<sub>b</sub> — кут < BOM
- v — відстань MN,
- p — відстань P<sub>b</sub>N
- q — відстань BH

**Рисунок С.11** — Відхил кругової форми від евольвенти для систематичних помилок (ε > 0)



Вихідні дані вимірювального приладу евольвентного зубчастого колеса

**Рисунок С.12** — Схема послідовності операції під час обчислення відхилю  $\delta_p$  кола від евольвенти

$$r_o = e_c \cos \alpha_c + \sqrt{e_c^2 \cos^2 \alpha_c + C^2 - e_c^2} \quad (\text{C.15})$$

$$\tau = \arccos \left( \frac{r_b^2 + r_o^2 - r_c^2}{2r_b r_o} \right) \quad (\text{C.16})$$

$$\alpha = \arctan \varepsilon \quad (\text{C.17})$$

$$a_g = \tau - \varepsilon + \alpha \quad (\text{C.18})$$

$$r = \frac{r_b}{\cos \alpha} \quad (\text{C.19})$$

$$s = \sqrt{r^2 + r_o^2 - 2r r_o \cos a_g} \quad (\text{C.20})$$

$$a_b = \arccos \left( \frac{r_o^2 + s^2 - r^2}{2r_o s} \right) \quad (\text{C.21})$$

$$a_p = \frac{\pi}{2} - \tau + \varepsilon - a_b \quad (\text{C.22})$$

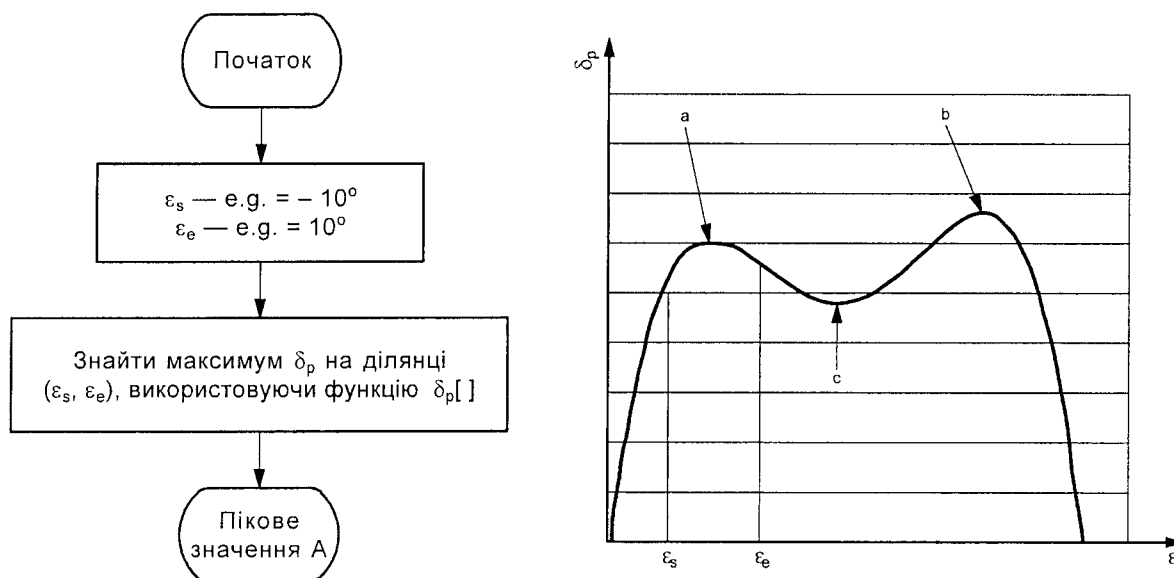
$$v = s \sin a_p + e_p \quad (\text{C.23})$$

$$p = \sqrt{(r_p + r_c)^2 + v^2} \quad (\text{C.24})$$

$$q = s \cos a_p \quad (\text{C.25})$$

$$\delta_p = p - q - r_p \quad (\text{C.26})$$

Щоб знайти пікове значення в позиції А і т.п., див. рисунок С.13.



Функцією  $\delta_p[ ]$  є набір формул від С 15 до С 26

Інтервал значень для обчислення  $\varepsilon_s$  і  $\varepsilon_e$  має бути визначений після перевіряння кривої у формі спини верблюда, у випадку невдачі дослідження пікового значення.

Позначки:

- a — пік А;
- b — пік В,
- c — западина.

Рисунок С.13 — Обчислення піків і западини кривої у формі спини верблюда

Таблиця С.1 — Цифровий приклад значень  $\delta_p$  (мм)

$\varepsilon$ (градуси)	$r_b$ (мм)	43,75	43,75	43,75	43,75	43,75
	$r_c$ (мм)	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
	$C$ (мм)	44	44	44	44	44
	$r_p$ (мм)	0	0,5	0,5	0,5	0,5
	$\theta_p$ (мм)	0	0	0,01	0,01	0,01
	$\theta_c$ (мм)	0	0	0	0,01	0,01
	$\alpha_c$ (°)	0	0	0	0	90
-10		-0,187404	-0,155430	-0,151880	-0,151445	-0,151880
-9		-0,141376	-0,114496	-0,111248	-0,110920	-0,111248
-8		-0,103903	-0,081430	-0,078465	-0,078228	-0,078465
-7		-0,073882	-0,055214	-0,052517	-0,052358	-0,052517
-6		-0,050324	-0,034932	-0,032487	-0,032393	-0,032487
-5		-0,032335	-0,019752	-0,017544	-0,017503	-0,017544
-4		-0,019104	-0,008918	-0,006934	-0,006934	-0,006934
-2		-0,004037	0,002401	0,003976	0,003926	0,003976
-1		-0,000924	0,004084	0,005472	0,005413	0,005472
0		0,000000	0,003826	0,005037	0,004981	0,005037
1		-0,000765	0,002096	0,003143	0,003098	0,003143
2		-0,002766	-0,000681	0,000211	0,000489	0,000211
3		-0,005596	-0,004126	-0,003377	-0,003366	-0,003377
4		-0,008896	-0,007899	-0,007283	-0,007230	-0,007283

Кінець таблиці С.1

ε (градуси)	$r_b$ (мм)	43,75	43,75	43,75	43,75	43,75
	$r_c$ (мм)	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
	C (мм)	44	44	44	44	44
	$r_p$ (мм)	0	0,5	0,5	0,5	0,5
	$e_p$ (мм)	0	0	0,01	0,01	0,01
	$e_c$ (мм)	0	0	0	0,01	0,01
	$a_c$ (°)	0	0	0	0	90
5		- 0,012345	- 0,011704	- 0,011212	- 0,011106	- 0,011212
6		- 0,015670	- 0,015287	- 0,014907	- 0,014738	- 0,014907
7		- 0,018636	- 0,018430	- 0,018152	- 0,017911	- 0,018152
8		- 0,021051	- 0,020958	- 0,020773	- 0,020448	- 0,020773
9		- 0,022765	- 0,022736	- 0,022633	- 0,022215	- 0,022633
10		- 0,023669	- 0,023666	- 0,023635	- 0,023113	- 0,023635
11		- 0,023694	- 0,023692	- 0,023724	- 0,023088	- 0,023724
12		- 0,022815	- 0,022799	- 0,022882	- 0,022123	- 0,022883
13		- 0,021048	- 0,021010	- 0,021136	- 0,020242	- 0,021136
14		- 0,018452	- 0,018390	- 0,018548	- 0,017511	- 0,018548
15		- 0,015125	- 0,015045	- 0,015224	- 0,014033	- 0,015224
16		- 0,011212	- 0,011121	- 0,011312	- 0,009957	- 0,011312
17		- 0,006897	- 0,006805	- 0,006997	- 0,005468	- 0,006997
18		- 0,002409	- 0,002325	- 0,002509	0,000796	- 0,002509
19		0,001982	0,002049	0,001884	0,003789	0,001884
20		0,005963	0,006008	0,005872	0,007980	0,005872
21		0,009179	0,009201	0,009105	0,011423	0,009104
22		0,011233	0,011238	0,011191	0,013730	0,011191
23		0,011688	0,011688	0,011700	0,014468	0,011700
24		0,010062	0,010081	0,010162	0,013168	0,010162
25		0,005836	0,005907	0,006068	0,009318	0,006068
26		- 0,001551	- 0,001382	- 0,001132	0,002372	- 0,001132
27		- 0,012700	- 0,012374	- 0,012024	- 0,008259	- 0,012024
28		- 0,028254	- 0,027694	- 0,027234	- 0,023202	- 0,027234
29		- 0,048892	- 0,048006	- 0,047426	- 0,043119	- 0,047426
30		- 0,075338	- 0,074013	- 0,073302	- 0,068714	- 0,073303
31		- 0,108353	- 0,106456	- 0,105604	- 0,100727	- 0,105605
32		- 0,148740	- 0,146114	- 0,145112	- 0,139941	- 0,145112
33		- 0,197345	- 0,193810	- 0,192645	- 0,187174	- 0,192646
34		- 0,255057	- 0,250404	- 0,249067	- 0,243290	- 0,249067
35		- 0,322812	- 0,316801	- 0,315280	- 0,309192	- 0,315281
36		- 0,401593	- 0,393952	- 0,392236	- 0,385831	- 0,392237
37		- 0,492437	- 0,482856	- 0,480932	- 0,474205	- 0,480933
38		- 0,596434	- 0,584562	- 0,582418	- 0,575364	- 0,582419
39		- 0,714739	- 0,700179	- 0,697801	- 0,690415	- 0,697802
40		- 0,848576	- 0,830876	- 0,828251	- 0,820526	- 0,828252

## БІБЛІОГРАФІЯ

- 1 ISO 701:1976 International gear notation — Symbols for geometrical data
- 2 ISO 1122-1:1983 Glossary of gears — Part 1: Geometrical definitions
- 3 AGMA TECHNICAL PAPER 93FTM6 Effect of Radial Runout on Elemental Measurements by I. Laskin, Consultant; R.E. Smith, R.E. Smith & Co.; and E. Lawson, Mahr Corporation
- 4 Fundamental Statistical Process. Control, Automotive Industry Action Group, December 1991
- 5 Journal of Quality Technology. Volume 16, Nor. 4, October 1984
- 6 Beyer, W. et al. Kreisförmige Evolventennormale, Qualitätstechnik, Carl Hanser Verlag, München 1986
- 7 Kondo, K., Mizutani, H. Measurement Uncertainty of Tooth Profile by Master Balls. VDI-BERICHTE R.1665 (2002) PP.797–810
- 8 Program of the Ministry of Economy, Trade and Industry for Standardization, FY2003 Report: Artifact for nanometrological calibration of gear measuring instruments and calibration method based on it for the standardization, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan (AIST), March 2004.

---

Код УКНД 21.200

**Ключові слова:** зубчасті циліндричні передачі, правила приймання, вимірювальні інструменти, оцінювання.

---

Редактор **І. Недогарко**  
Технічний редактор **О. Касіч**  
Коректор **Л. Позняк**  
Верстальник **Т. Шишкіна**

---

Підписано до друку 28.11.2013. Формат 60 × 84 1/8.  
Ум. друк. арк. 9,30. Зам. **2124** Ціна договірна.

---

Виконавець  
Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр  
проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»)  
вул. Святошинська, 2, м. Київ, 03115

Свідоцтво про внесення видавця видавничої продукції до Державного реєстру  
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції від 14.01.2006 серія ДК № 1647