МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«___»_____ 2026 р.
Зав. кафедри _д.т.н., професор___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Володимир ДІДУР___
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: **«Удосконалення критеріїв оптичного контролю якісних характеристик зубчастого вінця для маховика.»**

Виконав: студент 3 курсу, групи 31к -ім
освітньої програми___бакалавр_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»_
Кирилюк Василь Ігорович
(прізвище та ініціали)
Керівник канд. с-г наук, доцент
Головатюк Анатолій Анатолійович
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Умань – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ Володимир ДІДУР
«___» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

Кирилюку Василю Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту *«*Удосконалення критеріїв оптичного контролю якісних характеристик зубчастого вінця для маховика.*»*

керівник проекту _ Головатюк Анатолій Анатолійович, канд. с-г наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
" 08 " травня 2026 р. № 01-06/167

2. Строк подання студентом проекту 18.05.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту літературні джерела, технологічні та технічні рішення, методичні вказівки, методики.

4. Перелік питань, які потрібно розробити**:** *Вступ. 1. Аналіз стану питання за темою дипломного проекту. 2. Теоретичні та/або експериментальні дослідження за темою дипломного проекту. 3. Охорона праці. 4 . Обґрунтування досягнутих результатів. Загальні висновки. Список використаних джерел.*

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 26 вересня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	При-мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	15.10.2025 р.	
2.	Розділ 1. Аналіз стану досліджуваного питання	19.11.2025 р.	
3.	Розділ 2. Експериментальні дослідження	18.12.2025 р.	
4.	Розділ 3. Охорона праці	12.02.2026 р.	
5.	Розділ 4. Економічне обґрунтування проекту	09.03.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини проекту	15.04.2026 р.	
7.	Представлення проекту керівнику на перевірку	18.05.2026 р.	

Студент _____ Кирилюк В.І,
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту_____ Головатюк А.А,_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП 5

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗА ТЕМОЮ 7

1.1. Загальні відомості про вимірювання та похибки 7

1.2. Контроль якості у виробничому процесі 9

1.3. Методи кінцевого контролю 11

1.4. Документація кінцевого контролю 12

1.5. Зубчасті передачі та їх характеристики 13

1.6. Допуски форми та розташування поверхонь 15

2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ 17

2.1. Оптичний контроль зубчастих вінців — передумови 17

2.2. Критерії контролю якості 18

2.3. Автоматизована оптична вимірювальна система 21

2.4. Вплив зовнішніх факторів на вимірювальну систему 24

2.5. Верифікація метрологічної придатності 27

3. ОХОРОНА ПРАЦІ 32

4. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ 35

ВИСНОВКИ 37

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 39

ВСТУП

Машинобудування – це галузь промисловості, що займається перетворенням різноманітних матеріалів з метою виготовлення деталей і вузлів пристроїв, які задовольнять потреби як окремих людей, так і суспільства загалом. Одним із найважливіших завдань у машинобудуванні є виготовлення та з'єднання машинних деталей і механізмів, що забезпечують передачу або перетворення руху й енергії.

Сучасне машинобудування характеризується глибокою спеціалізацією виробників окремих машинних елементів. У епоху глобалізації цілком природно, що деталі, виготовлені різними підприємствами в різних куточках світу, збираються в єдиний функціональний вузол. Особливо яскраво це виявляється в автомобільній промисловості, де компоненти виготовляються по всьому світу, а потім збираються на головних заводах.

Зубчастий вінець є частиною вузла маховика двигуна внутрішнього згоряння, де відбувається запуск двигуна. Разом зі своїм контрпартнером, вмонтованим на стартер двигуна, він утворює зубчасту пару. Оскільки підприємство виготовляє лише один елемент такої пари, а інший – виробляється в іншому місці, надзвичайно важливо, щоб зубчастий вінець виготовлявся із суворим дотриманням встановлених допусків і геометричних вимог.

Такий підхід до виробництва можливий лише за умови, що відповідні стандарти містять не тільки вимоги до допусків, а й методи виконання вимірювань. З огляду на це контроль якості стає невід'ємною частиною виробничого процесу, а розробка надійних та ефективних методів контролю набуває першорядного значення.

Актуальність теми. В умовах зростаючих вимог до якості продукції автомобільної промисловості ручний або напівавтоматичний контроль зубчастих вінців стає недостатнім як за продуктивністю, так і за відтворюваністю результатів. Запровадження автоматизованих оптичних

систем контролю дозволяє досягти стовідсоткового охоплення вимірюваннями, виключити суб'єктивний людський фактор та суттєво підвищити надійність відбракування дефектних виробів.

Мета і завдання роботи. Метою даної роботи є розробка та обґрунтування системи оптичного контролю якісних характеристик зубчастих вінців для маховиків у виробничому процесі підприємства. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати сучасний стан методів контролю якості зубчастих вінців; визначити та обґрунтувати критерії оптичного контролю; описати структуру автоматизованої вимірювальної системи; дослідити вплив зовнішніх факторів на результати вимірювань; підтвердити метрологічну придатність системи методами аналізу вимірювальних систем (MSA).

Об'єкт дослідження – процес контролю якості зубчастих вінців для маховиків у автомобільній промисловості. Предмет дослідження — методи та засоби оптичного контролю розмірних і візуальних характеристик зубчастих вінців.

Методи дослідження. У роботі використано: методи візуального визначення дефектів на виробах; методи двовимірної обробки відеосигналів; процедури вимірювання розмірів у двох і трьох координатах; експериментальні методи аналізу дефектів на основі обробки зразків; стандартний метод визначення невизначеності вимірювань.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗА ТЕМОЮ

1.1. Загальні відомості про вимірювання та похибки

Вимірювання – це послідовність операцій із встановлення характеристик об'єкта, що вимірюється. Результат вимірювання являє собою значення фізичної величини, отримане в ході вимірювання [2]. Вимірювання зазвичай вимагають відповідних приладів, що пройшли калібрування, щоб можна було порівняти об'єкт із відомим еталоном або стандартом. Там, де точне вимірювання має вирішальне значення, результат складається з трьох компонентів: самого виміряного значення, встановленої межі похибки та ступеня довіри, що відображає ймовірність перебування дійсної характеристики в межах цієї похибки.

Вимірювальні прилади повинні відповідати ряду вимог, що враховуються при їх виборі: необхідна точність вимірювання; необхідна швидкість реєстрації; відсутність впливу на величину вимірюваної характеристики; необхідна чутливість; достатньо малі габарити та маса; простота калібрування й обслуговування [2].

Під час вимірювання необхідно усвідомлювати, що похибки є невід'ємною частиною будь-якого процесу вимірювання. Абсолютно точне вимірювання на практиці неможливе. Результати вимірювань завжди впливають на подальші рішення, тому кожне вимірювання має виконуватися з відповідним ступенем точності. При виборі методу вимірювання слід дотримуватися принципу: вимірювати настільки точно, наскільки це необхідно, а не настільки точно, наскільки це можливо.

Мірна точність – це ступінь відповідності виміряного або розрахованого значення його дійсному значенню. Спрощено, це відхилення виміряного середнього значення від дійсного значення. Метрологічну точність не слід плутати з відтворюваністю, яка характеризує ступінь, у якому повторні вимірювання або обчислення дають однакові або подібні

результати. Результат вимірювання є придатним лише тоді, коли він одночасно є точним і відтворюваним [17, 23, 24].

Повторюваність – це властивість узгодженості результатів послідовних вимірювань, виконаних окремим оператором або вимірювальним приладом на тому самому об'єкті в ідентичних умовах. Відтворюваність – це здатність до узгодженості результатів вимірювань однієї і тієї самої вимірюваної величини за змінених умов вимірювання (різні оператори, прилади, місця, час).

Похибки вимірювання поділяються на три основні категорії (рис. 1.1).

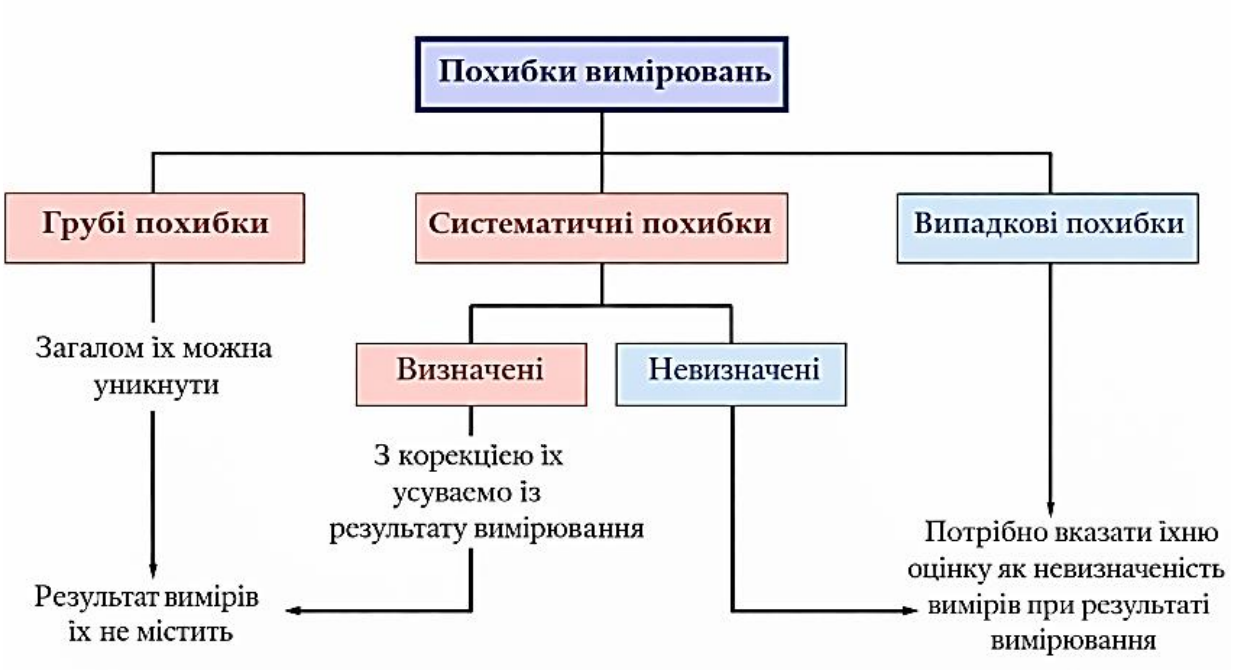


Рис. 1.1. Похибки вимірювання.

Грубі похибки виникають через помилки оператора, неправильне зчитування показань приладу, несправності вимірювального пристрою. Їх можна виявити й усунути шляхом повторних вимірювань. Систематичні похибки мають постійне значення та знак (або змінюються за певним законом) за однакових умов вимірювання і можуть бути визначені та враховані. Серед причин їх виникнення: недосконаліть конструкції приладу, порушення принципу Аббе, похибки паралаксу, вплив навколишнього середовища. Випадкові похибки не піддаються точному

визначенню, але їх вплив на результат вимірювання може бути суттєво зменшений шляхом статистичної обробки великої кількості вимірювань.

Невизначеність вимірювань – це параметр, пов'язаний із результатом вимірювання, що характеризує розкид значень, які можна обґрунтовано приписати вимірюваній величині [2, 11, 19]. Стандартна невизначеність (u) виражається як стандартне відхилення. Розширена невизначеність (U) являє собою інтервал навколо результату вимірювання, у якому, як очікується, міститься більшість розподілу значень. Відповідно до методики BIPM/ISO, компоненти невизначеності поділяються на тип А (статистична оцінка) та тип В.

1.2. Контроль якості у виробничому процесі

Контроль якості – це застосування технічних методів та заходів для виконання вимог до якості продукції. Фахівці з контролю якості перевіряють відповідність характеристик виготовлених виробів встановленим специфікаціям і відокремлюють придатні вироби від непридатних. Для успішного виконання цих завдань необхідно знати самі процеси та умови, в яких вони відбуваються.

У виробничому процесі застосовується кілька форм контролю якості. Вхідний контроль перевіряє відповідність закупленого матеріалу та комплектуючих вимогам закупівельної документації. Він запобігає надходженню неякісних матеріалів у виробництво. Процесний контроль виконується на визначених етапах виробничого процесу та виконує важливу попереджувальну функцію. Він включає обхідний контроль (поточний нагляд за якістю продукції в ході процесу) та самоконтроль (перевірку власної роботи безпосередньо виконавцем операції). Вихідний (кінцевий) контроль є останньою контрольною операцією перед відправленням готової продукції замовнику [9].

Процедури перевірки якості поділяються на три схеми. Схема А – відкрита петля розсортовування: на виході процесу виконується лише

сортування виробів за встановленими критеріями без зворотного зв'язку з процесом. Схема В – відкрита петля перевірки: результати перевірки реєструються й аналізуються для планування ремонту та доопрацювання, проте не впливають безпосередньо на параметри процесу. Схема С – замкнута петля: найдосконаліший варіант, при якому за результатами аналізу причин браку здійснюється коригування процесу виробництва за принципом циклу PDCA.

1.3. Методи кінцевого контролю та документація

Кінцевий контроль поділяється на статистичний та нестатистичний (100 % контроль). Статистичний вибірковий контроль застосовує математичну статистику для прийняття рішень про придатність партій продукції на основі обмеженої вибірки. Він є економічно ефективним, однак не дозволяє виявити всі дефектні вироби.

Нестатистичний, або 100 % контроль, передбачає перевірку кожного виробу. Він є доцільним у випадках, коли наслідки пропуску дефекту є неприйнятними, а також коли технологічний процес нестабільний. В автомобільній промисловості 100 % контроль зубчастих вінців є стандартною вимогою, оскільки дефектний виріб може спричинити відмову двигуна.

Інструменти контролю якості поділяються на статистичні та нестатистичні. До статистичних відносяться контрольні карти, плани вибіркового контролю, гістограми, діаграми розкиду, діаграма Парето, причинно-наслідкова діаграма (Ісікави) та аналіз видів і наслідків відмов. До нестатистичних – органолептичний огляд, вимірювальні шаблони, оптичні та машинно-зорові системи контролю.

Документація контролю поділяється на планову та виконавчу. До планової документації відноситься план контролю, що встановлює характеристики, методи вимірювання, частоту вимірювань та критерії

приймання. Карта процесу описує послідовність операцій із зазначенням контрольних точок.

До виконавчої документації входять контрольні карти, що фіксують результати вимірювань у часі, протоколи вимірювань та звіти про невідповідності. Правильне ведення документації є необхідною умовою відстежуваності та аналізу причин відхилень [4].

1.4. Зубчасті передачі та їх характеристики

Зубчасті передачі є одними з найважливіших механічних елементів у машинобудуванні. Вони використовуються для передачі обертального руху та моменту між паралельними, пересічними або мимобіжними осями. За формою зубів розрізняють зубчасті колеса з прямими зубами, косозубі та шевронні. За орієнтацією осей – циліндричні (паралельні осі), конічні (пересічні осі) та гіпоїдні осі [12, 15, 21].

Зубчастий вінець для маховика є прикладом циліндричного зубчастого колеса з прямими зубами. Він встановлюється на маховику двигуна і утворює пару зі шестернею стартера. До основних параметрів прямозубого циліндричного зубчастого колеса відносяться: модуль (m), кількість зубів (z), крок зубів (p), висота головки та ніжки зуба, ділильний діаметр, діаметр вершин і западин, ширина зуба, кут профілю зачеплення [12, 23].

Якість зубчастого зачеплення визначається точністю виготовлення зубчастого колеса, що регламентується відповідними стандартами (ISO 1328, DIN 3960 та ін.). Похибки виготовлення зубчастих коліс поділяються на кінематичні (відхилення відносного положення зубів), похибки плавності роботи (відхилення кроку та профілю) та похибки концентрації контакту (відхилення вздовж осі). Для зубчастого вінця маховика особливо важливими є геометрична точність зубів (забезпечує нормальне зачеплення зі стартером) та точність посадочної поверхні (забезпечує правильне встановлення на маховику) [12, 22].

1.5. Допуски форми та розташування поверхонь

Допуски форми та розташування поверхонь регламентують допустимі відхилення реальних поверхонь від їхніх ідеальних геометричних форм або від ідеального відносного розташування між собою. Вони позначаються на кресленнях відповідно до стандартів ISO 1101 та ГОСТ 2.308. Застосування допусків форми та розташування продиктоване тим, що жодну деталь неможливо виготовити з математично ідеальною точністю – завжди є відхилення від ідеальної форми й розмірів.

Для зубчастих вінців найбільш значущими є такі параметри форми та розташування. Круглість (відхилення від кола) характеризує відхилення поперечного перерізу циліндричної поверхні від ідеального кола. Вона може бути визначена різними методами: за методом найменших квадратів, зони мінімальної ширини, описаного кола мінімального розміру (МСС) або вписаного кола максимального розміру (рис. 1.2,).

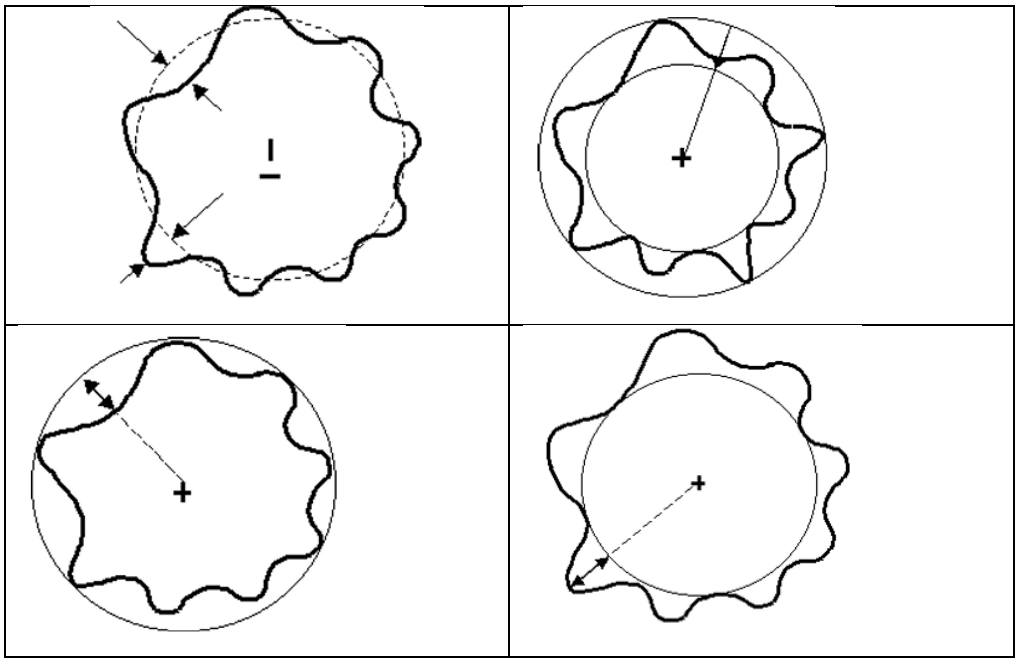


Рис. 1.2. Круглість (відхилення від кола)

Циліндричність – це відхилення реальної циліндричної поверхні від ідеального циліндра. Співвісність характеризує відхилення осі контрольованої поверхні від базової осі. Для зубчастого вінця співвісність

внутрішнього діаметра та кола вершин зубів відносно бази є критичним параметром, оскільки визначає рівномірність зачеплення [3].

Правила призначення допусків передбачають, що допуск розташування не повинен перевищувати допуск розміру, допуск форми не повинен перевищувати допуск розташування, а сума допусків складеної похибки не повинна перевищувати загального допуску. Вимоги до точності задаються через ступені точності згідно зі стандартами. Для зубчастих вінців клас точності вибирається виходячи з умов роботи та вимог до якості зачеплення.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Оптичний контроль зубчастих вінців – передумови

Необхідність розробки системи оптичного контролю зубчастих вінців виникла з кількох практичних причин. По-перше, 100 % контроль вимагає перевірки кожного виготовленого виробу, що при великих обсягах виробництва унеможливлює ручний або навіть напівавтоматичний контроль без значних витрат часу та праці. По-друге, ручний контроль є суб'єктивним і залежить від кваліфікації та уважності оператора, що призводить до нестабільності результатів між різними операторами та в різний час доби. По-третє, ряд дефектів, особливо мікротріщини та металеві задирки (голки) на зубах, важко виявити неозброєним оком, тоді як оптична система здатна детектувати їх надійно й відтворювано.

Зубчастий вінець для маховика характеризується специфічним набором якісних характеристик, що підлягають контролю (рис. 2.1, [7, 27]).



Рис. 2.1. Якісні характеристики вінця, що підлягають контролю.

Він являє собою кільце (вінець) із зубчастим вінцем по зовнішньому діаметру та точною внутрішньою посадочною поверхнею. Виріб виготовляється з конструкційної сталі, підлягає термічній обробці (загартуванню). Типові розміри: внутрішній діаметр у діапазоні 250–274 мм, зовнішній діаметр (через зуби) на 10–20 мм більший, ширина вінця – у межах кількох десятків міліметрів.

Виходячи з аналізу вимог замовника та характеристик виробу, була сформульована концепція «складанки» критеріїв якості, яка об'єднує розмірні та візуальні параметри, що підлягають контролю. Така концепція дозволяє системно охопити всі аспекти якості виробу в рамках однієї автоматизованої системи.

2.2. Критерії контролю якості

Визначення критеріїв починається зі встановлення допусків. Для мікрогеометрії (шорсткості та дрібних дефектів) ключовим орієнтиром є розмір людської волосини: при 200-кратному збільшенні.

Це дає практичний орієнтир: дефекти, порівнянні з поперечником волосини (близько 70 мкм), є виявленими та значущими. Зіставлення роздільної здатності людського ока та промислової камери (рис. 2.2, [2, 22, 24]). показує, що сучасні CCD/CMOS-камери з відповідною оптикою суттєво переважають людський зір за виявленням дрібних дефектів на великих відстанях або з постійною відтворюваністю.

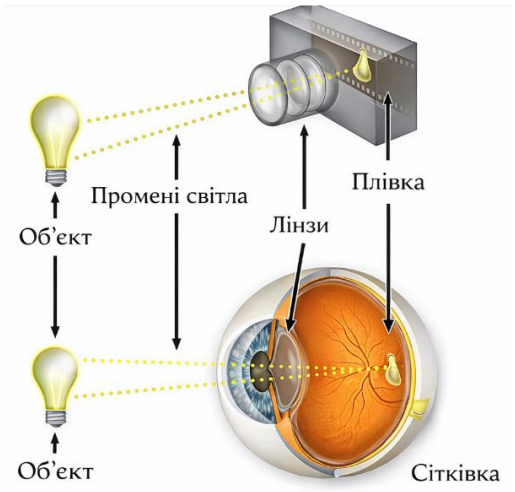
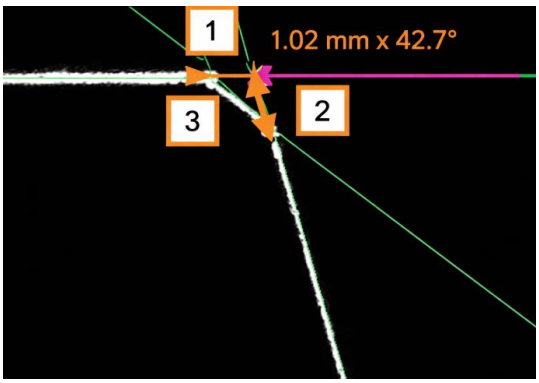


Рис. 2.3. Порівняння оптичного зору з людським.

Розмірні критерії включають перелічені нижче параметри із зазначенням граничних відхилень. Внутрішній діаметр вінця вимірюється як середнє значення по колу та перевіряється на відповідність заданому номінальному значенню з граничними відхиленнями за кресленням.

Зовнішній діаметр (через зуби) – діаметр кола вершин зубів, вимірюється аналогічно. Радіальна ширина зубів – відстань від вершини до западини зуба. Круглість внутрішнього діаметра та круглість зовнішнього діаметра (через зуби) і круглість по радіальній ширині зубів – допустимі відхилення від ідеального кола. Розміри та геометрія фаски – ширина, висота та кут фаски на торцях вінця (рис. 2.4, [7, 18, 24, 26]).



Рим 2.4. Ширина (1), висота (2), кут зрізу (3) фаз.

Вимоги до точності встановлені на основі вимог замовника та функціонального аналізу виробу. Для внутрішнього діаметра, що є посадочною поверхнею, допуск є найжорсткішим; для діаметра по вершинах зубів – менш жорстким. Допуск круглості посадочного діаметра становить частку мікрометра, оскільки від нього залежить рівноважне встановлення вінця на маховику та рівномірність зачеплення (рис. 2.5, [7, 17, 25, 26]).

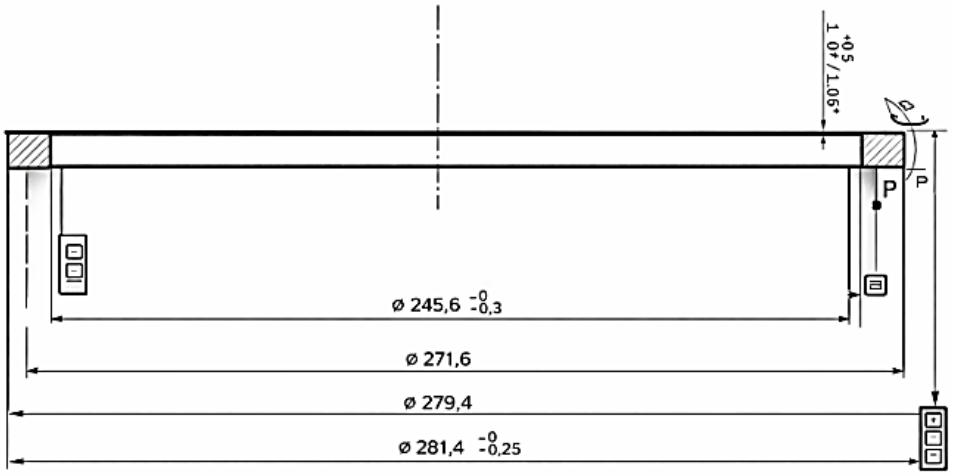


Рис. 2.5 Видовжений вигляд.

Профіль зуба фрези-черв'яка для нарізання зубів (рис. 2.6, [7, 17, 24])

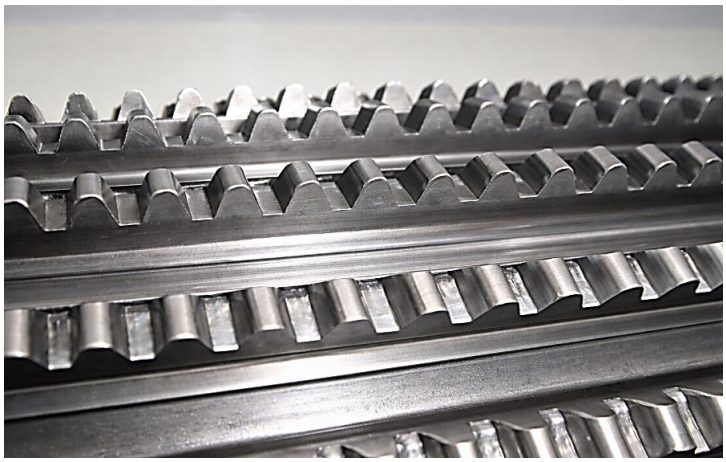


Рис. 2.6. Мідні зубчасті рейки в макрозйомці

безпосередньо визначає геометрію зубів і є основою для встановлення допустимих відхилень профілю. Система автоматизованого вимірювання здатна перевіряти відповідність профілю зубів заданим параметрам без прямого вимірювання профілю – шляхом непрямих геометричних параметрів (зовнішній діаметр, радіальна ширина зубів, їх розподіл по колу).

До візуальних критеріїв відносяться різноманітні дефекти поверхні. Тріщини (рис. 2.7, [7, 9, 18, 20]) – особливо небезпечний вид дефекту: тріщини на бічних поверхнях зубів та на внутрішньому діаметрі вінця неприпустимі в будь-якому вигляді, оскільки можуть призвести до руйнування виробу в експлуатації.

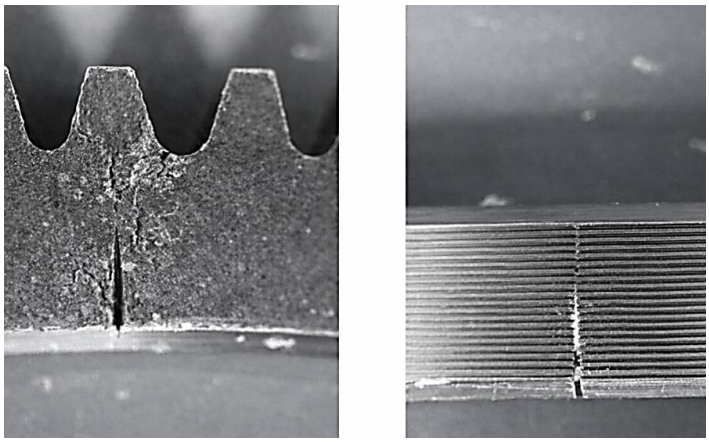


Рис. 2.7. Дефекти поверхні.

Вм'ятини та сторонні включення (рис. 2.8, [7, 18, 21, 24]) – видимі дефекти поверхні, що впливають на функціональність і товарний вигляд виробу.

Металеві задирки (голки) на зубах або на внутрішньому діаметрі (рис. 2.9, [7, 18 , 22]) є недопустимими з точки зору правильності зачеплення та безпеки. Встановлено конкретні мінімальні розміри дефектів, що підлягають виявленню, на основі вимог замовника та результатів попередніх досліджень.

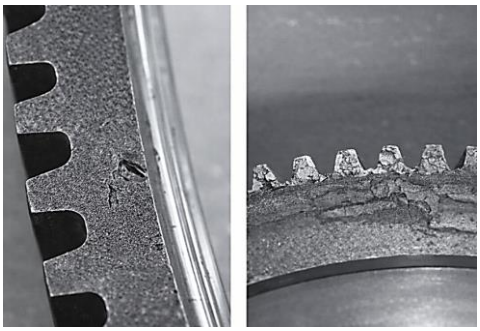


Рис. 2.9. Вм'ятини та сторонні включення.

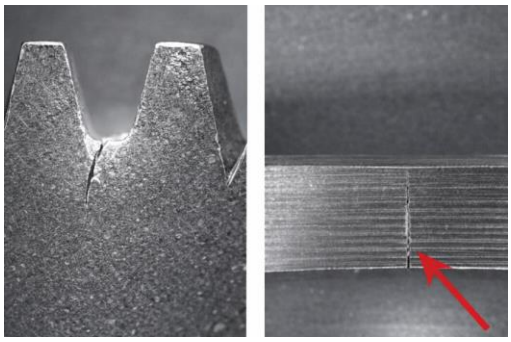


Рис. 2.10 Металеві задирки (голки) на зубах або на внутрішньому діаметрі .

2.3. Автоматизована оптична вимірювальна система

Розроблена автоматизована система включає три вимірювальних місця (ВМ), кожне з яких призначене для контролю певних параметрів виробу (рис. 2.11, [7, 18, 22]).

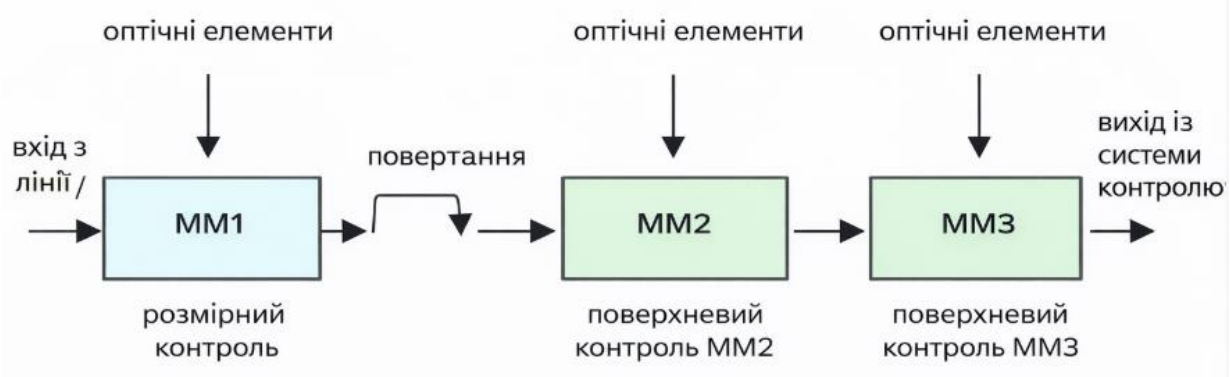


Рис. 2.11 Розроблені параметри контролю виробу.

Вимірювальне місце 1 (ВМ1) призначене для визначення розмірних параметрів у горизонтальній площині. Воно вимірює: середній внутрішній діаметр вінця (1) та круглість внутрішнього діаметра (2); зовнішній діаметр через зуби (3) та круглість зовнішнього діаметра (4); радіальну ширину зубів (5) та її круглість (6) (рис. 2.12, [7, 16 , 22 , 25]).

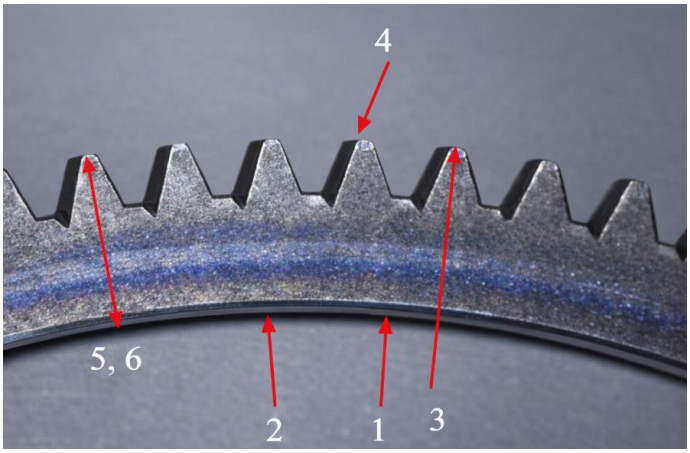


Рис. 2.12. Вимірювальні параметри.

Середній внутрішній діаметр вінця (1), круглість внутрішнього діаметра вінця (2), зовнішній діаметр по зубцях (3), круглість зовнішнього діаметра вінця (4), радіальна ширина зубців (5), круглість радіальної ширини зубців (6).

Схема розміщення елементів ВМ1 наведена на рис. 2.13, [7, 18, 22].

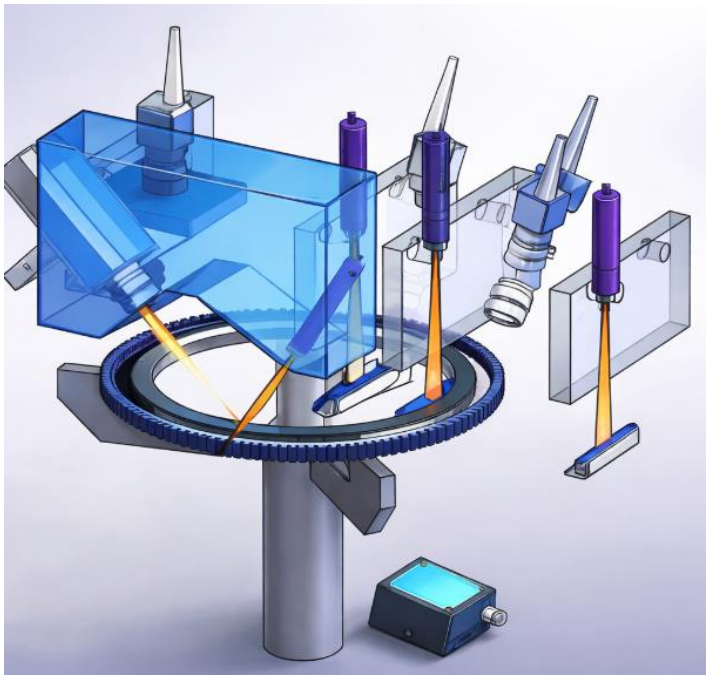


Рис. 2.13. Схема розміщення елементів ВМ1 наведена на

Тут застосовано телецентричну освітлювальну систему та CCD-камеру з відповідним програмним забезпеченням для обробки зображень. Вінець

фіксується у вертикальному положенні та обертається перед камерою, що дозволяє отримати профіль уздовж усього кола.

Вимірювальне місце 2 (ВМ2) здійснює контроль зовнішніх поверхонь і бокових граней вінця. Воно виявляє тріщини та дефекти на зовнішньому діаметрі (бічні поверхні зубів та голки) (рис. 2.14, [7]).

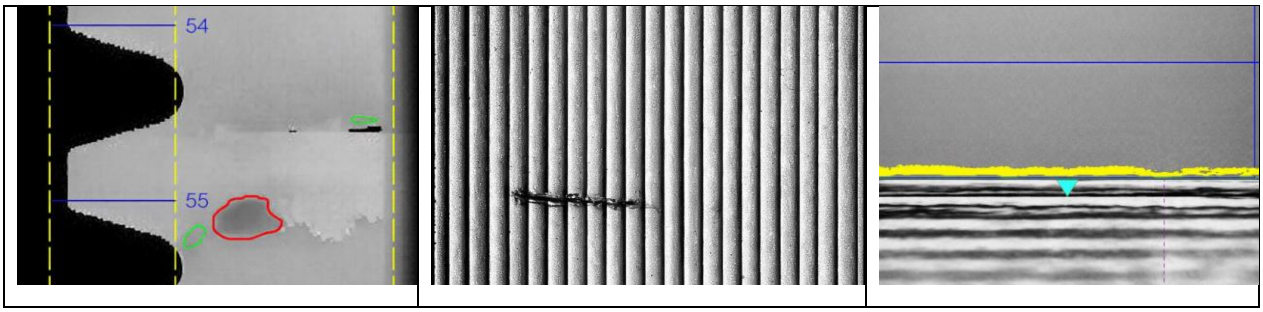


Рис. 2.14 Контроль якості вимірювання.

На цьому ВМ застосовується кільцеве освітлення для рівномірного підсвічування всієї зовнішньої поверхні з виключенням тіней. Схема розміщення елементів ВМ2 наведена на рис. 2.15 [7, 18 , 21].

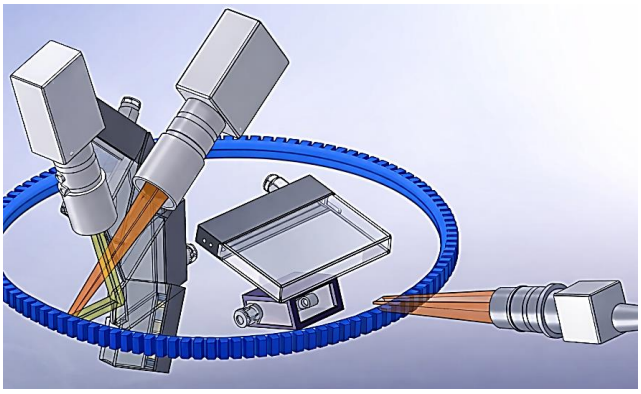


Рис. 2.15. Схема підсвічування деталей.

Вимірювальне місце 3 (ВМ3) виконує вимірювання геометрії фаски на торці вінця. Воно вимірює ширину (1), висоту (2) та кут (3) фаски (рис. 2.4, [7. 18, 22, 27]), а також висоту та довжину голки на зубі. На цьому ВМ застосовується спрямоване освітлення під певним кутом для акцентування геометрії фаски (рис. 2.16, [7]).

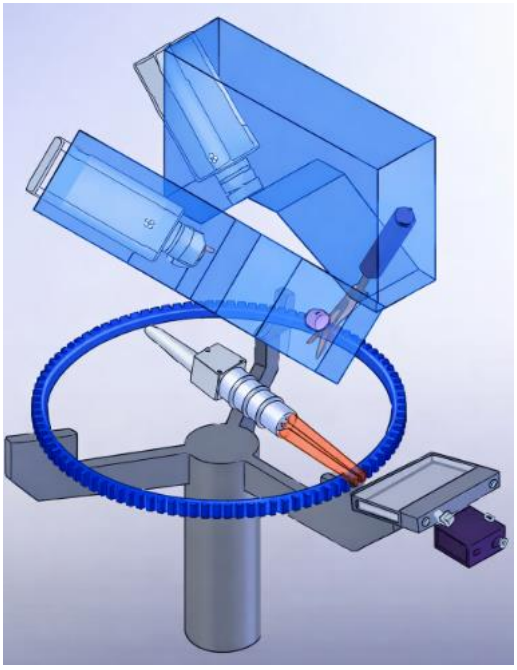


Рис. 2.16. Кут освітлення.

Технічні характеристики обладнання системи включають: промислові CCD-камери з роздільною здатністю, достатньою для виявлення мінімальних задекларованих дефектів; телецентричні об'єктиви для вимірювань ВМ1 (забезпечують паралельні промені, що усуває перспективні спотворення); стандартні об'єктиви для ВМ2 та ВМ3; джерела освітлення (LED-підсвічування різної конфігурації залежно від ВМ); промисловий комп'ютер із платою збору зображень; програмне забезпечення обробки зображень. Програмне забезпечення виконує: виявлення крайових точок та розрахунок геометричних параметрів (ВМ1), порогове бінаризування та аналіз зв'язаних компонентів для виявлення дефектів (ВМ2, ВМ3), статистичну обробку та порівняння з критеріями.

2.4. Вплив зовнішніх факторів на вимірювальну систему

Вібрації та внутрішні напруження у матеріалах безпосередньо впливають на якість зображення і, відповідно, на результати вимірювань. Вібрації виробничого обладнання передаються на вимірювальну систему і можуть призвести до розмиття зображення. Для мінімізації цього впливу система встановлена на антивібраційних підкладках та розташована на достатній відстані від важкого обладнання. Залишкові напруження в самому виробі після термічної обробки можуть змінювати форму деталі при зміні температури або після зняття з кріплення, що є джерелом нестабільності результатів вимірювань.

Освітлення є критичним фактором для систем машинного зору. Застосовано кілька підходів до мінімізації цього впливу: використання власного джерела освітлення системи (незалежно від зовнішнього цехового освітлення), кодування системи для виключення зовнішнього світла, використання освітлення зі стабілізованим живленням.

Вплив температури є найбільш суттєвим і потребує детального вивчення. Зміна температури навколишнього середовища спричиняє термічне розширення як вимірюваного виробу, так і елементів

вимірювальної системи. Коефіцієнт лінійного теплового розширення (α) сталі становить приблизно 11–12 × 10^{-6} °C^{-1}. Для виробу з внутрішнім діаметром 270 мм зміна температури на 1°C спричиняє зміну діаметра на величину:

$$\Delta L = \alpha \times l_0 \times \Delta T = 12 \times 10^{-6} \times 270 \times 1 \approx 0{,}003 \text{ мм} = 3 \text{ мкм}.$$

Це є суттєвим, якщо допуск на внутрішній діаметр становить кілька мікрометрів. Результати вимірювань температури в процесі показали, що температура в цеху змінюється в діапазоні від 17 до 27 °C залежно від пори доби та кліматичних умов. Зміни в температурному діапазоні від 17°C до 27°C зафіксовано у різні часові проміжки для всіх трьох типів виробів.

Для встановлення кількісного зв'язку між температурою та розмірами виробу проведено спеціальний експеримент з вимірювання теплового розширення. Зразки трьох типів по 10 штук кожного типу нагрівалися від 30°C до 60°C з кроком 5°C, і при кожній температурі виконувалося вимірювання внутрішнього діаметра. Результати підтвердили лінійну залежність діаметра від температури та дозволили визначити ефективний коефіцієнт теплового розширення для кожного типу виробу. Встановлено кореляційну залежність між температурою вимірюваного виробу та результатом вимірювання діаметра, яка враховується в алгоритмі програмного забезпечення для корекції результатів.

Для контролю температурного впливу в системі реалізовано температурну корекцію: у кожному вимірювальному місці встановлено датчик температури, показання якого використовуються для корекції виміряних розмірів до стандартної температури 20°C. Система вважається придатною, якщо температура не виходить за межі встановленого діапазону. У разі виходу за межі система виводить попередження та призупиняє вимірювання до стабілізації температури. Зміни виробничого процесу (освоєння нових розмірів виробів, зміна ріжучого інструменту) потребують перегляду критеріїв і параметрів налаштування системи.

2.5. Верифікація метрологічної придатності.

Аналіз вимірювальної системи виконано відповідно до методології, викладеної в [10]. Метою аналізу є підтвердження того, що вимірювальна система здатна адекватно оцінювати характеристики якості продукції з достатньою точністю та відтворюваністю.

Для кількісних (розмірних) характеристик проведено дослідження повторюваності та відтворюваності. Визначено, що варіація вимірювальної системи становить менше 10 % від допуску на вимірювані характеристики, що відповідає критерію придатності за методологією MSA. Результати аналізу здатності системи наведено у форматі MSA-звіту.

Аналіз вимірювальної системи для атрибутивних (якісних) характеристик – візуальних дефектів – проводився методом узгодженості рішень. Кожен оператор виконував оцінку однакового набору зразків із референсом. Для кожного оператора та в цілому для системи розраховувався відсоток погодженості з референсом і між операторами. Результати занесено до таблиць (рис. 2.1–2.6, [7, 9, 22]) та форм MSA-звіту.

Таблиця 2.1. Запис виконаних оцінок відповідності атрибутивних значень із референтною оцінкою.

A			B			C			REF.		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1
0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблиця 2.2. Введення результатів вимірювачів.

A * B					
			B		
			0	1	Σ
A	0	Рез.	34	5	
		Прич.рез.			
	1	Рез.	3	48	
		Прич.рез.			
Σ		Рез.		48	
		Прич.рез.			
Σ		Рез.			
		Прич.рез.			

Таблиця 2.3. Повний розрахунок для проведення аналізу результатів.

A × B					
			B		
			0	1	Σ
A	0	Факт.	34	5	39
		Очік. знач.	16,0	23,0	39,0
	1	Факт.	3	48	51
		Очік. знач.	21,0	30,0	51,0
Σ		Факт.	37	53	90
		Очік. знач.	37,0	53,0	90,0
Σ		Факт.	37,0	53,0	90,0

Таблиця 2.4. Узгодженість вимірювань між вимірювачами.

Каппа	A	B	C
A	-	0,817906	0,840183
B	0,817906	-	0,884793
C	0,840183	0,884793	-
Σ	0,840183	0,884793	-

Таблиця 2.5. Аналіз відповідності оцінювача з референтним значенням.

A × R

			A=0		
			0	1	Σ
R	0	Факт.	35	1	36
		Очік. знач.	15,6	20,4	36,0
	1	Факт.	4	50	54
		Очік. знач.	23,4	30,6	54,0
Σ		Факт.	39	51	90
		Очік. знач.	39,0	51,0	90,0
Σ		Факт.	39	51	90,0
		Очік. знач.	39,0	51,0	90,0

Таблиця 2.6. Оцінка відповідності оцінювача з референтними рішеннями.

Каппа	A	B	C
R	0,885845	0,884793	0,907407

Точність системи визначалася як відхилення виміряного значення від дійсного значення, встановленого еталонним вимірювальним засобом з відомою похибкою . Для системи встановлено, що систематична похибка не перевищує допустимих меж, а невизначеність вимірювань є прийнятною. Лінійність перевірялася шляхом вимірювань зразків з відомими значеннями в різних діапазонах і підтвердила рівномірну точність по всьому діапазону вимірювань.

Загальний результат верифікації показав, що автоматизована оптична система відповідає метрологічним вимогам і придатна для застосування в умовах виробничого контролю зубчастих вінців. Система задовольняє вимогам стандарту ISO TS 16949 щодо аналізу вимірювальних систем.

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Аналіз умов праці та потенційних небезпек

При експлуатації автоматизованої оптичної системи контролю зубчастих вінців у виробничих умовах необхідно враховувати широкий спектр факторів, що можуть негативно впливати на здоров'я та безпеку персоналу. Робоче місце оператора системи розташовано в безпосередній близькості від автоматизованого обладнання, що зумовлює наявність фізичних небезпек (рухомі частини), шумового навантаження та специфічного освітлення (LED-підсвічування).

Під час роботи з оптичною вимірювальною системою потенційні небезпеки можуть виникати від механічних небезпек: обертові та переміщуваних елементи автоматизованої системи (конвеєр, маніпулятори), а також ручне переміщення важких зубчастих вінців масою до 5–8 кг. До електричних небезпек відносяться: живлення системи (380 В / 220 В), несправності в ланцюгах живлення LED-освітлення та джерел напруги. Оптичне випромінювання включає видиме світло від потужних LED-джерел (ризик осліплення), що потребує захисних засобів. Ергономічні фактори охоплюють: тривале стояння або сидіння в статичній позі, монотонна зорова робота при моніторингу системи, навантаження на зоровий аналізатор при виправленні помилкових рішень системи.

3.2. Вимоги безпеки при роботі

Загальні вимоги до організації робочого місця передбачають: забезпечення вільного доступу до всіх органів управління та аварійного зупину системи; розміщення пульта управління на ергономічній висоті; наявність достатнього загального освітлення робочої зони (не менше 300 лк). Перед початком роботи оператор зобов'язаний: перевірити відсутність сторонніх предметів в зоні роботи системи; перевірити справність огорож рухомих частин; переконатися у відсутності механічних пошкоджень

електричних кабелів; перевірити функціонування кнопки аварійного зупину (СТОП).

При роботі з вимірювальною системою забороняється: проникати в зону роботи автоматичного обладнання без зупинки системи; знімати або відкривати захисні кожухи під час роботи; виконувати технічне обслуговування без знеструмлення та блокування системи (за процедурою lockout/tagout); дивитись безпосередньо в LED-джерела освітлення без захисних окулярів.

При ручному завантаженні/вивантаженні зубчастих вінців (якщо це передбачено конфігурацією системи) необхідно: використовувати захисні рукавички (вінці мають гострі зуби та бурти, а також можуть мати гострі задирки — «голки», що є об'єктами контролю); застосовувати правильну техніку підняття та переміщення вантажів (маса вінця до 8 кг); при переміщенні партій деталей використовувати підйомне або транспортне обладнання.

3.3. Освітлення та захист зору, електробезпека, пожежна безпека.

Потужні LED-джерела освітлення, застосовані в системі, можуть створювати зону підвищеної яскравості. Для захисту зору операторів передбачено: кожухування вимірювальних місць, яке обмежує пряму видимість джерел освітлення; монтаж матових розсіювачів на відкритих ділянках LED-підсвічування. Відеомоніторинг поточного стану системи здійснюється виключно через монітор, а не через безпосереднє спостереження у вікна вимірювальних місць. Для контролю та налагодження системи оператор повинен використовувати захисні окуляри із захистом від блікового освітлення.

Загальне виробниче освітлення на ділянці контролю повинно відповідати нормам ДБН В.2.5-28 «Природне і штучне освітлення» для категорії зорових робіт IIб (середньої точності): нормована освітленість — не менше 300 лк. Для зменшення зорової втоми рекомендується: регулярні

перерви при роботі з монітором (10 хвилин кожну годину); гімнастика для очей; достатнє загальне освітлення робочої зони без різких контрастів із яскравістю моніторів.

Вимірювальна система живиться від мережі змінного струму напругою 220/380 В. Усе обладнання повинно мати захисне заземлення відповідно до вимог ПУЕ. Монтаж та ремонт електрообладнання дозволяється виконувати лише кваліфікованому електротехнічному персоналу з відповідною групою з електробезпеки. Виконання технічного обслуговування з частковим або повним відключенням живлення здійснюється за процедурою lockout/tagout: на комутаційних апаратах вивішуються таблички «Не вмикати! Працюють люди», живлення блокується особистим замком оператора.

Приміщення, де встановлено вимірювальну систему, відноситься до категорії В з пожежної безпеки. Первинні засоби пожежогасіння (порошковий або CO_2 вогнегасник) повинні знаходитися на відстані не більше 20 м від обладнання. На ділянці встановлена автоматична пожежна сигналізація. Обладнання виконано в нормальному виконанні (не вибухозахищеному) та придатне для використання в зонах з нормальним середовищем без вибухонебезпечних домішок.

3.4. Інструктажі та навчання персоналу

До роботи з вимірювальною системою допускаються особи, які пройшли вступний та первинний інструктажі з охорони праці, навчання та перевірку знань щодо безпечних методів роботи, а також інструктаж безпосередньо на робочому місці. Повторний інструктаж проводиться не рідше одного разу на 6 місяців. Позаплановий інструктаж проводиться при зміні технологічного процесу або конфігурації системи, а також після нещасних випадків або аварій.

4. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Відповідність результатів поставленим завданням

Виконана робота повністю відповідає поставленим завданням і досягає заявленої мети. Розроблені та обґрунтовані критерії оптичного контролю охоплюють усі ключові якісні характеристики зубчастих вінців для маховиків: розмірні параметри (внутрішній і зовнішній діаметри, радіальна ширина зубів, їх круглість, параметри фаски) та візуальні параметри (тріщини, металеві задирки, вм'ятини, сторонні включення). Система реалізована у вигляді трьох спеціалізованих вимірювальних місць, кожне з яких оптимізоване для контролю певного набору характеристик.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблена система вже впроваджена у виробництво на підприємстві та підтверджена практично. Результати MSA-аналізу підтвердили метрологічну придатність системи. Варіація вимірювальної системи для розмірних характеристик становить менше 10 % від допуску, що є кращим, ніж 30 % – граничне значення, встановлене методологією MSA як прийнятне. Для атрибутивних характеристик узгодженість кожного оператора з референсом перевищує 90 %, а узгодженість між операторами – 85 %, що також відповідає критеріям придатності.

4.2. Вплив температурного фактору та його усунення

Одним із ключових досягнень є встановлення кількісної залежності між температурою навколишнього середовища та розмірами виробу, а також впровадження температурної корекції в алгоритм роботи системи. Без температурної корекції зміна температури на 10°C (що є цілком реальною для виробничого приміщення) спричинила б зміну внутрішнього діаметра зубчастого вінця (270 мм) на величину близько 0,03 мм, що може перевищувати половину всього поля допуску. Із впровадженою корекцією цей вплив практично усунуто.

Дані, отримані при вимірюванні теплового розширення, охоплюють три типи виробів (з діаметрами 250, 270 та 274 мм) у діапазоні температур від 30 до 60°C. Встановлені значення ефективних коефіцієнтів теплового розширення відповідають теоретичним значенням для конструкційних сталей і підтверджують коректність моделі корекції.

4.3. Конкурентні переваги розробленої системи

Розроблена система має кілька конкурентних переваг порівняно з альтернативними підходами. Порівняно з ручним контролем вона забезпечує: об'єктивність і відтворюваність результатів (незалежність від людського фактору); вищу продуктивність (100 % контроль без зниження темпу виробництва); краще виявлення дрібних дефектів (мікротріщини, задирки). Порівняно з контактними вимірювальними методами вона надає: відсутність впливу вимірювальної сили на виріб; можливість одночасного вимірювання кількох параметрів; можливість отримання повного профілю поверхні.

Система розроблена спільно із вітчизняним підприємством-інтегратором спеціально під вимоги конкретного виробництва. Це дозволило оптимально адаптувати конфігурацію системи (кількість і розташування вимірювальних місць, тип освітлення, алгоритми обробки зображень) до особливостей виробів і виробничого процесу. Система являє собою конкурентну перевагу підприємства у сфері забезпечення якості кінцевих виробів.

4.4. Перспективи розвитку

На основі досвіду впровадження та експлуатації системи сформульовано перспективи її подальшого розвитку. Перш за все, можливе розширення номенклатури контрольованих виробів: система, у принципі, може бути адаптована для контролю аналогічних зубчастих вінців інших розмірів шляхом перепрограмування критеріїв та, можливо, корекції оптичних елементів. Іншим напрямком є впровадження тривимірного

контролю: поточна система є двовимірною (2D). Для контролю складнішої геометрії перспективним є використання 3D-сканування (лазерна тріангуляція або структуроване освітлення). Також можлива інтеграція з системою управління якістю: передача результатів вимірювань в реальному часі до системи статистичного управління процесом (SPC) дозволить виявляти тенденції до відхилень та попереджувально коригувати процес до появи дефектів.

ВИСНОВКИ

За результатами виконаної роботи можна сформулювати такі основні висновки.

1. Проведений аналіз існуючих методів контролю якості зубчастих вінців показав, що ручний та напівавтоматичний контроль не задовольняє сучасним вимогам автомобільної промисловості за продуктивністю, відтворюваністю та повнотою охоплення. Впровадження автоматизованого оптичного контролю є необхідним і виправданим рішенням.

2. Розроблено та обґрунтовано комплекс критеріїв оптичного контролю зубчастих вінців, що охоплює розмірні характеристики (шість геометричних параметрів з їх округлістю та параметри фасок) та візуальні характеристики (тріщини, металеві задирки, вм'ятини, сторонні включення). Встановлено мінімальні виявлювані розміри дефектів, виходячи з вимог замовника та функціонального аналізу виробу.

3. Описано структуру та принципи роботи автоматизованої оптичної вимірювальної системи, що складається з трьох вимірювальних місць. Кожне вимірювальне місце оптимізовано за типом освітлення та алгоритмами обробки зображень для контролю відповідних характеристик.

4. Досліджено вплив зовнішніх факторів на результати вимірювань. Встановлено, що найбільш значущим є температурний вплив: при діапазоні коливань температури в цеху від 17 до 27°C зміна розмірів зубчастого вінця (внутрішній діаметр 270 мм) може становити до 0,03 мм. Розроблено та впроваджено алгоритм температурної корекції результатів вимірювань до стандартної температури 20°C. Вплив вібрацій та освітлення мінімізовано конструктивними заходами.

5. Проведено верифікацію метрологічної придатності системи методами аналізу вимірювальних систем (MSA). Для розмірних характеристик встановлено, що варіація системи становить менше 10 % від допуску (при граничному значенні 30 %). Для атрибутивних характеристик

узгодженість операторів з референсом перевищує 90 %. Система визнана метрологічно придатною для застосування в умовах виробничого контролю та відповідає вимогам стандарту ISO TS 16949.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авраменко В.Л., Білик О.В.: Основи метрології та вимірювальної техніки. Навч. посіб. Харків, 2009.

2. Внутрішні матеріали підприємства K.L.S.: план контролю, операційний лист нагляду (словенськ.).

3. Гончаренко А. В. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – 384 с.

4. ГОСТ 2.308–2011. ЕСКД. Обозначения допусков формы и расположения поверхностей. – М. : Стандартинформ, 2012. – 28 с.

5. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 137 с.

6. ДСТУ 8.051-81. Похибки при вимірюванні лінійних розмірів до 500 мм. Граничні значення.

7. ДСТУ ISO 1101:2013. Геометричні характеристики виробів (GPS). Допуски форми, орієнтації, розташування та биття. – Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. – 64 с.

8. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018. Невизначеність вимірювань. Частина 3. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 72 с.

9. Каплан Г. Н., Рябцев В. Н. Допуски і посадки : навч. посіб. – Київ : Техніка, 2012. – 312 с.

10. Краут Б.: Довідник машинобудівника. 4-й передрук, 12-е словенське видання. Технічне видавництво Словенії, Любляна, 2000 (словенськ.).

11. Кросбі П.Б.: Якість безкоштовна. ЧГП Дело — Господарський вісник, Любляна, 1993 (словенськ.).

12. Mapolt Й., Гомішчек Б.: Менеджмент якості. Університет у Марибурі – Факультет організаційних наук, Крань, 2005 (словенськ.).

13. Марченко О.В.: Автоматизовані системи технічного контролю. Навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2011.

14. Подлесник М.: Циліндричні зубчасті передачі. Частина 1. Університет у Марибурі, кафедра машинобудування Вищої технічної школи, Марибор, 1981.

15. Фараго Ф.Т., Кертіс М.А.: Довідник з розмірного вимірювання. Industrial Press Inc., Нью-Йорк, 1994 (англ.).

16. AIAG. Measurement Systems Analysis (MSA). – 4th ed. – Southfield, MI : Automotive Industry Action Group, 2010. – 258 p.

17. Bosch Rexroth AG. Industrial Hydraulics Training Manual. – Lohr am Main : Bosch Rexroth, 2019. – 420 p.

18. DIN 3960:1987. Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder. – Berlin : Beuth Verlag, 1987. – 32 p.

19. ISO 1101:2004. Геометричні специфікації продуктів (GPS). Допуски геометрії. Допуски форми, орієнтації, розташування та биття.

20. ISO 12100:2010. Safety of machinery — General principles for design. – Geneva : ISO, 2010. – 82 p.

21. ISO 1328-1:1995. Циліндричні зубчасті передачі. Система точності ISO. Визначення допусків на відхилення зубчастих елементів.

22. ISO 1328-1:2013. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification. – Geneva : ISO, 2013. – 48 p.

23. ISO 14253-1:2017. Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment. – Geneva : ISO, 2017. – 36 p.

24. ISO/TS 16949:2009. Quality management systems — Particular requirements for automotive production. – Geneva : ISO, 2009. – 106 p.

25. Measurement Systems Analysis. Третє видання. DaimlerChrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, березень 2002 (англ.).

26. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller System Manual. – Nürnberg : Siemens, 2022. – 560 p.

27. Steger C., Ulrich M., Wiedemann C. Machine Vision Algorithms and Applications. – Weinheim : Wiley-VCH, 2018. – 512 p.