

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою: «Адаптація вимірювальних операцій, що здійснюються на координатно-вимірювальних машинах, до контролю геометричних розмірів кілець підшипників»: 79 с., 9 табл., 45 рис., 25 джерел посилання.

ШАРИКОПІДШИПНИКИ, РОЛИКОПІДШИПНИКИ, КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ МАШИНИ, РЕГУЛЯРИЗАЦІЯ ТИХОНОВА, ТОЧНІСТЬ, РАДІАЛЬНЕ БИТТЯ, ОСЬОВЕ БИТТЯ.

Об'єкт дослідження – контроль геометричних розмірів шарикопідшипників на координатно-вимірювальних машинах з метою удосконалення процесу виробництва підшипників.

Метою даної магістерської роботи є підвищення техніко-економічних показників технологічних процесів удосконалення процесу виробництва підшипників.

Методи дослідження – аналітично-чисельний метод при розв'язанні систем алгебраїчних рівнянь у неявному вигляді, методи математичної статистики, регресійний аналіз, експериментальні методи оптимізації з використанням багатofакторних експериментів.

У першому розділі доведено, що найбільш ефективним способом контролю геометричних розмірів підшипників є вимірювання на координатно-вимірювальних машинах.

У другому розділі розглянуто основні принципи застосування методів регуляризації для вирішення погано зумовлених завдань.

У третьому розділі розроблено математичну модель вимірювання геометричних розмірів підшипників кочення на координатно - вимірювальних машинах та запропонований підхід до її практичного впровадження.

ЗМІСТ

	С.
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	5
ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ РОЗМІРІВ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ	7
2 МЕТОД РЕГУЛЯРИЗАЦІЇ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ДОРІЖОК КОЧЕННЯ КІЛЕЦЬ КУЛЬКОВИХ ПІДШИПНИКІВ НА КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ МАШИНАХ	33
2.1 Необумовлені задачі	33
2.2 Погана обумовленість задач геометричних вимірювань на невеликих областях при використанні координатно-вимірювальних машин	33
2.3 Погана обумовленість задачі вимірювання бігових доріжок підшипників кочення	35
2.4 Використання апріорної інформації для визначення параметрів поверхні	42
2.5 Дослідження впливу поганої обумовленості задачі на визначення параметрів тора	43
2.6 Вплив поганої обумовленості на результати вимірювання підшипників різних класів точності	48
2.7 Похибки у визначенні геометричних параметрів поверхонь при використанні методу регуляризації	50
2.8 Визначення коефіцієнта регуляризації	52
3 ЗАСТОСУВАННЯ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ МАШИН ДЛЯ КОНТРОЛЮ КІЛЕЦЬ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ	60
3.1 Модуль, призначений для вимірювання тороїдальних поверхонь у програмному забезпеченні ГеоАрм	60

3.2	Визначення оптимальної кількості точок на поверхнях для визначення їх параметрів	63
3.3	Методика вимірювання кілець підшипників кочення на координатно-вимірювальних машинах	70
	ВИСНОВКИ	76
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	77

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

H – мікротвердість, МПа.

HB – твердість за Бринелем.

HV – твердість за Вікерсом.

HRC – твердість за Роквелом.

δ – відносне подовження, %.

σ_m – межа текучості, МПа.

σ_{σ} – межа міцності, МПа.

$\sigma_{0,2}$ – умовна межа текучості, МПа.

σ_{-1} – границя втоми, МПа.

ψ – відносне звуження, %.

μ – коефіцієнт Пуасона.

ВСТУП

Промислове виготовлення підшипників кочення розпочалося у 1883р. у Німеччині після появи шліфувальних верстатів для кульок та роликів, і з того часу неперервно відбувається удосконалення їх конструкції та технології виробництва. Особливо відчутно рівень надійності підшипників збільшився з кінця першої половини минулого сторіччя, коли методи конструювання отримали наукову базу розрахунків у роботах Г. Лундберга, А. Пальмгрена, В. Трейєра.

Сьогодні ведучими світовими фірмами підшипникового виробництва є SKF (Швеція), FAG (Німеччина), Timken (США). У СНД підшипники виробляють 25 спеціалізованих заводів, три з яких розташовані в Україні (Харків, Вінниця, Луцьк).

Важко назвати сучасний механізм, машину чи прилад, де б не використовувалися підшипники кочення. Однак найбільшого поширення підшипники кочення дістали в сільськогосподарському машинобудуванні (630 типорозмірів), автомобілебудуванні (більше 500 типорозмірів), залізничному транспорті (110 типорозмірів). Підшипникова промисловість - одна з найбільш розвинутих в технологічному відношенні, в ній сконцентровані останні досягнення в технології металообробки та автоматизації виробництва. Випускаються різноманітні підшипники масою від 0,04 г до 130 т і діаметром внутрішнього кільця від 0,6 мм до 12 м, які можуть обертатися зі швидкістю до 300 тисяч хв^{-1} , витримувати навантаження порядку декількох тисяч кілоньютонів, працювати при температурах, близьких до абсолютного нуля, в умовах підвищеної радіації, хімічної активності та забруднення оточуючого середовища.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ РОЗМІРІВ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

Підшипники кочення, як правило, складаються із зовнішнього 1 і внутрішнього 2 кілець, тіл кочення 3, сепаратора 4 (рис. 1.1).

Тіла кочення (рис. 1.1) перекочуються по бігових доріжках кілець і забезпечують їх взаємне переміщення. Сепаратор розділяє тіла кочення, утримує їх на одній відстані та покращує змащування. Конструкція сепаратора (рис. 1.1) залежить від типу підшипника та умов його експлуатації.

Підшипники кочення, хоча і функціонують як механізми, але їм не завжди притаманна одна з характерних властивостей механізмів - передавання руху. Таким чином, підшипник кочення, коли одне з кілець нерухоме, являє собою складну механічну систему з довгочасним циклічним характером навантаження деталей. Саме це визначає особливий підхід до оцінки працездатності підшипника через показники надійності.

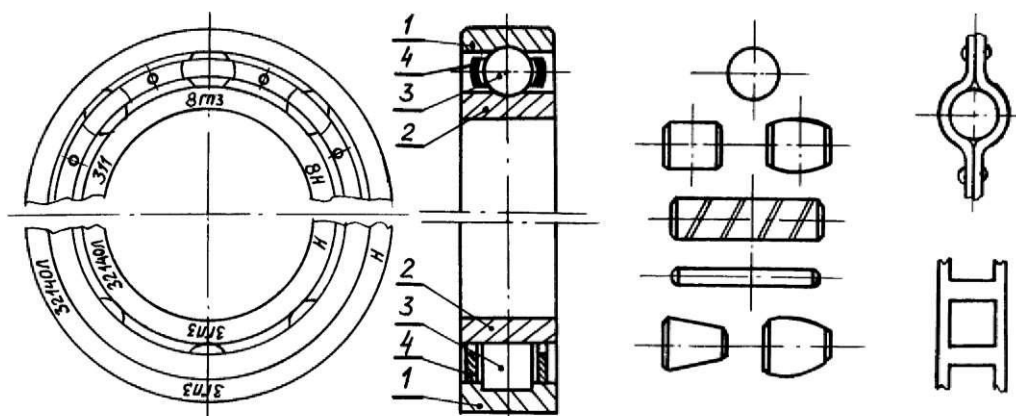


Рисунок 1.1 – Конструкція підшипників кочення

Переваги підшипників кочення порівняно з підшипниками ковзання: менші осьові габарити (у « 2.. .3 рази) при однаковій вантажності; менше тертя при пуску і помірних частотах обертання (у « 5.10 разів); більша надійність при частих змінах режимів експлуатації; відносна простота

технічного обслуговування; повна взаємозамінність; низька вартість при масовому виготовленні.

До недоліків підшипників кочення відносять: достатньо великі радіальні габарити; більший опір обертанню і нагрівання при високих частотах обертання; велике розсіювання ресурсу (10...20-кратне) партії однотипних підшипників при однакових умовах експлуатації; змінна жорсткість за кутом повороту, що викликає вібрацію вала та шумність роботи внаслідок циклічного перекошування тіл кочення через зону навантаження опори; менша здатність до демпфірування вібраційних та ударних навантажень; висока вартість підшипників при дрібносерійному виробництві.

Підшипники кочення можна класифікувати за зазначеними нижче ознаками.

1) За формою тіл кочення: кулькові і роликові. Останні, у свою чергу, залежно від форми роликів розділяють на групи: з короткими та довгими циліндричними, з бочкообразними симетричними та несиметричними, з голчастими, з конічними, з витими.

2) За напрямком сприйняття зовнішньої сили: радіальні, що сприймають переважно радіальну силу, яка діє перпендикулярно до осі обертання підшипника (рис. 1.2, а); радіально-упорні, що сприймають комбіноване навантаження у вигляді одночасно діючих радіальних і осьових сил (рис. 1.2, б); упорно-радіальні, що сприймають в основному осьові сили, і одночасно незначні радіальні сили (рис. 1.2, в); упорні, що сприймають осьові сили (рис. 1.2, г).

3) За габаритними розмірами, що пов'язані з вантажністю, підшипники характеризують розмірними серіями за діаметром та шириною (на рис. 1.3 наведено наближене співвідношення деяких розмірних серій): 1 - надлегка; 2 - особливо легка; 3 - легка; 4 - легка широка; 5 - середня; 6 - середня широка; 7 - важка. З підвищенням габаритних розмірів зростає вантажність, але знижується гранична частота обертання. Найбільше поширення в загальному

машинобудуванні мають легкі та середні вузькі серії підшипників.

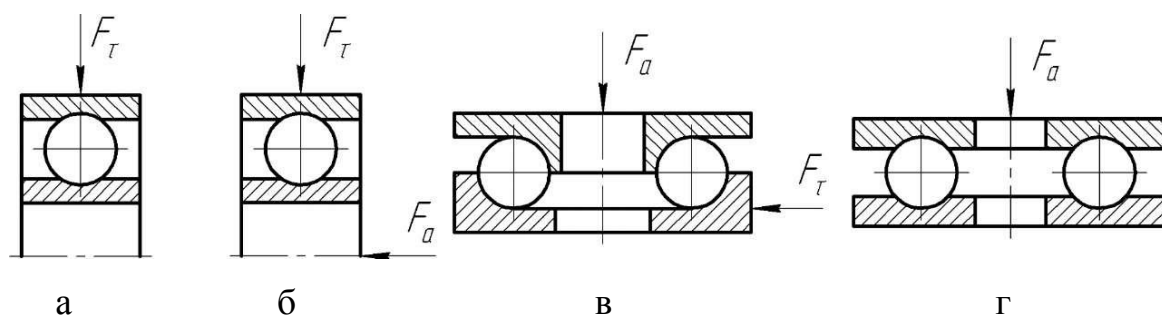


Рисунок 1.2 – Типи кулькових підшипників

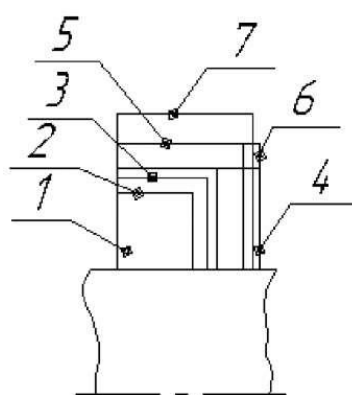


Рисунок 1.3 – Порівняльні розміри підшипників різних серій

4) За основними конструктивними ознаками:

- за числом рядів тіл кочення: однорядні (рис. 1.2), дворядні (рис. 1.4), багаторядні несамоустановлювальні та здвоєні самоустановлювальні (рис. 1.5);
- за формою отвору: циліндричний (рис. 1.2, а, б) і конічний (рис. 1.5);
- за наявністю канавок на зовнішніх кільцях (рис. 1.6, а), стопорної шайби (рис. 1.6, б), відсутністю бортів на кільцях (рис. 1.6, г, д).

5) За точністю підшипники розділяють на класи, що позначають цифрами порядку росту точності, як наприклад для кулькових радіальних і радіально-упорних та роликових радіальних, а саме: 8, 7, нормальний, 6, 5, 4, Т, 2*. Точність підшипників кочення в основному характеризується точністю

геометричних розмірів деталей, точністю взаємного розміщення поверхонь деталей і точністю обертання. Зі зростанням класу точності вартість підшипника значно збільшується. Залежно від спеціальних вимог до рівня вібрації, моменту тертя підшипники розділяють на категорії А, В, С. Точність виготовлення підшипника визначає його функціональні можливості і ресурс.

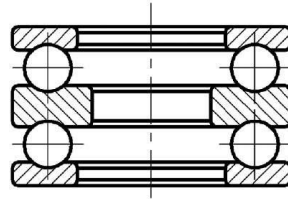


Рисунок 1.4 – Дворядний упорний кульковий підшипник

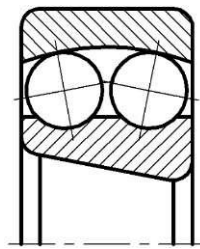


Рисунок 1.5 – Дворядний сферичний кульковий підшипник

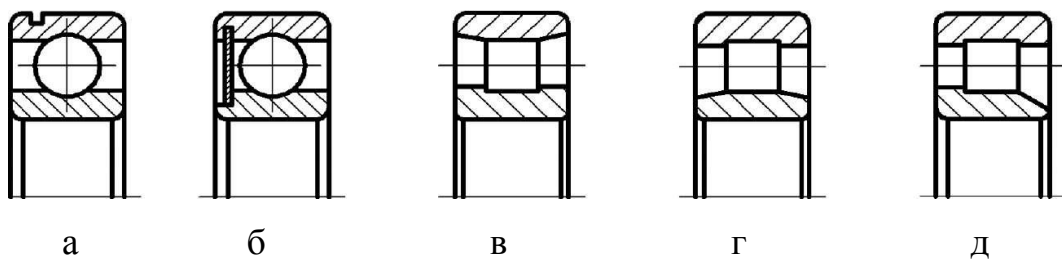


Рисунок 1.6 – Конструктивні особливості кілець підшипників

Найбільшого поширення в загальному машинобудуванні набули підшипники нормального класу точності категорії С без спеціальних вимог.

Наведена класифікація не відбиває всього різноманіття конструктивних

різновидів підшипників. Багато з них виконують, наприклад, з різними закріпними втулками, спеціальними ущільненнями й іншими допоміжними деталями. Усе ширше застосовують підшипники типу «сполучених опор», де одне з кілець є деталлю вузла. Окрім класифікації за конструктивними ознаками, підшипники розрізняють за видами пошкоджень, які виникають в експлуатації. Множина конструктивних ознак підшипників кочення визначає тип підшипників.

Найбільше поширення в загальному машинобудуванні одержали наступні типи підшипників кочення: кульковий радіальний однорядний, кульковий радіальний дворядний сферичний, роликовий радіальний з короткими циліндричними роликами, роликовий радіальний дворядний сферичний, роликовий радіальний голчастий, кульковий радіально-упорний, роликовий радіально-упорний конічний, кульковий упорний, роликовий сферичний упорно-радіальний.

Кульковий підшипник радіальний однорядний - найбільш масовий тип підшипників; може сприймати не тільки радіальні, але й осьові сили, що діють в обох напрямках уздовж осі вала і які не перевищують 70 % від невикористаної допустимої радіальної сили. У порівнянні з іншими типами підшипників кочення радіальні однорядні кулькові підшипники працюють з мінімальними втратами на тертя і, отже, допускають найбільшу частоту обертання.

Кульковий підшипник радіальний дворядний сферичний призначений для сприйняття радіальних сил, але може сприймати одночасно і двосторонні осьові сили (до 20 % величини від невикористаної допустимої радіальної). Доріжка кочення на зовнішньому кільці оброблена по сфері, що забезпечує нормальну роботу підшипника навіть при значному перекосі кілець. Підшипники встановлюють на двоопорних валах, що допускають значні прогини під дією зовнішніх сил, а також у вузлах, в яких не забезпечується строга співвісність посадкових місць.

Роликопідшипники радіальні з короткими циліндричними роликами

мають значно більшу (приблизно 70 %) радіальну вантажність у порівнянні з рівногабаритними радіальними кульковими підшипниками, але за швидкісною характеристикою трохи їм поступаються (приблизно 80 %) і значно дорожчі. Підшипники дуже чутливі до перекосів кілець, що викликають концентрацію навантаження на краях роликів, і вимагають точної співвісності посадкових місць (кут перекосу кілець, що допускається, не повинний перевищувати 2'). У зв'язку з цим усе більшого застосування знаходять роликопідшипники з опуклою утворюючою роликів (бомбиновані ролики), що дозволяє підвищити їхню довговічність. Деякі типи роликопідшипників (12000, 42000, 52000, 62000, 92000) можуть сприймати односторонню і двосторонні помірні осьові сили. Допустима величина осрової сили з урахуванням тривалості і характеру дії визначається умовами ковзання торцевих поверхонь роликів відносно бортів кілець.

Роликопідшипники радіальні дворядні сферичні за динамічною вантажністю майже в 2,5 рази перевищують рівногабаритні кулькові підшипники радіальні однорядні сферичні, а за вартістю - в 4,5 рази дорожчі. Ці підшипники можуть одночасно сприймати й осьове навантаження, що діє в обох напрямках і не перевищує 25 % величини невикористаного допустимого радіального навантаження, а також працювати при чисто осьовому навантаженні. Підшипники допускають значний перекоп кілець (приблизно до 2-3°). Їх встановлюють на важконавантажених двоопорних і багатоопорних валах зі значними прогинами, а також у вузлах з незабезпеченою строгою співвісністю посадкових місць.

Роликопідшипники радіальні голчасті мають удвічі більшу радіальну вантажність і підвищену вартість у порівнянні з рівногабаритними радіальними кульковими підшипниками. Через відсутність сепаратора вони мають відносно високі втрати на тертя між голками. Тому гранична частота обертання у підшипників цього типу в 2...3 рази менша, ніж у рівногабаритних радіальних кулькових підшипників. Випускаються

підшипники у двох модифікаціях: із внутрішнім і зовнішнім кільцями, а також без внутрішнього кільця. Голчасті підшипники надзвичайно чутливі до неспіввідності посадкових місць (перекіс кілець недопустимий) і прогинів валів, використовують при обмежених радіальних розмірах.

Кулькові підшипники радіально-упорні призначені для сприйняття спільнодіючих радіальних і однобічних осьових сил. Можуть сприймати чисто осьову силу. Висота одного з бортів зовнішнього чи внутрішнього кільця зменшена майже до рівня бігової доріжки, що дозволяє закладати в підшипник на 45 % більше кульок того ж діаметра, ніж у радіальний кульковий підшипник. Здатність сприймати осьове навантаження визначається величиною кута контакту α . Зі збільшенням кута контакту осьова вантажність зростає внаслідок зменшення радіальної складової. Динамічна вантажність цих підшипників більша, ніж радіальних однорядних кулькових підшипників на 10...20 %, а за вартістю вони вдвічі дорожчі. Підшипники виконують нерознімними (монтаж і демонтаж здійснюють з нагріванням зовнішнього кільця) і рознімними (зі знімним зовнішнім чи внутрішнім кільцем). У останніх профілі доріжок кочення утворені, наприклад, двома дугами зі зміщеними центрами, і кулька торкається кілець у чотирьох точках. Такі підшипники можуть сприймати радіальне, а також двостороннє осьове навантаження, яке не повинне перевищувати 70 % невикористаного допустимого радіального навантаження.

Роликopідшипники радіально-упорні конічні призначені для сприйняття спільнодіючих радіальних і однобічних осьових сил при допустимих швидкостях, утричі менших, ніж у радіальних кулькових підшипників. Допустимий кут перекоосу кілець дуже обмежений і не повинен перевищувати $2'...4'$. За динамічною вантажністю ці підшипники вдвічі перевищують рівногабаритні радіальні кулькові підшипники і всього на 30 % дорожчі. Вказані вище експлуатаційні властивості конічних підшипників обумовили їхнє широке застосування в техніці (друге місце за поширеністю після радіальних кулькових підшипників). Конічні роликopідшипники мають

знімне зовнішнє кільце, що дозволяє робити роздільний монтаж і демонтаж кілець. При монтажі й в експлуатації ці підшипники мають потребу в ретельному регулюванні осьових зазорів: малі і великі зазори небажані, через те що можуть призвести до неприпустимого зростання температури і руйнування деталей. Поряд з основною конструкцією ($\alpha = 10...17^\circ$) промисловість виготовляє підшипники з великим кутом контакту ($\alpha = 25...29^\circ$) для сприйняття особливо великих осьових сил, а також дворядні і чотирирядні ($\alpha = 10...17^\circ$) конічні підшипники. Кут конусності роликів становить $1,5...2^\circ$; конусна поверхня виконується модифікованою (бомбінована), що дозволяє підвищити в $1,5...2$ рази ресурс підшипників.

Кулькові підшипники упорні призначені для сприйняття осьових навантажень, допускають значно меншу (приблизно у $2...3$ рази) частоту обертання порівняно з іншими типами кулькових підшипників, тому що доріжки кочення їх можуть сприймати лише обмежені відцентрові навантаження. На горизонтальних валах ці підшипники працюють гірше, ніж на вертикальних і вимагають точного регулювання і постійного підвантаження кілець пружинами. Однорядні підшипники сприймають однобічні осьові сили, дворядні можуть сприймати осьові сили в обох напрямках.

Підшипники упорно-радіальні роликові сферичні призначені для сприйняття значних осьових сил при одночасній дії радіального навантаження, що не перевищує 15% від невикористаної допустимої осьової сили. Цей підшипник має властивість самовстановлюватися, подібно дворядним сферичним кульковим та роликовим підшипникам і допускає кут перекосу кілець до 3° .

Підшипникові сталі поділяють на дві групи - високовуглецеві об'ємно-гартовані і низьковуглецеві цементовані.

Кільця і тіла кочення підшипників загального застосування виготовляють в основному зі сталі першої групи, а саме, сталі ШХ-15.

Підшипники великих габаритів ($d > 100$ мм) звичайно виготовляють зі сталей підвищеного гартування - ШХ15СГ, ШХ20СГ. Конічні підшипники масового виробництва виготовляють з цементованої сталі марок 15Х, 20Х, 18ХГ, 15Г. Для роботи в умовах високих температур (до 500 С), в агресивних середовищах кільця і тіла кочення виготовляють з жароміцних і корозійностійких сталей. Поліпшення якості застосованого металу досягається за рахунок зниження вмісту шкідливих домішок у металі - виплавою у вакуумних печах, електрошлаковим переплавом. Наприклад, сталь ШХ15-ВД електрошлакового переплаву з наступним вакуумно-дуговим переплавом використовують для відповідальних підшипників, що дозволяє підвищити їхню довговічність у 1,5...2,5 рази.

У технологічний процес виготовлення деталей підшипників кочення входять: обробка тиском, механічна і термічна обробка, комплектувально-складальні і контрольні операції. У крупносерійному і масовому виробництві заготовок кілець усе більш міцні позиції займає штампування на багатопозиційних гарячештампувальних прес-автоматах. У масовому виробництві заготовок кілець конічних підшипників усе ширше застосовується поперечно-гвинтова прокатка. Утворення фасок, галтелей і канавок кілець здійснюють на токарських багатошпиндельних пруткових і патронних автоматах. Термічна обробка кілець може виконуватися нагріванням під гартування в захисній атмосфері, гартуванням у маслі, гартуванням ТВЧ, у вакуумі. Шліфувальні і доводочні операції - найбільш відповідальні в технологічному циклі виготовлення підшипників. Вони визначають основні параметри якості підшипників (точність обертання, довговічність, рівень вібрації) і значною мірою продуктивність усієї технологічної обробки деталей (трудомісткість шліфувально-доводочної обробки становить біля половини загальної трудомісткості виготовлення підшипника). Першу операцію здійснюють прогресивним методом сполученого шліфування декількох поверхонь кілець, що забезпечує задану точність розмірів, взаємне розташування і геометрію поверхонь. На

доводочних операціях зрізається дефектний шар, знижується шорсткість, зменшується до заданих значень хвилястість оброблюваних поверхонь.

Заготовки кульок одержують звичайним холодним висадженням на швидкохідних прес-автоматах. Великі кульки виготовляють напівгарячою і гарячою обробкою тиском. Після штампування заготовки обкатують чавунними дисками (флешинг - процес), видаляють облой, виконують термічну обробку, шліфування і доведення чавунними дисками з абразивною пастою. Заключні операції - це мийка і сушіння кульок, контроль якості поверхні.

Заготовки роликів одержують штампуванням, великі ролики точать із прутка. Шліфування циліндричних і конічних роликів здійснюють безцентровим методом. Ролики всіх конструктивних різновидів сортують за діаметрами і довжиною на розмірні групи.

Сталеві сепаратори виготовляють зі смугового матеріалу за допомогою холодного штампування на багатошпиндельних пресах. Сепаратори з кольорових металів (алюміній, латунь, бронза) виготовляють литтям з наступною механічною обробкою (обточування, фрезерування, прошивання). Перспективний напрямок удосконалення підшипників і їхнього виробництва - застосування полімерних матеріалів замість металевих (сталь, латунь, бронза) у конструкціях сепараторів. Сепаратори з полімерних матеріалів одержують литтям у спеціальні форми, на автоматах без механічної і будь-якої іншої обробки. Виготовлення сепараторів малогабаритних підшипників здійснюється в багатовмісній формі, а великогабаритних - в одномісній. Склополіамідні сепаратори завдяки унікальним пружним, демпфіруючим, антифрикційним, мастилоутримуючим здатностям упевнено витісняють металеві не тільки у виготовленні підшипників загального застосування, але й високошвидкісних, а також у підшипниках важких режимів навантаження. Наприклад, лідер світового підшипникового виробництва фірма SKF, частка якої у продажу підшипників кочення складає понад 20 %, здійснює випуск усіх підшипників загального призначення тільки з полімерними

сепараторами.

У підшипниковій промисловості розроблені засоби автоматизації практично всіх трудомістких складальних операцій. Наприклад, комплектація однорядних радіальних кулькових підшипників здійснюється за різницею діаметрів доріжок кочення зовнішніх і внутрішніх кілець з урахуванням необхідної розмірної групи кульок за допомогою комплектувально-складальних автоматів. На спеціальних автоматах виконують з'єднання напівсепараторів (клепка, зварювання), місечно-консерваційні операції, монтаж у підшипники захисних шайб і настановних кілець, пакування підшипників.

У виробництві підшипників переважає технологічний керуючий контроль. Однак деякі геометричні параметри деталей і зібраних підшипників контролюються стопроцентно. Наприклад, у підшипниках загального призначення контролюється точність розмірів і геометричної форми посадкових отворів, точність обертання підшипників, а також вихідні геометричні параметри - радіальний і осьовий зазори, кут контакту, монтажна висота.

Для спеціальних умов експлуатації, наприклад в опорах шпинделів деяких верстатів, застосовують так звані гібридні підшипники кочення, у яких кільця виготовлені з традиційних марок сталі, а тіла кочення - з кераміки, головним чином нітриду кремнію. Відповідні дослідження ведучих закордонних фірм спрямовані на удосконалювання технологічного процесу виробництва керамічних матеріалів і тіл кочення з них, на підвищення якості цієї продукції і визначення області ефективного використання керамічних підшипників.

Основними показниками якості підшипників кочення загального призначення є: довговічність і надійність; точність обертання і точність монтажних поверхонь; віброакустичні характеристики. Найбільша кількість підшипників кочення загального машинобудування виходить з ладу в процесі експлуатації через контактну втому матеріалу кілець і тіл кочення:

з'являються ознаки руйнування поверхневих шарів металу деталей і йде процес власне руйнування. Швидкість поширення втомної тріщини залежить від багатьох факторів: міцнісних і пластичних властивостей матеріалу, металургійної чистоти, якості робочих поверхонь, величини залишкових напруг, якості мастильного матеріалу і т.д. Сумарний вплив цих факторів на довговічність виявляється випробуванням на контактну витривалість. Ресурсні дослідження на довговічність проводять відповідно до ГОСТ 520-89.

Досліджують підшипників на спеціальних машинах - стендах. Можуть бути конструкторські (на відповідність підшипника технічному завданню), ресурсні (на довговічність при режимах, що передбачені технічними умовами чи спеціальною програмою), типові (перевірка працездатності підшипників в експлуатаційних умовах), контрольні (перевірка якості випущеної продукції на відповідність технічній документації), порівняльні, приймально-здавальні, випробування на стійкість при перевантаженнях і вібрації, на гучність, кліматичні і температурні, вакуумні.

Стендові випробування - основний вид досліджень працездатності підшипників кочення - є завершальним етапом у їхньому виробництві.

Працюючий підшипник навіть з ідеальною геометричною формою його деталей завжди є джерелом вібрації, що пов'язано з періодичною зміною положення тіл кочення щодо лінії дії радіального навантаження. У реальному підшипнику вібрації виникають через дисбаланс вала, недосконалості форм деталей, перекіс внутрішнього кільця щодо зовнішнього, недостатню чистоту мастильного матеріалу, похибок монтажу вузла, особливості експлуатації та з інших причин. Причини виникнення вібрацій підшипників пов'язані також з технологією виготовлення.

Питання виявлення і визначення параметрів дефектів, що утворилися в експлуатації (знос робочих поверхонь, ум'ятини, вибої, тріщини, вищербини, надирі і т.д.) підшипників за результатами аналізу їхньої власної вібрації вирішують за допомогою методів віброакустичної діагностики.

Віброакустична діагностика належить до методів неруйнівного контролю, при яких підшипники не піддаються демонтажу.

Термін служби механічного устаткування багато в чому визначається якістю встановлених підшипників кочення. Зниження якості нових підшипників, широке розповсюдження контрафактної продукції, проведення тендерних закупівель підшипників за мінімальними цінами, поява відновлених підшипників на ринку - все це вимагає організації вхідного контролю підшипників кочення на промислових підприємствах. При цьому функції вхідного контролю не можуть обмежуватися аналізом документів на продукцію. Потрібен комплексний аналіз якості продукції, що поставляється.

Для цієї мети в даний час найбільшого поширення набули стенди вхідного контролю підшипників кочення, що дозволяють виконати відбраковування неякісних виробів до операцій збирання підшипникових вузлів механічного устаткування [1-16]. Це дає змогу виключити позапланові простої технологічного устаткування, аварійні ситуації та збільшити міжремонтний період устаткування.

Вхідний контроль підшипників кочення повинен включати такі методи.

1. Візуальний контроль передбачає зовнішній огляд і перевірку маркування підшипника. Зовнішній огляд підшипника проводять при освітленості не менше 1000 лк. Не допускаються до збирання і подальшого контролю підшипники, які мають корозію на робочих і монтажних поверхнях і тілах кочення, тріщини, забоїни та інші механічні пошкодження, надмірне провисання сепаратора, деформований сепаратор, а також сепаратори з дефектною клепкою і зварюванням. Наприклад, в результаті зовнішнього огляду дворядного роликового підшипника з посадковим діаметром 450 мм зафіксовані раковини на бігових доріжках (рис. 1.7), що стало підставою для відмови у прийманні підшипника.

Перевірка маркування підшипника полягає у контролі відповідності клейм (цифр і букв) на кільцях, що містять в собі умовне позначення підшипника, а також позначення класу точності, товарний знак заводу-

виготовлювача, року виготовлення, радіального зазору, додаткових позначень підшипників згідно державних стандартів і відомчих нормалей.



Рисунок 1.7 - Раковини на біговій доріжці зовнішнього кільця дворядного роликового підшипника

Контроль легкості обертання і шумів підшипників малих і середніх розмірів перевіряється обертанням від руки одного з кілець при нерухомому іншому кільці в горизонтальній або вертикальній площині з періодичним обертанням іншого кільця. При цьому підшипники повинні обертатися плавно, без заїдань і гальмування. Перевіряється легкість обертання встановленого підшипника, утримуючи підшипник за внутрішнє кільце і обертаючи зовнішнє - іншою рукою, промивши підшипник попередньо в теплом маслі. Справний підшипник обертається легко, без місцевих пригальмовувань і заїдань, з глухим шиплячим звуком. Підшипник, що видає різкий металевий звук або обертається з гальмуванням зовнішньої обойми, слід забракувати.

Оглядом перевіряють обертання кілець встановлених підшипників, яке має бути рівним з повільною зупинкою без стукотів, ривків і заїдань. Ривки вказують на наявність в підшипнику сторонніх часток; різке гальмування - на малий радіальний зазор; стуки - на вм'ятини і корозійні раковини на тілах і доріжках кочення або на великі зазори в гніздах сепараторів. У навантаженої

зоні всі тіла кочення повинні обертатися, прослизання тіл кочення щодо бігових доріжок вказує на значний знос підшипника.

Контроль габаритних розмірів підшипника проводиться спеціальним або універсальним вимірювальним інструментом. Діаметр отвору внутрішнього кільця підшипника вимірюється індикаторним нутроміром. Зовнішній діаметр зовнішнього кільця підшипника вимірюється індикаторним мікрометром. Ширина кілець також вимірюється мікрометром.

Допустимі відхилення розмірів внутрішнього і зовнішнього діаметрів, ширини кілець підшипників наведені у відповідних стандартах. Діаметри кілець вимірюються в 2-х місцях по ширині кілець і в двох-трьох місцях по колу. Габаритні розміри підшипників з діаметром зовнішнього кільця понад 200 мм слід вимірювати після установки підшипників в горизонтальне положення.

Контроль радіальних зазорів в підшипниках проводиться за наступною схемою. Внутрішнє кільце підшипника закріплюється нерухомо, до зовнішнього кільця підшипника підводиться ніжка індикатора переміщення часового типу, який закріплений на штативі. Переміщуючи зовнішнє кільце в напрямку ніжки індикатора і назад, визначають радіальний зазор по крайніх відхиленнях стрілки. Рекомендується застосовувати індикатор з ціною ділення шкали 0,002мм. Радіальний зазор вимірюється в трьох місцях при повороті зовнішнього кільця підшипника при кожному вимірі на 120°; за остаточне значення радіального зазору приймається середньоарифметичне значення трьох вимірів. Рекомендовані радіальні зазори наведені в стандарті [1]. На рис. 1.8 представлено пристрій [2], призначений для вимірювання внутрішнього радіального зазору підшипників кочення відповідно до методу "А" стандарту [3].

Пристрій містить сталеву підставку, на якій закріплюється підшипник, що перевіряється за допомогою фіксуючої втулки. Радіальний зазор вимірюється за допомогою індикатора часового типу, що розташований на рухомому утримувачі. При вимірюванні наконечник індикатора підводиться

до зовнішньої поверхні зовнішнього кільця підшипника. Зрушуючи зовнішню обойму підшипника в напрямку осі індикатора в прямому і зворотному напрямку, визначають максимальні і мінімальні показники. Радіальний зазор визначається як різниця між максимальним і мінімальним показниками індикатора. Вимірювання проводиться кілька разів на різних кутових положеннях підшипника.



Рисунок 1.8 – Пристрій для вимірювання радіального зазору підшипників кочення

Технічні характеристики пристрою:

- внутрішній і зовнішній діаметри підшипників, відповідно: 35 - 150 і 55 - 320 мм;
- ширина підшипників: 10 - 106 мм;
- габаритні розміри - 450×330×100 мм;
- маса - не більше 14 кг.

Радіальне зусилля не нормується. Додатково є можливість перевірити плавність обертання кілець підшипника.

Контроль вібраційних параметрів підшипників виконують на діагностичному стенді. Конструкція стенда повинна дозволяти виконати вище перелічені методи контролю. Конструкція нижче наведених стендів дозволяє реалізувати один або кілька методів контролю. Стенд вхідного контролю підшипників СВК-04 (рис. 1.9) призначений для виявлення

дефектів підшипників перед їх установкою при ремонті промислового устаткування [4]. Робота стенду заснована на виділенні високочастотної вібрації і вимірюванні глибини амплітудної модуляції цієї складової.

Підшипник встановлюється на вал стенда і фіксується за допомогою упорів і гайки. Притисною планкою фіксується зовнішня обойма підшипника. Магнітний датчик встановлюється на зовнішню обойму підшипника, включається стенд і через 5 секунд результат відображається на стрілочному індикаторі вимірювального блоку. Вимірювальний блок стенду за допомогою вбудованого стетоскопа дозволяє підтвердити результати контролю прослуховуванням шумів підшипника. За результатами контролю підшипники сортуються на категорії якості, які рекомендовані до застосування на високошвидкісному, середньошвидкісному і устаткуванні з малою швидкістю обертання або не придатні до застосування.

Технічні характеристики стенду:

- внутрішній діаметр підшипників: 20 - 150 мм;
- частота обертання: 50 - 5000 об/хв.;
- габаритні розміри - 500×300×300 мм;
- маса - 20 кг.



Рисунок 1.9 – Загальний вид стенда СВК-04

Стенд перевірки підшипників "ПРОТОН-СПП" (рис. 1.10) призначений для оцінки технічного стану підшипників кочення. Проектування стенду ґрунтувалося на методиці виконання вимірювання вібрації підшипників кочення з циліндровими отвором. Ця методика затверджена Всеросійським науково-дослідним інститутом підшипникової промисловості ВАТ "ВНПП" (Москва, Росія) 01 липня 2004 року за номером МВВ ВНИПП.002-04 і призначена для обов'язкового використання в підшипникової галузі та на підприємствах-споживачах та інших користувачів підшипників кочення.

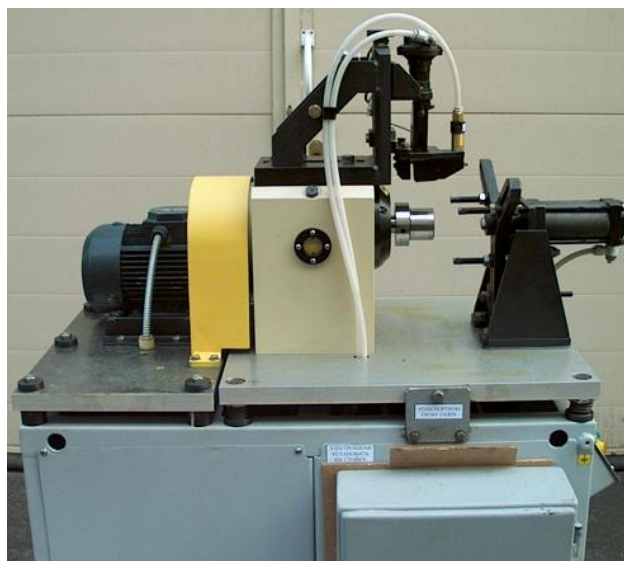


Рисунок 1.10 – Загальний вид стенда "ПРОТОН-СПП"

Стенд дозволяє здійснювати діагностування технічного стану підшипників кочення різної модифікації, для чого здійснюється реєстрації та аналіз вібросигналів з датчиків, які встановлені на контрольованому підшипнику. Програмне забезпечення стенду дозволяє зберігати бази даних по підшипниках кочення.

Технічні характеристики стенду:

- внутрішній діаметр підшипників: 10 - 50 або 40 - 150 мм;
- частота обертання - 1800/900 об/хв.;
- робочий діапазон вимірювання вібрації: 25 - 10000 Гц;

-діапазон вимірювання амплітуди середньоквадратичного значення віброшвидкості: 40 - 110 дБ;

-тиск пневмосистеми: 0,4 - 0,6 МПа;

-потужність приводу - не більше 1,5 кВт;

-габаритні розміри - 1015×950×1473 мм;

-маса - 600 кг.

Вібрація підшипників вимірюється в децибелах в діючих середньоквадратичних значеннях віброшвидкості щодо нульових рівнів швидкості, рівних $3 \cdot 10^{-4}$ і $5 \cdot 10^{-8}$ м/с. Це ускладнює процес підготовки персоналу і вимагає певного часу для закріплення прийомів роботи на стенді.

Час, що необхідний на проведення діагностування одного підшипника, без урахування часу на встановлення та зняття підшипника складає 5 - 60 с.

Стенд вібраційного контролю підшипників СВК-А (рис. 1.11) призначений для контролю радіальних і радіально-упорних підшипників і оцінки їх технічного стану за параметрами вібрації [6].

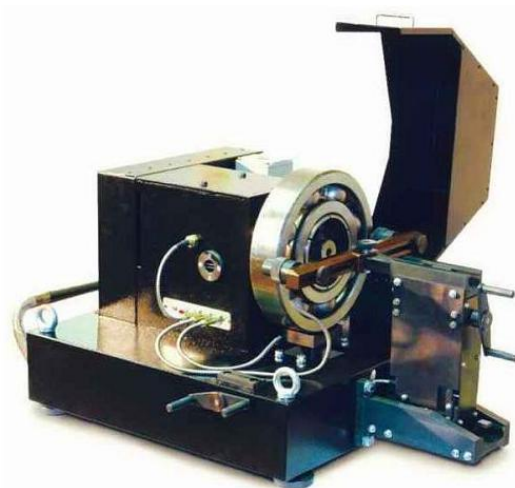


Рисунок 1.11 – Загальний вид стенда СВК-А

Принцип роботи стенду заснований на вимірюванні та аналізі віброчастотних сигналів, отриманих від віброперетворювачів при осьовому і

радіальному навантаженні контрольованого підшипника з подальшою програмною обробкою даних, а також на вимірюванні радіального зазору.

Вимірювання радіальних зазорів проводиться мікрометром при фіксованому зусиллі від нижнього вузла навантаження підшипника. У процесі перевірки підшипник навантажується радіальним і осьовим зусиллями і приводиться в обертання. За підсумками роботи діагностичної програми підшипник відноситься до однієї з трьох категорій якості - придатний без обмежень, придатний для тихохідного обладнання, не придатний до використання.

У програмному забезпеченні станду реалізовано чотири методи діагностики підшипників. Оцінка рівнів вібрації у смугах частот і оцінка фактичного радіального зазору забезпечують контроль підшипників відповідно до вимог нормативних документів. Оцінка ексцесу сигналу віброприскорення та аналіз спектра сигналу віброприскорення є рекомендаційними методами, і дозволяють отримати більш повну інформацію щодо стану підшипників. Застосування даних методів дозволяє контролювати стан всіх елементів підшипника (внутрішньої і зовнішньої обойми, тіл кочення, сепаратора), а саме: знос робочих поверхонь, наявність сколів, раковин і тріщин на обоймах та тілах кочення. Система має розвинену базу даних стосовно вітчизняних і зарубіжних підшипників (більше 8000 типів) з можливістю подальшого поповнення.

СВК-А є універсальним станком, який пристосований для швидкого встановлення і знімання підшипників за допомогою розрізних цанг. Для кожного типорозміру підшипника (посадкового діаметра) використовується окрема цанга.

Технічні характеристики станду:

- внутрішній і зовнішній діаметри підшипників, відповідно: 35 - 150 (20 - 180) і 42 - 320 мм;
- ширина підшипників: 7 - 106 мм;
- частота обертання - 1800/900 об/хв;

- робочий діапазон вимірювання вібрації: 5 - 5000 Гц;
- діапазон вимірювання амплітуди середньоквадратичного значення віброшвидкості: 66 - 110 дБ;
- значення радіальної і осьової сили, яка докладається до підшипника: 0...2000 Н;
- потужність приводу - не більше 1,6 кВт;
- габаритні розміри - 830×620×560 мм, шафи управління - 300×444×240 мм;
- маса - не більше 150 кг;
- маса комплекту цанг і приладдя - не більше 50 кг.

Час проведення діагностики одного підшипника без урахування часу на установку, знімання і прогрів підшипника на стенді складає 2 - 10 хвилин.

Максимальна комплектація стенду СВК-А являє собою лабораторію для діагностування підшипників, яка включає столи для промивки, упаковки, дефектації та консервації підшипників. Стенд вхідного контролю підшипників кочення СП-180 (рис. 1.12) призначений для контролю віброакустичних характеристик і діагностування підшипників кочення при заданих навантаженнях і частотах обертання [7]. Стенд може використовуватися на підприємствах-виробниках підшипників для вихідного контролю і на підприємствах-споживачах підшипників для вхідного контролю.

Стенд СП-180 складається з приводної установки і вимірювально-керуючого модуля. Приводна установка в автоматичному режимі дозволяє забезпечити затиск, центрування, обертання, створення осьового і радіального навантаження на контрольований підшипник. Вимірювально-керуючий модуль управляє приводом обертання, навантажувальними пристроями, проводить вимірювання та аналіз вібрації, і дає якісну і кількісну оцінку технічного стану підшипників відповідно до вимог нормативних документів споживача чи виробника.



Рисунок 1.12 – Загальний вид станда СП-180

Технічні характеристики станду:

- внутрішній і зовнішній діаметри підшипників, відповідно: 30 - 180 і 40 - 420 мм;
- ширина підшипників: 10 - 125 мм;
- робочий діапазон вимірювання вібрації: 5 - 10000 Гц;
- значення радіальної і осьової сили, що докладається до підшипника: 25 - 2800 Н;
- тиск пневмосистеми: 0,5 - 0,9 МПа;
- зусилля притиснення датчика вібрації - 25 Н;
- потужність приводу - 1,5 кВт;
- габаритні розміри - 1360×690×1720 мм;
- маса - 400 кг.

Середній розрахунковий час діагностування одного підшипника без обліку підготовчих операцій становить від 0,5 до 2 хв. в залежності від його розмірів і маси.

Система вібродіагностики підшипників КОМПАКС®-РПП є модифікацією системи комп'ютерного моніторингу КОМПАКС® і призначена для оцінки технічного стану підшипників кочення і виявлення дефектів, що впливають на їх ресурс [10]. Робота системи заснована на вимірюванні поточних значень параметрів вібрації (віброприскорення та віброшвидкості) підшипника. Стан підшипника оцінюється в 4-х частотних діапазонах за результатами обробки сигналів датчика вібрації і відображається на моніторі за допомогою кольорових піктограм і цифрових значень параметрів вібрації. В системі реалізовані вимоги стандартів [3, 9] з контролю вібрації підшипників кочення.

Склад системи КОМПАКС®-РПП (рис. 1.13):

- діагностична станція на базі промислового контролера зі схемою автоматичного керування приводом системи;

- програмне забезпечення КОМПАКС®-РПП, що забезпечує автоматичну вібродіагностику підшипників, архівування і роздруківку результатів;

- привод для обкатки підшипників:

- а) 1602 - для підшипників з внутрішнім діаметром 40 - 120 мм, зовнішнім діаметром - до 310 мм, комплектується 16 оправками;

- б) 1607 - для підшипників з внутрішнім діаметром 130 - 300 мм, зовнішнім діаметром - до 500 мм, комплектується 14 оправками;

- в) 1608 - для підшипників з внутрішнім діаметром 7 - 35 мм, зовнішнім діаметром - не більше 100 мм, комплектується 11 оправками;

- іскромаркер, індикатор намагніченості;

- додатково поставляється комплексна ділянка вхідного контролю підшипників.



Рисунок 1.13 – Загальний вид і склад системи КОМПАКС®-РПП:
 а – діагностична станція; б – привод 1602; в – привод 1608; д – привод 1607;
 е – привод 1607 з підшипником, без кожуха

Технічні характеристики системи:

- робочий діапазон частот вимірювання параметрів віброшвидкості: 22 - 11200, 50 - 300, 300 - 1800 і 1800 - 10000 Гц;
- максимальний час вимірювання по каналу - не більше 1 с;
- час встановлення робочого режиму - не більше 1 хв.;
- максимальна довжина кабелю від датчика до виносного модуля - 2 м, від виносного модуля до діагностичної станції - 50 м.

Вбудована автоматична експертна система діагностування дефектів підшипників включає також можливості аналізу вібросигналів за допомогою швидкого перетворення Фур'є, цифрової фільтрації і виділення огибаючої,

печатку протоколу випробувань після закінчення перевірки підшипника і архівування результатів.

Ділянка вхідного контролю підшипників являє собою комплекс обладнання, що забезпечує повний технологічний цикл підготовки, діагностики та консервації підшипників кочення, які проходять віброконтроль за допомогою системи КОМПАКС®-РПП. У складі ділянки передбачені технічні засоби, що дозволяють забезпечувати автоматичне підтримування заданих температур на кожній операції. Деталі, що контактують з робочими рідинами, виконані з високолегованих нержавіючих сталей і забезпечують тривалу, безвідмовну експлуатацію. Обладнання ділянки дозволяє якісно проводити наступні операції:

- промивання і сушіння підшипників;
- детальний візуальний контроль і мікрообмірювання;
- перевірка залишкової намагніченості і розмагнічування;
- вібродіагностика стану підшипників;
- консервація і пакування перевірених підшипників.

Економічний ефект від впровадження стендів вхідного контролю підшипників кочення в ремонтних підрозділах промислових підприємств визначається наступними факторами:

- збільшення міжремонтного періоду при експлуатації механічного устаткування на 10...12 %;
- збільшення терміну служби підшипників в 2...3 рази, що призводить до скорочення витрат на обслуговування на 5...7 %;
- виключення позапланових зупинок устаткування для заміни зношених або зруйнованих підшипників.

У роботі [10] при організації ділянки вхідного контролю підшипників кочення та виконання вибіркового контролю підшипників на одному з підприємств за рік перевірено 670 підшипників. Кількість відбракованих підшипників склало 49 штук (7,3 %) з наступних причин.

1. Розмір (діаметр) внутрішнього кільця у великому "від'ємному" допуску. Цанга не входить в посадочний отвір - 13 штук
2. Радіальний зазор не відповідає нормативному (менше або більше в кілька разів) - 12 штук.
3. Тіла кочення в підшипнику заклинені (між сепаратором і тілами кочення немає зазору) - 14 штук.
4. Перевищення нормативного значення рівня віброприскорення (ексцесу) - 6 штук.
5. Перевищення нормативного значення рівня віброприскорення (ексцесу), що супроводжується підвищеним шумом і гуркотом підшипника - 4 штук.

Незважаючи на незначну частину підшипників які, вибракувані за параметрами вібрації, використання стенду дозволило раціонально використовувати можливості підшипників. Так, кількість підшипників, що рекомендовані для використання при частоті обертання до 1000 об/хв. (перевищення нормативного значення рівня віброприскорення (ексцесу)), склало 329 штук (49,1 %). Це дозволило стабілізувати роботу механічного устаткування підприємства, виключивши раптові відмови. Наявність стенда вхідного контролю значно скорочує кількість бракованих підшипників, які закупаються підприємством, що також знижує витрати підприємства.

2 МЕТОД РЕГУЛЯРИЗАЦІЇ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ДОРІЖОК КОЧЕННЯ КІЛЕЦЬ КУЛЬКОВИХ ПІДШИПНИКІВ НА КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ МАШИНАХ

2.1 Необумовлені задачі

Рішення низки математичних задач характеризуються низькою стійкістю навіть до незначної зміни вхідних даних. Це, власне, і є погано обумовлені задачі. У погано обумовлених задачах незначна зміна вхідних даних супроводжується суттєвою зміною рішення. В інженерній практиці такі задачі можуть виникати при виконанні вимірювань геометричних розмірів об'єктів з використанням координатно-вимірювальних машин [17], коли дані, отримані в результаті вимірювань з певною похибкою, піддаються подальшій математичній обробці.

У роботі [18] доведено, що при вимірюванні на координатно-вимірювальних машинах радіусів дуг на криволінійних поверхнях, а також при оцінці геометричної форми цих поверхонь можуть виникати неприпустимі похибки. Така ситуація, наприклад, може виникнути, коли на координатно-вимірювальній машині здійснюється вимірювання доріжок кочення на кільцях кулькових підшипників. Залежно від роздільної здатності координатно-вимірювальної машини, помилка у визначенні розміру або профілю бігової доріжки, може скласти 3 - 50 мкм, а в деяких випадках і більше [18]. Надмірно велика похибка вимірювань обумовлена недосконалістю алгоритмів обробки даних, що знімаються з вимірювальної головки.

2.2 Погана обумовленість задач геометричних вимірювань на невеликих областях при використанні координатно-вимірювальних машин

При використанні координатно-вимірювальних машин для вимірювання розмірів та оцінки геометричної форми об'єктів, що мають вигляд невеликих

сегментів, стандартні методики обробки результатів вимірювань дають суттєві (а іноді і неприпустимі) помилки.

Програмне забезпечення координатно-вимірювальних машин налаштоване таким чином, що результати вимірювань обробляються за методом найменших квадратів. При цьому параметр об'єкта (радіус, кут нахилу тощо) визначається таким чином, щоб забезпечити мінімальну суму квадратів відстаней від точок, що вимірюються, до відповідних точок, що знаходяться на поверхні, заданій математичним виразом:

$$F(a) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \rightarrow \min \quad (2.1)$$

де $a = a_0, a_1, \dots a_i, \dots a_k$ – параметри об'єкта, які необхідно знайти;

$\delta_i = |P_i| - |P'_i|$ – відхилення точок, що вимірюються, від відповідних точок, що знаходяться на поверхні, заданій математичним виразом;

P_i – точка, що вимірюється;

$|P'_i|$ – відповідна точка, що знаходиться на поверхні, заданій математичним виразом.

Таким чином, задля того, щоб знайти той чи інший параметр об'єкта, необхідно мінімізувати функцію (2.1) або вирішити систему лінійних алгебраїчних рівнянь (за умови, якщо це можливо). Незалежно від способу, за яким знаходиться мінімум функції (2.1), усі обчислення проводяться у матричній формі, зокрема, з використанням матриць, що містять координати точок, що вимірюються на об'єкті. Уразі вимірювання невеликої області на об'єкті обумовленість матриці погіршується за рахунок того, що мінімум функції (2.1) “розмивається”: точка мінімуму потрапляє на своєрідне «плато» з невеликим градієнтом. За таких обставин, програма, що здійснює мінімізацію функції (2.1) перестав розрізняти зміну значення параметра, що вимірюється. Таким чином, рішенням стає випадкова точка, що призводить

до суттєвих похибок при визначенні параметру, що вимірюється. При визначенні параметрів об'єкта шляхом рішення системи лінійних рівнянь виникає така ж сама ситуація (рис. 2.1).

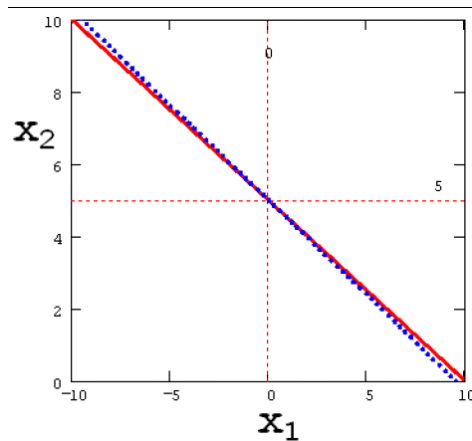


Рисунок 2.1 – Приклад погано обумовленої системи лінійних алгебраїчних рівнянь

Як видно з наведених графіків, дві прямі є майже паралельними і практично повністю накладаються одна на одну. Якщо така ситуація виникає при виконанні вимірювань на координатно-вимірювальній машині, невелике відхилення датчика вимірювальної головки призведе до значної похибки параметру, що вимірюється [17-21].

2.3 Погана обумовленість задачі вимірювання бігових доріжок підшипників кочення

У даному параграфі наведено результати вимірювального експерименту, які доводять, що велика похибка у визначенні геометричних параметрів бігових доріжок підшипників на координатно-вимірювальній машині безпосередньо пов'язана з тим, що ця задача є погано обумовленою. В експерименті використовувалась координатно-вимірювальна машина DKM 1-300DP. Вимірюванням піддавалась тороїдальна поверхня бігової доріжки внутрішнього

кільця підшипника № 6-50306. Технічні характеристики координатно-виміральної машини DKM 1-300DP:

- Максимальне переміщення по вісі X: 320 мм.
- Максимальне переміщення по вісі Y: 220 мм,
- Максимальне переміщення по вісі Z: 150 мм,
- Похибка вимірювань $\pm(3 + L/200)$ мкм.

Для проведення вимірювань використовувалось програме забезпечення ГеоАрм. Вимірювання поверхні бігової доріжки здійснювалось у чотирьох перетинах. У кожному з перетинів вимірювалось п'ять точок.

Результати вимірювань наведено в табл. 2.1. У результаті вимірювань були отримані наступні параметри тора (поверхні, яку представляє собою бігова доріжка): D - діаметр тора, R - радіусів жолоба бігової доріжки, Eform - відхилення форми. Після цього було розраховано різницю Δ між найбільшим та найменшим значенням діаметру та радіусу:

$$\Delta D = D_{\text{макс}} - D_{\text{мін}}, \quad (2.2)$$

$$\Delta R = R_{\text{макс}} - R_{\text{мін}}.$$

З даних, наведених в табл. 2.1, витікає, що відносно невеликий розкид відхилення форми кільця від тороїдальної форми (ΔE_{form}) відповідає дуже великому розкиду радіусу жолоба бігової доріжки. Це вочевидь свідчить про те, що задача вимірювання бігових доріжок підшипників на координатно-вимірвальній машині є погано обумовленою задачею.

Задля підтвердження такого припущення було проведено додатковий експеримент, мета якого, також само як і попереднього експерименту, полягала в тому, щоб виміряти бігові доріжки підшипників кочення на координатно-вимірвальній машині. Але у цьому експерименті були використані лише розрахункові дані (проводився імітаційний експеримент),

що виключало вплив похибок, які виникають при роботі вимірювальних пристроїв.

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань бігової дорожки кільця підшипника

D, мм	R, мм	Eform, мм
26,191	5,196	0,0045
26,198	5,201	0,0035
26,197	5,200	0,0035
26,199	5,202	0,0035
26,202	5,205	0,0035
26,201	5,204	0,0035
26,197	5,200	0,0045
$\Delta D = 0,010$	$\Delta R = 0,010$	$\Delta E_{\text{form}} = 0,001$

Задля того, щоб провести імітаційний експеримент, попередньо згенерували тороїдальну поверхню. Згенерована поверхня має імітувати жолоб бігової доріжки, розташованої на кільці підшипника. На тороїдальній поверхні було визначено координати випадково обраних точок. Потім ці точно знайдені координати було «зіпсовано» за допомогою випадкових величин ξ_i , розподілених по нормальному закону. Середньоквадратичне відхилення випадкових величин, що маскували точні координати точок, складало $s = 0,003$ мм. Фактично цим прийомом було змодельовано появу випадкових похибок під час вимірювань. За цим алгоритмом було сформовано сім наборів даних. На основі згенерованого масиву даних за допомогою програмного забезпечення ГеоАрм було побудовано тороїдальні поверхні. Параметри цих поверхонь наведено в табл. 2.2.

Слід відзначити, що розкид відхилень реальної форми бігової доріжки від тороїдальної форми та розкид радіусів тороїдальної поверхні співставні з

тими значеннями, що були отримані під час проведення реальних вимірювань (табл. 2.2). Таким чином, маємо ще один доказ того, що задача вимірювання бігових доріжок на кільцях підшипників з використанням координатно-вимірювальних машин є погано обумовленою задачею.

Таблиця 2.2 - Результати вимірювання математичної моделі тора (розмір сегмента, на якому здійснюються вимірювання, дорівнює 90 градусів)

D, мм	R, мм	Eform, мм
26,198	5,202	0,0031
26,199	5,201	0,0041
26,200	5,200	0,0041
26,202	5,199	0,0031
26,198	5,202	0,0041
26,193	5,204	0,0041
26,202	5,199	0,0041
$\Delta D=0,009$	$\Delta R=0,007$	$\Delta E_{\text{form}}=0,001$

Логічно припустити, що надто великі похибки при визначенні параметрів поверхонь (порівняно із похибками координат точок, що вимірюються) можуть виникати лише у разі вимірювання невеликого сегмента поверхні. Із збільшенням сегмента, що вимірюється, похибка у визначенні параметрів цього сегмента має зменшуватись. При цьому похибка визначення геометричних розмірів поверхні буде наближатись до похибки визначення відхилення форми поверхні від тороїдальної форми. Задля того, щоб перевірити це припущення, було виконано декілька обчислювальних експериментів.

Перед проведенням експериментів було згенеровано тороїдальні поверхні з секторами кіл, що утворюють ці поверхні, 70, 100, 110 та 180

градусів. На кожній з тороїдальних поверхонь було визначено координати випадково обраних точок. Потім ці точно знайдені координати було «зіпсовано» за допомогою випадкових величин ξ_i , розподілених по нормальному закону. Середньоквадратичне відхилення випадкових величин, що маскували точні координати точок, складало $s = 0,003$ мм. Таким чином, отримали чотири масиви, що містили координати точок (7 різних варіантів для кожного масиву). За “зіпсованими” координатами точок розраховували параметри тороїдальних поверхонь. Розрахункові параметри тороїдальної поверхні з сегментом, що дорівнює 180 градусів, вказано в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати вимірювання параметрів тороїдальної поверхні з сегментом, що дорівнює 180°

D, мм	R, мм	Eform, мм
26,201	5,200	0,0031
26,200	5,201	0,0041
26,200	5,201	0,0041
26,200	5,201	0,0031
26,200	5,201	0,0041
26,199	5,202	0,0041
26,200	5,201	0,004
$\Delta D = 0,002$	$\Delta R = 0,002$	$\Delta E_{\text{form}} = 0,002$

З аналізу даних, наведених в табл. 2.3, витікає, що при збільшенні вимірюваного сегмента тороїдальної поверхні відбувається зменшення похибки визначення геометричних параметрів поверхні, причому похибка визначення цих параметрів наближається до похибки визначення відхилення форми поверхні від тороїдальної форми (величина ΔE_{form} стає співставною з величинами ΔD і ΔR).

Результати комплексної обробки координат усіх точок наведені на рис. 2.2. По вісі абсцис відкладено величину сегменту, на якому здійснюється вимірювання тороїдальної поверхні. По вісі ординат відкладено похибку у визначенні радіуса жолоба бігової доріжки. З рис. 2.2 витікає, що при збільшенні сегменту, на якому здійснюється вимірювання тороїдальної поверхні зменшується похибка у визначенні радіуса жолоба бігової доріжки. Причому похибка у визначенні геометричних параметрів поверхні наближається до похибки у визначенні відхилення форми поверхні від тороїдальної форми.

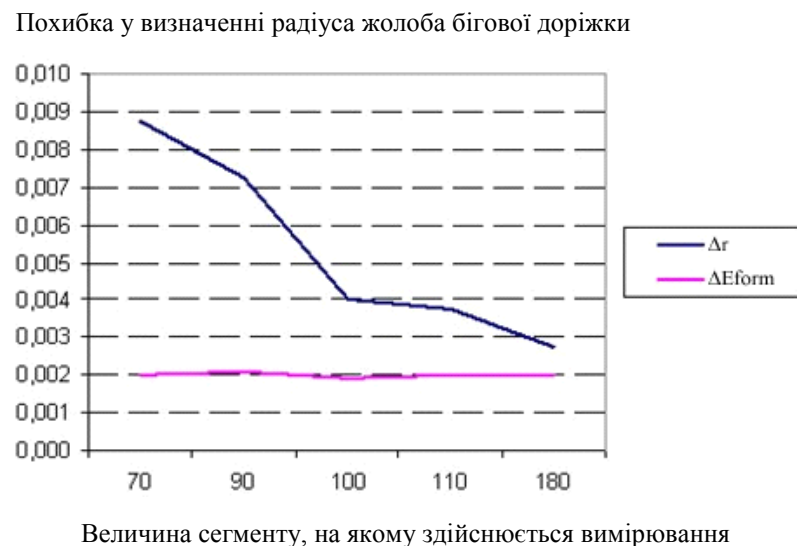


Рисунок 2.2 – Залежність похибки у визначенні радіуса жолоба бігової доріжки від величини сегмента, на якому здійснюється вимірювання

Розрахунок геометричних параметрів тороїдальної поверхні в програмі ГеоАрм передбачає вирішення задачі мінімізації, сутність якої полягає у наступному: геометричні параметри поверхні визначаються із умови мінімуму суми квадратів відхилень точок, що вимірюються, від теоретичної поверхні. Якщо було задано погано обумовлену поверхню, рішенням задачі має бути функція, що має явно виражений мінімум. Задля того, щоб перевірити це припущення, було згенеровано поверхню, що утворена сукупністю усіх можливих варіантів рішення задачі. В рівняння тороїдальної

поверхні підставляли усі можливі значення її геометричних параметрів з невеликим інтервалом, після чого розраховували суму квадратів відхилень.

На рис. 2.3 представлено рішення задачі мінімізації для випадку, коли вимірювання тороїдальної поверхні здійснюється на сегменті, що дорівнює 90 градусам. Рішенням задачі мінімізації є поверхня, що побудована з використанням методу найменших квадратів. Поверхня, що є рішенням задачі, містить «провал» з майже пологим дном. Це означає, що залежно від того, де буде знаходитись початкове наближення при вирішенні задачі мінімізації, кінцеве рішення цієї задачі може опинитись у будь-якому з «провалів».

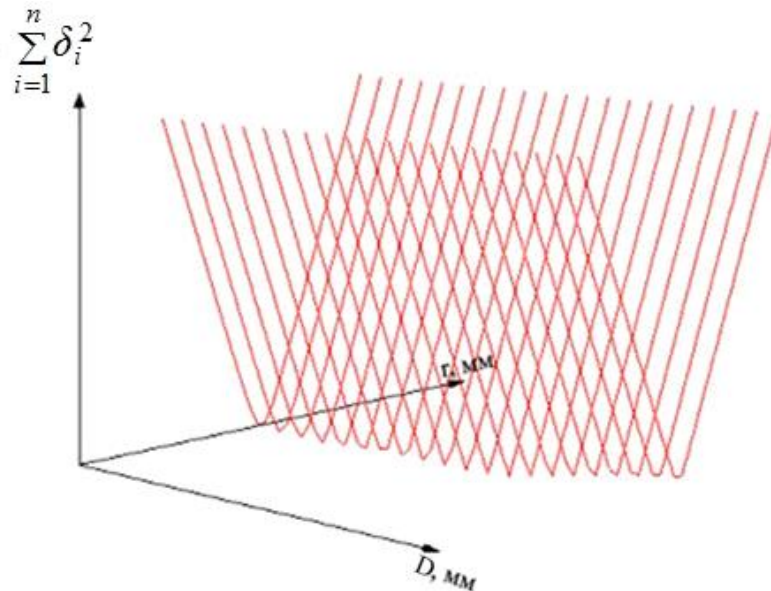


Рисунок 2.3 – Рішення задачі мінімізації з використанням методу найменших квадратів при знаходженні геометричних параметрів тора

Результати експериментів наочно свідчать про те, що задача вимірювання геометричних параметрів бігових доріжок на кільцях підшипників з використанням координатно-вимірювальних машин є погано обумовленою задачею у тих випадках, коли вимірювання здійснюються на невеликих сегментах. Отже, для надійного вимірювання радіуса жолоба

бігової доріжки та її діаметра слід вдосконалити методику обробки результатів вимірювань.

2.4 Використання апіорної інформації для визначення параметрів поверхні

Погана обумовленість задачі вимірювання радіуса жолоба бігової доріжки та її діаметра за допомогою координатно-вимірювальних машин може бути подолана при використанні методу регуляризації. Цей метод було розроблено академіком А.Н. Тихоновим [18]. Сутність методу полягає в тому, що при обробці результатів вимірювань використовується додаткова апіорна інформація, що дозволяє звести погано обумовлену задачу до добре обумовленої. Наприклад, якщо є погано обумовлена система лінійних рівнянь $Ax = b$, коректне рішення цієї системи рівнянь може бути отримане у вигляді наступного функціоналу:

$$\Omega(x_0, \lambda) = |Ax - b|^2. \quad (2.3)$$

де λ – коефіцієнт регуляризації

x_0 – апіорний вектор коректного рішення.

При $\lambda \rightarrow 0$ система лінійних алгебраїчних рівнянь є погано обумовленою. У разі, коли λ приймає великі значення, вихідна погано обумовлена система лінійних алгебраїчних рівнянь трансформується у добре обумовлену систему, рішення якої збігається з x_0 .

Відповідно до задачі знаходження радіуса жолоба бігової доріжки та її діаметра рівняння (2.1) можна представити у наступному вигляді:

$$\Phi(a) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 + \text{reg}(a, w). \quad (2.4)$$

$$\text{reg}(a, w) = w \sum_{i=1}^k (a_i - a_{i(\text{ном})})^2. \quad (2.5)$$

Таким чином, якщо в задачу мінімізації ввести член, котрий задає відхилення параметрів, що вимірюються, від їхніх номінальних значень, можна отримати чітку точку мінімуму в функції мінімізації.

Якщо застосувати метод регуляризації для тороїдальних поверхонь, отримаємо наступне рівняння:

$$\begin{aligned} \Phi(D, R, P_0, V) = F(D, R, P_0, V) + w(D - D_{\text{ном}})^2 + w(R - R_{\text{ном}})^2 + \\ + w(P_0 - P_{0(\text{ном})})^2 + w_v(V - V_{\text{ном}})^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

де $D_{\text{ном}}, R_{\text{ном}}, P_{0(\text{ном})}, V_{\text{ном}}$ – номінальні значення параметрів.

W - коефіцієнт регуляризації для лінійних величин;

w_v - коефіцієнт регуляризації для кутових величин.

2.5 Дослідження впливу поганої обумовленості задачі на визначення параметрів тора

Вираз (2.6) описує функцію мінімізації, що містить апіорну інформацію про усі параметри тора, але це не є необхідним, оскільки радіус жолоба бігової доріжки не може впливати на всі геометричні параметри тороїдальної поверхні. Задля того, щоб перевірити це припущення і задля того, щоб оцінити можливість виконувати вимірювання геометричних параметрів жолоба бігової доріжки кулькових підшипників на координатно-вимірювальних машинах без використання регуляризації, було проведено декілька обчислювальних експериментів, що імітують вимірювання на координатно-вимірювальній машині тороїдальних поверхонь з сегментом, котрий дорівнює 80-90 градусів. Обчислювальні експерименти полягали в наступному: було згенеровано тороїдальну поверхню, котра імітує жолоб бігової доріжки кільця підшипника. На цій тороїдальній поверхні було обрано точки та визначено координати цих

точок. Розташування точок обиралось таким чином, щоб вони знаходились у зонах, доступних для вимірювання на реальних деталях (рис. 2.4).

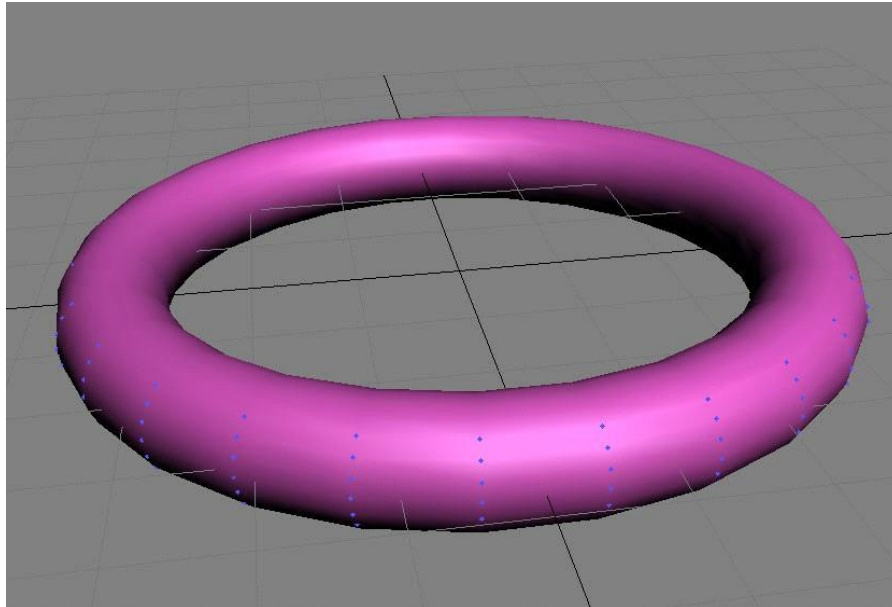


Рисунок 2.4 - Розташування розрахункових точок на поверхні тора

Координати точок були «зіпсовані» випадковими величинами ξ_i з нормальним розподілом. Стандартне відхилення випадкових величин ξ_i складало $s = 0,01$. Таким чином імітувались систематичні похибки вимірювань.

$$\begin{aligned} P'_i &= (X'_i, Y'_i, Z'_i) \\ X'_i &= X_i + \xi_i, Y'_i = Y_i + \xi_i, Z'_i = Z_i + \xi_i \end{aligned} \quad (2.7)$$

При визначенні параметрів тороїдальних поверхонь деталей (наприклад, таких, як жолоб бігової доріжки кілець кулькових підшипників) на координатно-вимірювальній машині слід виконати вимірювання мінімум у трьох перетинах. У кожному перетині необхідно здійснити не менше трьох вимірювань у трьох різних точках. Така мінімальна кількість точок вимірювання обумовлена тим, що початкове наближення для визначення радіусу перетину тора визначається як середній радіус вимірюваних перерізів.

Початкові наближення для визначення інших геометричних параметрів тора визначаються за допомогою окружності, що проходить через центри вимірних перерізів. Такий спосіб вимірювання з використанням мінімальному масиву точок не дозволяє отримати високу точність вимірювань. Отже, доцільно знайти інший спосіб, котрий забезпечує необхідну точність при міняльній трудомісткості вимірювальних операцій. За даними проведених експериментів, задовільну точність можна отримати при вимірюванні тороїдальної поверхні у чотирьох перетинах, причому у кожному перетині необхідно зробити не менше чотирьох вимірювань у різних точках.

Для визначення геометричних параметрів тора (центральної точки, вектора вісі, діаметра і радіуса жолоба бігової доріжки) по координатах вимірних точок скористаємось методом найменших квадратів. Для цього слід знайти мінімум наступної функції:

$$F(D, R, P_0, V) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2, \quad (2.8)$$

де $\sum_{i=1}^n \delta_i^2$ - сума квадратів відхилень n вимірних точок, від побудованої поверхні;

D, R, P_0, V - параметри тора: діаметр, радіус жолоба бігової доріжки, координати центральної точки і вектора вісі тора (рис. 2.5).

Оскільки параметри згенерованої поверхні відомі $(D_{\text{ном}}, R_{\text{ном}})$, є можливість оцінити похибки визначення геометричних параметрів тора, що вимірюється $(D_{\text{изм}}, R_{\text{изм}})$, а похибки визначення положення та просторової орієнтації тора. Отримані значення відхилень геометричних параметрів тора:

$$\begin{aligned} \Delta D &= |D_{\text{изм}} - D_{\text{ном}}| \\ \Delta R &= |R_{\text{изм}} - R_{\text{ном}}| \end{aligned} \quad (2.9)$$

Для того щоб оцінити помилку у визначенні положення тора в просторі, необхідно оцінити відхилення положення його центральної точки.

Значення відхилень положення центральної точки ($P = (X, Y, Z)$):

$$\begin{aligned}\Delta P.x &= |\Delta P.x_{\text{изм}} - \Delta P.x_{\text{ном}}| \\ \Delta P.y &= |\Delta P.y_{\text{изм}} - \Delta P.y_{\text{ном}}| \\ \Delta P.z &= |\Delta P.z_{\text{изм}} - \Delta P.z_{\text{ном}}|\end{aligned}\quad (2.10)$$

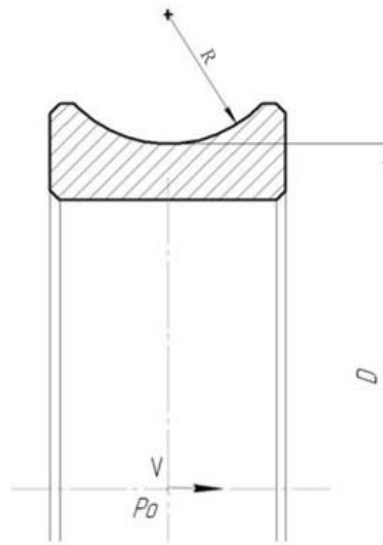


Рисунок 2.5 - Внутрішнє кільце підшипника

Можливість оцінити орієнтацію тора в просторі дає вектор його нормалі. Косинус кута α між двома векторами $V_{\text{изм}}(V_{x_{\text{изм}}}, V_{y_{\text{изм}}}, V_{z_{\text{изм}}})$ та $V_{\text{ном}}(V_{x_{\text{ном}}}, V_{y_{\text{ном}}}, V_{z_{\text{ном}}})$ визначається за формулою:

$$\cos(\alpha) = \frac{V_{x_{\text{изм}}} V_{x_{\text{ном}}} + V_{y_{\text{изм}}} V_{y_{\text{ном}}} + V_{z_{\text{изм}}} V_{z_{\text{ном}}}}{\sqrt{V_{x_{\text{изм}}}^2 + V_{y_{\text{изм}}}^2 + V_{z_{\text{изм}}}^2} \sqrt{V_{x_{\text{ном}}}^2 + V_{y_{\text{ном}}}^2 + V_{z_{\text{ном}}}^2}} \quad (2.11)$$

Знаючи висоту кільця підшипника h (для зовнішнього кільця підшипника 206 $h = 16$ мм), і обчисливши кут α між векторами нормалей виміряного і номінального об'єктів за формулою (2.11), можна оцінити непаралельність вісі тора PL.

$$PL = h\sqrt{2(1 - \cos\alpha)} \quad (2.12)$$

Непаралельність вісі тора PL, що виникає через помилки у визначенні орієнтації об'єкта наведені в табл. 2.4. Задля того, щоб визначити відхилення кожного з параметрів від номінальних значень було проведено сім експериментів.

Таблиця 2.4 - Відхилення значень параметрів вимірюваних торів від їх номінальних значень

№	ΔD , мм	ΔR , мм	PL, мм	ΔP_x , мм	ΔP_y , мм	ΔP_z , мм
1	0,0490	0,0530	0,0011	0,00031	0,00041	0,00077
2	0,0421	0,0466	0,0011	0,00041	0,00031	0,00033
3	0,03353	0,0377	0,0006	0,00022	0,00031	0,00481
4	0,04344	0,0511	0,0012	0,00023	0,00023	0,00063
5	0,02854	0,0301	0,0022	0,00024	0,00023	0,00116
6	0,02714	0,0280	0,0011	0,00025	0,00035	0,00082
7	0,03245	0,0310	0,0008	0,00023	0,00036	0,00126

Дані, наведені в табл. 2.4, дозволяють заключити, що задача вимірювання радіуса окружності та діаметра тороїдальної поверхні є погано обумовленою задачею, оскільки помилки у визначенні радіуса окружності та діаметра тороїдальної поверхні суттєво перевищують помилки вхідних даних ξ_i . Задача по вимірюванню центральної точки і вектора вісі є добре обумовленою задачею, оскільки помилки у визначенні цих геометричних параметрів, котрі виникають через помилки визначення просторової орієнтації тора, знаходяться приблизно на одному рівні із помилками у вхідних даних ξ_i . Це є цілком природнім, якщо врахувати ту обставину, що невеликий за своєю величиною сегмент практично не впливає на визначення центральної точки тора. Це також підтверджується тим, що на практиці при

вимірюванні кілець кулькових підшипників радіус окружності тора відповідає радіусу жолоба бігової доріжки кільця підшипника, який у багатьох випадках вимірюється за допомогою спеціальних вимірювальних пристроїв, налаштованих на номінальний розмір за допомогою еталонних кілець або кінцевих мір довжини.

2.6 Вплив поганої обумовленості на результати вимірювання підшипників різних класів точності

Відповідно до ГОСТ 520-2002 існує декілька класів точності підшипників:

0 – нормальний; 6 – підвищений; 5 – високий; 4 – прецизійний; Т – особливо прецизійний; 2 – надпрецизійний.

Для різних класів точності підшипників характерні різні вимоги до якості поверхні жолобів доріжок кочення, що позначається на похибках, котрі виникають під час виконання вимірювань. З огляду на цю особливість, представляє інтерес взаємозв'язок між величиною помилок у вхідних даних ξ_i , що виникають під час виконання вимірювань, і величиною помилок у визначенні геометричних параметрів тора, таких як діаметр тора ΔD (цей параметр відповідає діаметру бігової доріжки кільця підшипника) і радіус жолоба бігової доріжки ΔR (цей параметр відповідає радіусу жолоба бігової доріжки кільця підшипника).

Для визначення цієї залежності були проведені обчислювальні експерименти. Суть їх полягали в наступному: була згенерована поверхня тора, що імітує жолоб бігової доріжки кільця підшипника. На поверхні цього тора було обрано точки. Потім координати цих точок було «зіпсовано» випадковими величинами ξ_i , що мали нормальний розподіл. Стандартне відхилення випадкових величин ξ_i дорівнювало: $s = 0,03; 0,01; 0,005; 0,003; 0,001$ і 0 . Таким чином здійснювалось імітування процесу вимірювання кілець підшипників різних класів точності. Максимальна величина стандартного відхилення $s = 0,03$ мм була взята для кільця нормального класу точності,

мінімальна величина стандартного відхилення ($s = 0$ мм) була взята як ідеалізований випадок, коли відсутні помилки вимірювань.

Геометричні параметри вимірюваних поверхонь порівнювались з їхніми номінальними значеннями. Результати порівняння ($\Delta P = |P_{\text{изм}} - P_{\text{ном}}|$) наведено в табл. 2.5. Зважаючи на невеликий радіус жолоба бігової доріжки, для порівняння були обрані тільки ті параметри, при визначенні котрих виникають суттєві похибки.

Таблиця 2.5 - Відхилення геометричних параметрів торів від їх номінальних значень

s, мм	ΔD , мм	ΔR , мм
0,031	0,121	0,116
0,011	0,048	0,052
0,004	0,015	0,017
0,002	0,005	0,003
0,001	0,003	0,002
0,000	0,000	0,000

Проаналізувавши дані, наведені в табл. 2.5, можна зробити висновок про те, що поки похибки вимірювань, що виникають із-за якості вимірюваної поверхні і недосконалості вимірювальної техніки, досить малі і не перевищують 5 мкм, похибки у визначенні геометричних параметрів тора (діаметру та радіусу бігової доріжки) є невеликими і співставними з похибками у вхідних даних. Таким чином, у цьому випадку можна не враховувати погану обумовленість задачі. Але в разі, коли похибки вимірювань перевищують 5 мкм, похибки у визначенні геометричних параметрів тора помітно перевищують похибки у вхідних даних, що є свідченням поганої обумовленості задачі і унеможливорює використання

методу найменших квадратів для визначення геометричних параметрів поверхні.

2.7 Похибки у визначенні геометричних параметрів поверхонь при використанні методу регуляризації

З огляду на те, що поганою обумовленістю характеризується вимірювання лише таких геометричних параметрів тора, як його діаметр і радіус жолоба бігової доріжки, в регуляризуючий член слід включити номінальні значення саме цих параметрів:

$$\Phi(D, R, P_0, V, w) = F(D, R, P_0, V) + \text{reg}(D, R, w) \quad (2.13)$$

де $\text{reg}(D, R, w)$ – регуляризуючий член, що містить в собі номінальні значення визначених параметрів і ваговий коефіцієнт;

$D_{\text{nom}}, R_{\text{nom}}$ – номінальні значення діаметра тора і радіусу жолоба бігової доріжки;

w - коефіцієнт регуляризації.

Даний спосіб обробки даних вимірювань дозволяє зменшити помилки у визначенні діаметра і радіуса жолоба бігової доріжки до величин, порівнянних з величинами помилок у вхідних даних. З метою перевірки цього припущення була побудована поверхня, утворена сукупністю всіх можливих варіантів рішення задачі (2.13) (рис. 2.6).

Завдяки цьому можна судити про доцільність використання методу регуляризації для вирішення вимірювальних задач в разі, якщо конструкція деталі дозволяє вимірювати лише невеликий сектор об'єкта.

Слід перевірити, чи не відбувається в процесі мінімізації модифікованого функціоналу (2.13) збільшення похибок у визначенні положення тора і його орієнтації в просторі, тобто похибок у визначенні центру і вектора вісі тора. Для цього було проведено серію обчислювальних

експериментів. На поверхні тора попередньо було обрано декілька точок. Координати цих точок було «зіпсовано» випадковими величинами ξ_i з нормальним розподілом і зі стандартним відхиленням $s = 0,01$. Таким чином, було отримано сім масивів точок із «зіпсованими» координатами. Для кожного масиву розраховувались геометричні параметри тороїдальних поверхонь для двох випадків:

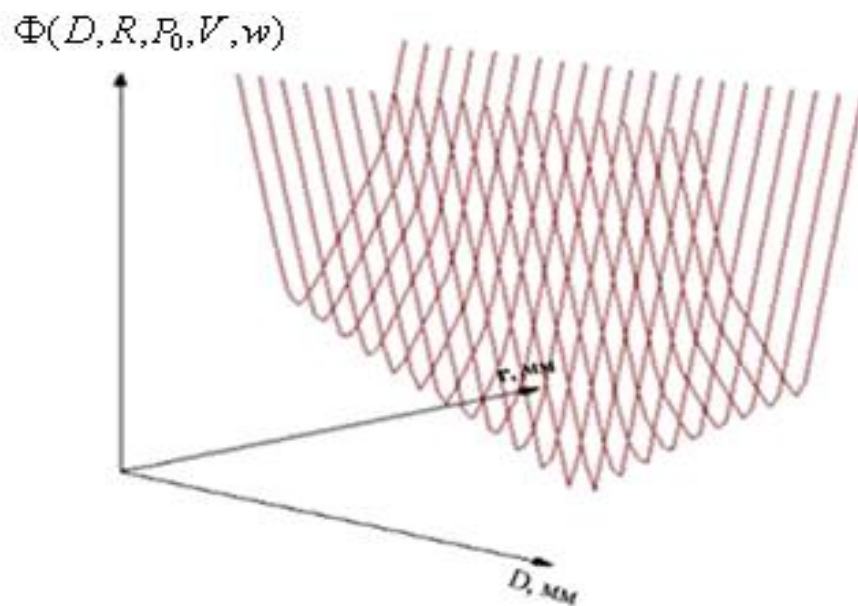


Рисунок 2.6 – Поверхня, що є рішенням рівняння (2.13)

-в разі відсутності впливу номінальних значень параметрів на кінцеве рішення ($w \rightarrow 0$): регуляризуючий член $reg(D, R, w)$ буде дуже малий і рішення буде залежати тільки від суми квадратів відхилень точок від поверхні;

-в разі, коли сума квадратів відхилень точок від поверхні не впливає на кінцеве рішення ($w \rightarrow \infty$). Тобто регуляризуючий член $reg(D, R, w)$ буде впливати на кінцеве рішення задачі значно сильніше, ніж $F(D, R, P, V)$.

Результати розрахунків геометричних параметрів тороїдальних поверхонь для двох вищезгаданих випадків наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 - Результати порівняння геометричних параметрів тора, отриманих з використанням регуляризуючого члена і без нього

№	ΔD , мм	ΔR , мм	PL , мм	$\Delta V.x$	$\Delta P.x$, мм	$\Delta P.y$, мм	$\Delta P.z$, мм
1	0,049	0,053	0,000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001
2	0,015	0,016	0,000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,042	0,046	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,009	0,012	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,034	0,039	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,044	0,051	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,027	0,028	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

За результатами експерименту, наведеними в табл. 2.6, можна зробити висновок про те, що запропонований спосіб не викликає збільшення похибок у визначенні положення тора і його орієнтації в просторі. Це свідчить про те, що регуляризація дозволяє поліпшити точність обчислення саме тих параметрів, які неможливо було визначити без включення регуляризуючого члена.

2.8 Визначення коефіцієнта регуляризації

Коефіцієнт регуляризації w у виразі (2.13) є надзвичайно важливим параметром. Якщо коефіцієнт регуляризації буде занадто малим, вплив номінальних значень геометричних параметрів поверхні, що вимірюється, на кінцеве рішення буде недостатнім для того, щоб отримати чітко виражений мінімум функції, і кінцеве рішення буде залежати в основному від суми квадратів відхилень точок від поверхні, а отже, будемо мати погано обумовлену задачу. При занадто великому коефіцієнті регуляризації сума квадратів відхилень точок від поверхні не буде надавати потрібного впливу на функцію мінімізації, і рішення буде максимально наближеним до номінальних значень геометричних параметрів поверхні. Таким чином, вибір оптимального значення коефіцієнта регуляризації є важливим завданням.

Оптимальне значення коефіцієнта регуляризації залежить від геометричних параметрів об'єктів і від відхилень точок від поверхні. З цього витікає висновок про те, що оптимальний коефіцієнт регуляризації буде різним для різних випадків вимірювань. Після вивчення можливих методів визначення оптимального коефіцієнта регуляризації, для застосування в даній задачі був обраний метод L-кривої. Сутність методу полягає в наступному. Коефіцієнт регуляризації змінюється від $w_{\min} = 0$ до $w_{\max}$ з деяким кроком. Для кожного коефіцієнта регуляризації проводиться розрахунок геометричних параметрів об'єкта. За результатами розрахунку будується графік. По вертикальній вісі цього графіка відкладається сума квадратів відхилень параметрів від їхніх номінальних значень, по вертикальній вісі – сума квадратів відхилень точок від поверхні. На початку кривої із зростанням коефіцієнта регуляризації спостерігається швидке зменшення суми квадратів відхилень геометричних параметрів від їхніх номінальних значень при незначному збільшенні суми квадратів відхилень виміряних точок від поверхні. При переході через деяку точку процес змінюється, і вже невеликому зменшенню суми квадратів відхилень геометричних параметрів буде відповідати істотне збільшення суми квадратів відхилень виміряних точок від поверхні. Характерна форма кривої дає можливість визначити точку з максимальною кривизною, яка і буде відповідати оптимальному коефіцієнту регуляризації (рис. 2.7).

У випадку визначення оптимального коефіцієнта регуляризації при знаходженні геометричних параметрів торів, по вертикальній вісі буде відкладатись:

$$\left(\frac{D - D_{\text{ном}}}{2}\right)^2 + (R - R_{\text{ном}})^2 \quad (2.14)$$

По горизонтальній вісі буде відкладатись сума квадратів відхилень виміряних точок від поверхні тора:

$$F(D, R, P_0, V) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2, \quad (2.15)$$

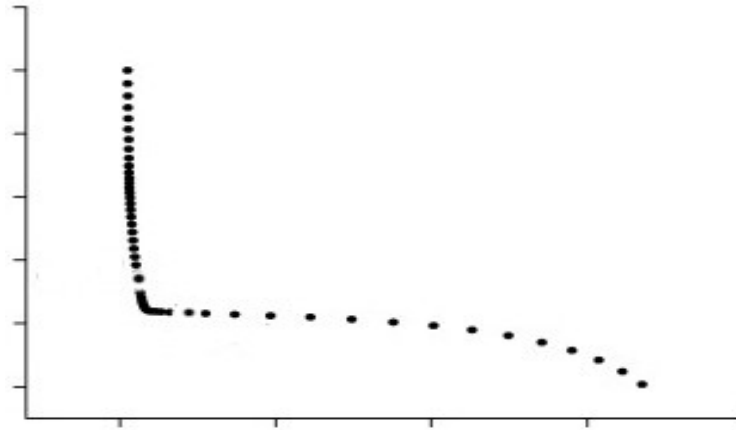


Рисунок 2.7 – Загальний вид L-кривої

Коефіцієнт регуляризації буде змінюватись від початкового значення $w_{\min} = 0$ до максимального значення $w_{\max}$, підбраного таким чином, щоб розрахункові геометричні параметри були максимально наближені до номінальних значень геометричних параметрів. Максимальне значення коефіцієнта регуляризації легко визначити з огляду на те, що при досягненні розрахунковими геометричними параметрами значень, близьких до їхніх номінальних значень, вони практично перестають змінюватися із збільшенням коефіцієнта регуляризації. Крок збільшення коефіцієнта регуляризації підбирається таким чином, щоб точки на графіку розташовувалися відносно рівномірно. Це досягається за рахунок витримування певної відстані між сусідніми точками, яка визначається за формулою:

$$dist = \sqrt{\left(\left(\frac{D - D_{ном}}{2} \right)^2 + (R - R_{ном})^2 \right)_{i+1} - \left(\left(\frac{D - D_{ном}}{2} \right)^2 + (R - R_{ном})^2 \right)_i}^2 + (F(D, R, P_0, V)_{i+1} - F(D, R, P_0, V)_i)^2} \quad (2.16)$$

Спочатку робиться пробний крок з приростом коефіцієнта регуляризації Δw , а потім розраховуються значення геометричних параметрів при поточній величині w і обчислюється відстань між вихідною та попередньою точкою по формулі (2.16). Якщо розрахункова відстань між точками менше обраної мінімальної відстані, робиться ще один крок з приростом коефіцієнта регуляризації $\Delta w/2$ і повторюється розрахунок відстані між точками. Якщо розрахункова відстань все ще менше обраної мінімальної відстані між точками, знову робиться крок із збільшенням w . Якщо розрахункова відстань між точками перевищує обрану максимальну відстань, робиться крок назад, тобто коефіцієнт регуляризації зменшується для виконання остаточного розрахунку у даній точці

Задля того, щоб підтвердити справедливність припущення про можливість застосування L-кривих для визначення геометричних параметрів тороїдальних поверхонь, в разі, якщо для вимірювання доступний невеликий сектор деталі, було проведено вимірювання діаметру та радіусу бігових доріжок на кільцях кулькових підшипників 206А і 307а. Вимірювання проводились на координатно-вимірювальній машині DKM 1-300DP. Оброблені результати вимірювань для зовнішнього кільця підшипника 206А наведені на рис. 2.8.

Отримані результати підтверджують можливість визначення точки перегину, яка відповідає оптимальному значенню коефіцієнта регуляризації. Кривизна кривої, представленої на рис. 2.8, визначається як відношення кута повороту дотичної $\Delta\phi$ до довжини дуги Δs (рис. 2.9).

Формула для визначення кривизни k має наступний вигляд:

$$k = \frac{|X_k'(w)Y_k''(w) - Y_k'(w)X_k''(w)|}{\left[\left(X_k'(w)\right)^2 + \left(Y_k'(w)\right)^2 \right]^{3/2}}$$

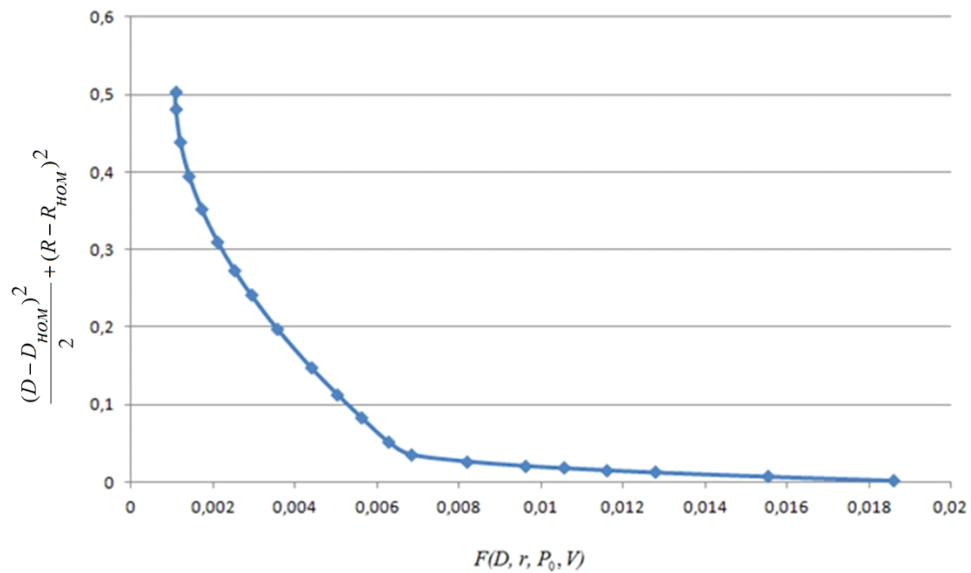


Рисунок 2.8 – L-крива, побудована для зовнішнього кільця підшипника 206А

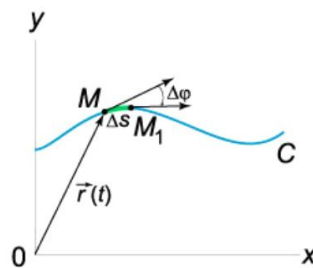


Рисунок 2.9 – Схема визначення кривизни кривої

Залежність, що представлена на рис. 2.8, задається у чисельній формі, тому значення похідних визначались методом кінцевих різниць. Якщо крива складається з n точок, для обчислення першої похідної $X_k'(w)$ в кожній точці використовується наступний вираз:

$$X_k(w)_{j'} = \frac{X_k(w)_i - X_k(w)_{i-1}}{w_i - w_{i-1}}$$

де $i = 1, 2, \dots, n$.

Для обчислення першої похідної $Y_k'(w)$ в кожній точці використовується вираз:

$$Y_k(w)j' = \frac{Y_k(w)_i - Y_k(w)_{i-1}}{w_i - w_{i-1}}$$

де $i = 1, 2, \dots, n$.

Для обчислення другої похідної $X_k''(w)$ в кожній точці використовується вираз:

$$X_k(w)j'' = 2 \cdot \frac{X_k(w)'_i - X_k(w)'_{i-1}}{w_{i+1} - w_{i-1}}$$

де $i = 1, 2, \dots, n - 1$.

Обчислення другої похідної $Y_k''(w)$ використовується вираз:

$$Y_k(w)j'' = 2 \cdot \frac{Y_k(w)'_i - Y_k(w)'_{i-1}}{w_{i+1} - w_{i-1}}$$

де $i = 1, 2, \dots, n - 1$.

Для перевірки запропонованого підходу до визначення оптимального коефіцієнта регуляризації кращим способом є практична перевірка та порівняння отриманих геометричних параметрів поверхні з їхніми дійсними значеннями. Проблема вимірювальних експериментів полягає в тому, що при виконанні вимірювань на координатно-вимірювальних машинах дійсний розмір вимірюваних поверхонь важко встановити з великою точністю, особливо без використання регуляризації.

Попередньо була згенерована поверхня тора, що імітує жолоб бігової доріжки кільця підшипника 307а (рис. 2.10). Потім на поверхні тора було обрано точки та визначено їхні координати. Після цього координати обраних точок було «зіпсовано» випадковими величинами ξ_i , що мають нормальним розподіл. Стандартне відхилення випадкових величин складало $s = 0,01$.

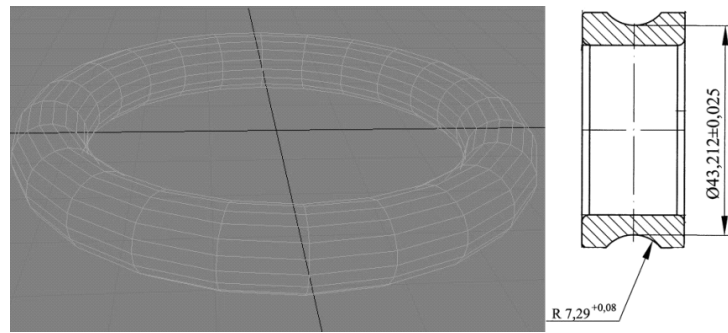


Рисунок 2.10 – Модель бігової доріжки кільця шарикопідшипника

Для початку було проведено розрахунки з введенням в функцію мінімізації регуляризуючого члену, в який було введено дійсні розміри створеної моделі тора. В цьому випадку при досягненні достатньої величини коефіцієнта регуляризації рішення повинно звестися до вірного, тобто мають бути отримані справжні розміри тора. На рис. 2.11 наведено L-криву, отриману для умов, коли заздалегідь відомі справжні розміри тороїдальної поверхні.

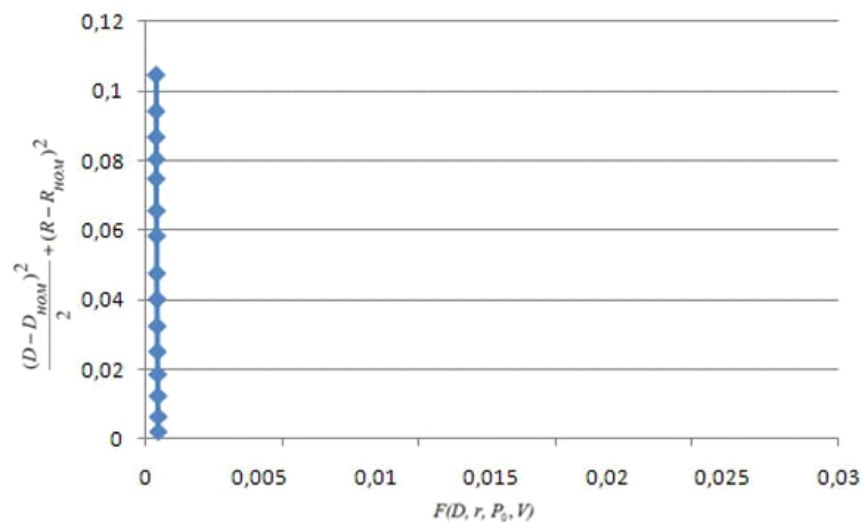


Рисунок 2.11 - Залежність відхилення геометричних параметрів тора від їхніх номінальних значень

Цей графік підтверджує припущення про те, що при вірно заданих значеннях параметрів поверхні рішення приходить до вірного без появи точок перегину, тобто сума квадратів відхилень не збільшується зі

збільшенням коефіцієнта регуляризації. На підтвердження цього в табл. 2.7 наведено результати розрахунків кривизни кривої.

Таблиця 2.7 – Розрахункові значення кривизни кривої

w	0,0001	0,0060	0,0610	0,0810	0,1110	0,7460
k	0,0000	0,0452	0,0407	0,0295	0,0327	0,0032

З таблиці видно, що значення кривизни на всіх ділянках кривої відрізняються не суттєво, і тому неможливо визначити точку перегину.

3 ЗАСТОСУВАННЯ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ МАШИН ДЛЯ КОНТРОЛЮ КІЛЕЦЬ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

3.1 Модуль, призначений для вимірювання тороїдальних поверхонь у програмному забезпеченні ГеоАрм

В процесі дослідження можливостей виміру кільця шарикопідшипників на координатно-вимірювальних машинах був розроблений модуль для програми GeoArm, що дозволяє вимірювати тороїдальні поверхні.

Значення початкового наближення для радіусу перетину тора визначається як середній радіус вимірюваних перетинів. Початкове наближення для інших параметрів тора були отримані за допомогою окружності, що проходить через центри вимірюваних перетинів. Таким чином, у виді того, що мінімальна кількість точок для побудови окружності - 3, мінімальна кількість точок, необхідна для вимірювання тора - 9, тобто вимірювання проводиться у 3-х перетинах тора в трьох точках у кожному перетині.

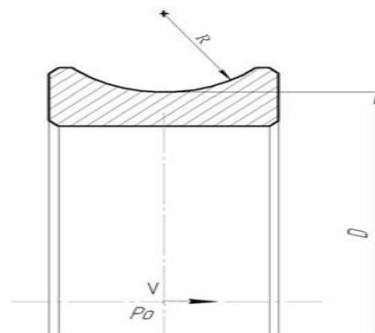


Рисунок 3.1 - Внутрішнє кільце підшипника

Рівняння тороїдальної поверхні має вигляд:

$$(x^2 + y^2 + z^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 - R^2)^2 - 4\left(\frac{D}{2}\right)^2 (x^2 + y^2) = 0$$

де D – діаметр тора,

R – радіус утворюючої окружності тора,

а x, y, z – координати точки на поверхні тора.

З допомогою функції мінімізації, методом найменших квадратів знаходиться оптимальна тороїдальна поверхня для вимірюваних точок, тобто підбираються такі параметри центру (координати вектора осі та центральної точки, діаметра тора та радіусу його утворюючої окружності), щоб сума квадратів відстані вимірюваних точок до поверхні була мінімальною. Для цього треба мінімізувати функцію:

$$F(D, R, P_0, V) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2$$

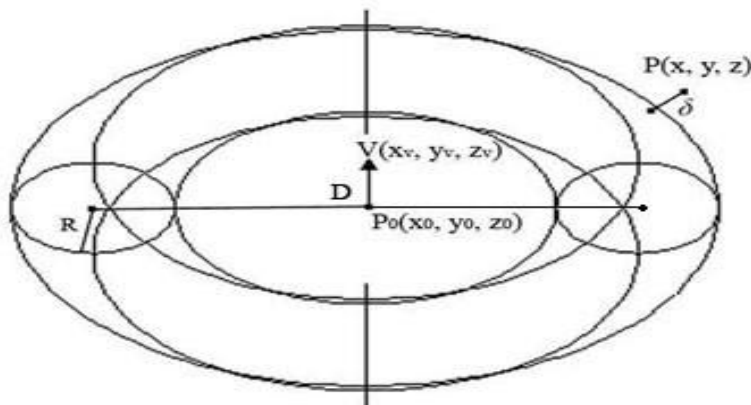


Рисунок 3.2 - Відстані від виміряної точки до тороїдальної поверхні

Для визначення суми квадратів відхилень виміряних точок від поверхні тора необхідно виконати операцію знаходження відстані від точки до тороїдальної поверхні (рис. 3.2).

Обчислення відстані відбувається за наступним алгоритмом:

- обчислення і нормалізація вектора від центру тора до точки;
- отримання 2-х кіл шляхом перетину тороїдальної поверхні площиною, нормаль якої є векторним твором осі тора і вектора від центру тора, до виміряної точки і центром в точці P_0 ;

-вибір однієї з околиць з центром, найближчим до виміряної точки.

-обчислення вектора від центру отриманої окружності до виміряної точки і перетин кола прямий, вектор якої збігається з отриманим, а центр знаходиться в центрі кола;

-вибір з 2-х отриманих точок точки, найближчої до виміряної і обчислення відстані між ними.

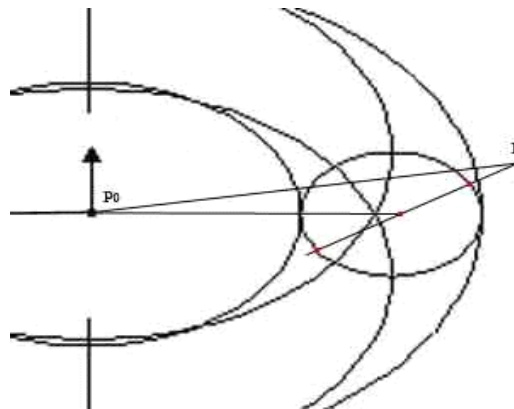


Рисунок 3.3 - Обчислення відстані від виміряної точки до поверхні тора

В залежності від того, внутрішнє кільце або зовнішнє задається поправка на радіус наконечника щупа (рис. 3.4).

У разі вимірювання внутрішнього кільця малий радіус тора повинен бути збільшений на радіус наконечника, а великий зменшений. У разі вимірювання зовнішнього кільця - малий і великий радіусу тора повинні бути збільшені на радіус наконечника.

Вимірювання тороїдальної поверхні відбувається по 3-м і більш перетинах, рекомендується для вимірювання вибрати зону контакту бігової доріжки з тілами кочення (рис. 3.5).

Розроблений програмний модуль дозволяє отримати такі параметри тора, як:

- діаметр тора,
- радіус окружності тора,
- координати центральної точки тора,

- координати вектора осі тора,
- відхилення форми.

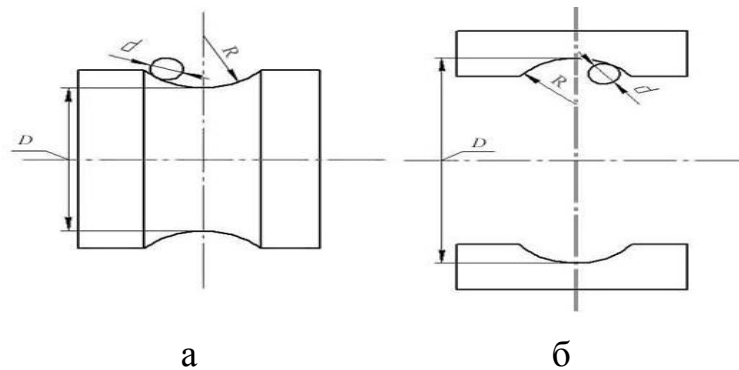


Рисунок 3.4 - Поправка на радіус наконечника:

а - у разі внутрішнього кільця,

б - в разі зовнішнього кільця

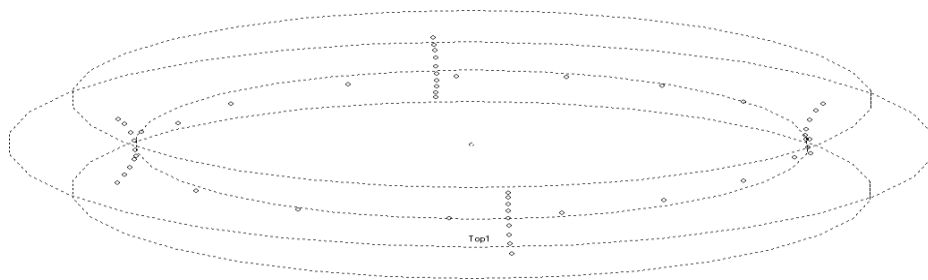


Рисунок 3.5 - Вимірювання тороїдальної поверхні

3.2 Визначення оптимальної кількості точок на поверхнях для визначення їх параметрів

Для комплексного геометричного аналізу кілець підшипників кочення за допомогою координатно-вимірювальних машин необхідно вимір таких поверхонь як: площину, окружність, циліндр, конус і тор [9] (рис. 3.6).

Методика оцінки похибок вимірювання вищеперелічених поверхонь полягає в наступному: проводиться багаторазове вимір еталонного об'єкта, визначається середнє значення вимірюваного параметра і відхилення окремих його вимірювань від середнього.

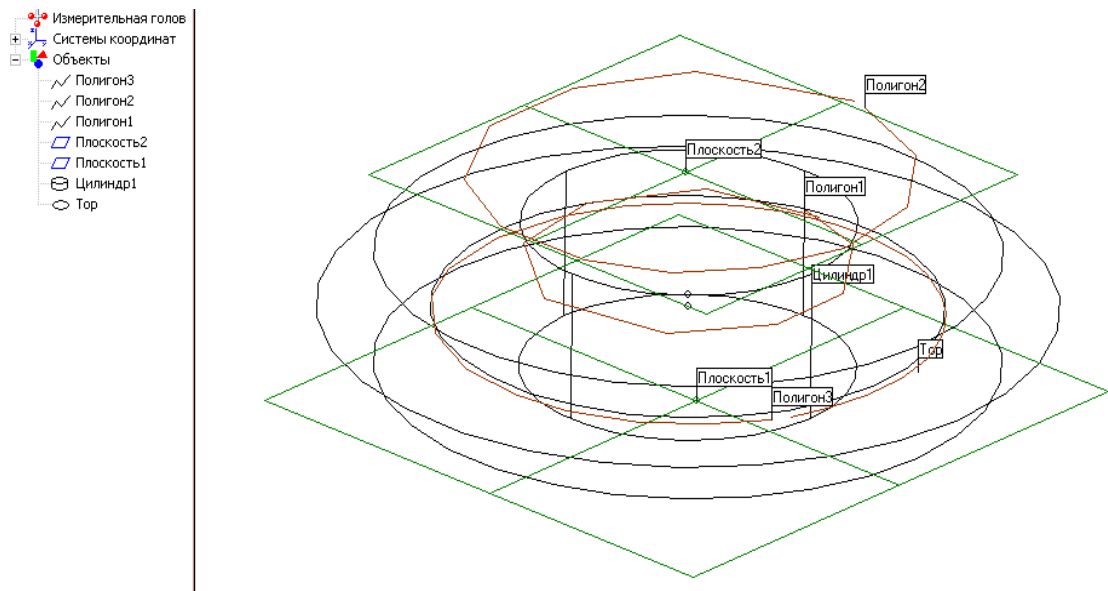


Рисунок 3.6 - Вимірювання поверхонь кільця підшипника кочення

Мінімальна і максимальна відхилення дають розмах відхилень, що характеризує похибка вимірювання. Для оцінки отримані значення розмаху відхилень будемо порівнювати з похибкою обмашує головки координатно-вимірювальної машини. Так як похибка виготовлення еталонного об'єкта на порядок менше похибки обмашує головки, то фактично дане дослідження спрямоване на визначення похибки результату обробки даних в залежності від кількості виміряних точок. Отримаємо теоретичні оцінки похибок вимірювання. Припустимо, що поруч з поверхнею вимірюваного об'єкта є зона розмаху точок шириною Δ , що дорівнює похибки головки координатно-вимірювальної машини (рис. 3.7).

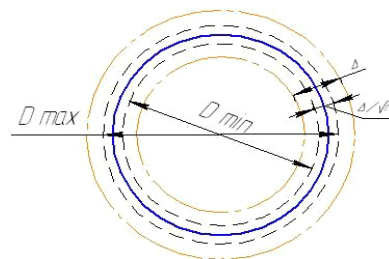


Рисунок 3.7 - Схема розрахунку теоретичної оцінки похибки вимірювань для окружності

У цій зоні можуть розташовуватися виміряні точки. При обробці вимірювань точки усереднюються, тому зона можливого розташування розміру, що оцінюється через середньоквадратичне відхилення, звужиться пропорційно квадратному кореню з кількості точок, виміряних на поверхні об'єкта [4]. У разі окружності матимемо:

$$\Delta D = D_{\max} - D_{\min} = \frac{2\Delta}{\sqrt{n}}, \quad (3.1)$$

де n – кількість виміряних точок.

З метою практичної перевірки цієї залежності на координатно-вимірювальній машині DKM 1-300DP (похибка лінійних переміщень $3 + L / 300$ мкм, похибка обмацує головки ± 2 мкм) були проведені вимірювальні експерименти, в ході яких вимірювалося еталонне кільце діаметром 27,000 мм (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 - Еталонне кільце

Окружність кільця вимірювалося п'ятьма способами: по 3-м, 4-м, 6-ти, 8-ми і 10-ти точках. Узагальнені результати вимірювань наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Вимірювання зразковою окружності

Число точок	3	4	6	8	10
ΔD , мм	0,0066	0,0030	0,0024	0,0019	0,0018

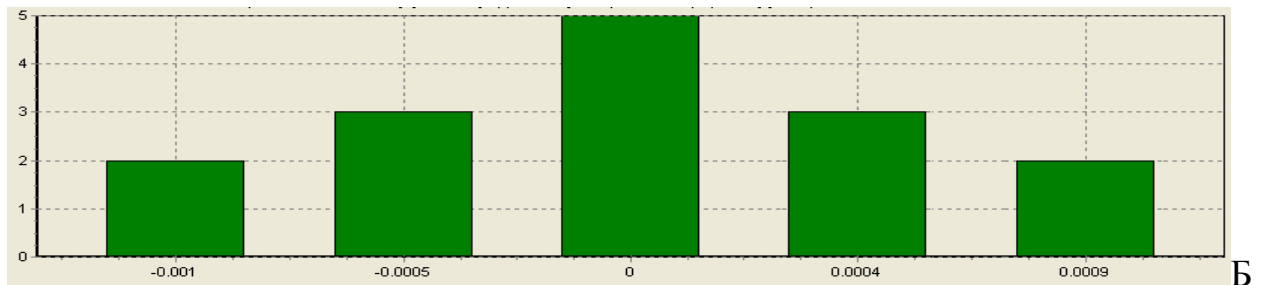


Рисунок 3.9 - Гістограма відхилень

На рис. 3.10 представлена залежність помилок визначення діаметра від кількості вимірних точок.

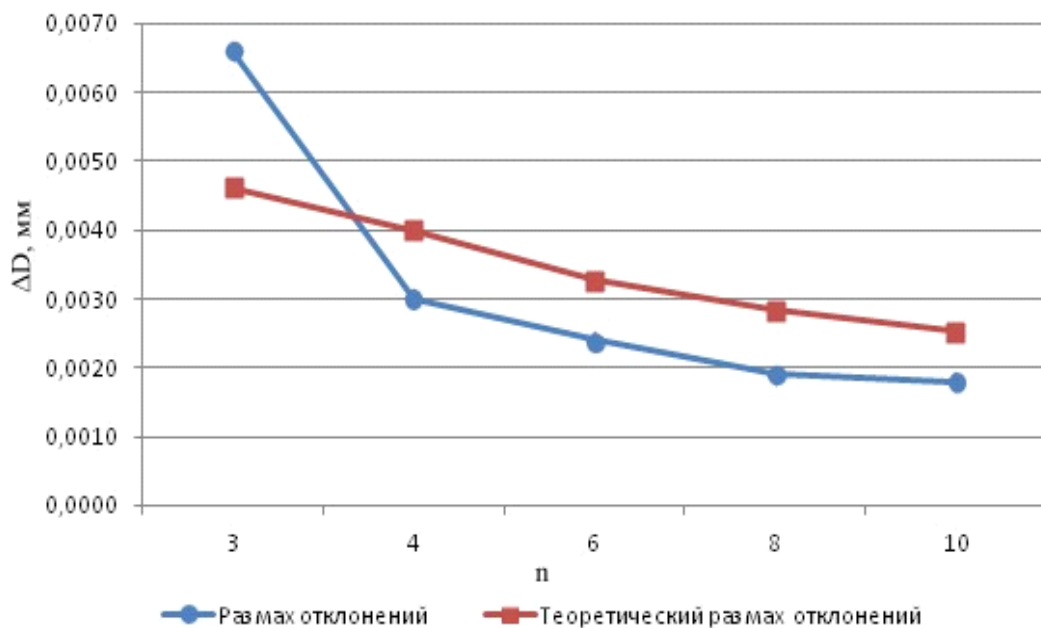


Рисунок 3.10 - Залежність помилки визначення діаметра отвору від кількості вимірних точок

На підставі отриманих результатів можна об'єктивно визначити число вимірюваних точок, при якому вимірювання будуть найменш трудомісткі, але дає достатні точності показники. Наприклад, якщо похибка виготовлення

деталі порівняння або більше похибки координатно-вимірювальної машини (КВМ), то можна рекомендувати вимір окружності по 4-м точкам. При цьому можлива помилка визначення діаметра становить 0,0015 мм, а похибка обмацує головки дорівнює 0,002 мм. Тобто чотирьох точок досить практично для всіх реальних вимірів. Для високоточних вимірювань можна рекомендувати 8 точок. При цьому помилка обробки даних більш ніж в два рази буде менше похибки обмацує головки.

Так само графік показує близькість результатів, отриманих за допомогою практичних вимірювань з теоретичною залежністю (3.1), що дозволяє зробити висновок про можливість обчислення похибки вимірювань за цією залежністю. Для визначення оптимальної кількості точок вимірювання на конічній поверхні був проведений чисельний експеримент. На згенерованій конічній поверхні було обрано точки з відповідними координатами. Кількість точок – 6, 8, 12 і 16. Координати точок були «зіпсовані» нормально розподіленими випадковими величинами зі стандартним відхиленням $s = 0,001$. За допомогою отриманих масивів точок були побудовані конічні поверхні і проведена оцінка відхилення отриманого кута конуса від номінального. На графіку, зображеному на рис. 3.11, наведено залежність точності визначення кута конуса від кількості виміряних точок.

По горизонтальній осі відкладено кількість точок, взятих для вимірювання, по вертикальній осі відкладений розкид відхилень при вимірюванні кута в градусах. Щоб оцінити похибку і порівняти її з похибкою координатно-вимірювальної машини, переведемо помилки вимірювання кута в помилки вимірювання діаметрів перетину конуса. Вони дорівнюють 0,0045 мм, 0,0020 мм, 0,0015 мм і 0,0011 мм відповідно для випадків вимірювання по 6, 8, 12 і 16 точкам. З отриманих результатів витікає, що для визначення кута конуса необхідно провести вимірювання у 8 точках. Якщо потрібна висока точність, вимірювання мають бути проведені у 12 точках.

Аналогічні експерименти були проведені для циліндра та тора. На поверхні згенерованого циліндра було обрано точки з відповідними

координатами. Кількість точок – 6, 8, 12 і 16. Координати точок були «зіпсовані» нормально розподіленими випадковими величинами, і по цим точкам із «зіпсованими» координатами були побудовані циліндричні поверхні. Результати експерименту наведені на рис. 3.12. По горизонтальній вісі відкладено кількість точок, взятих для вимірювання циліндрів, по вертикальній вісі відкладено розкид відхилень при вимірюванні діаметру в мм.

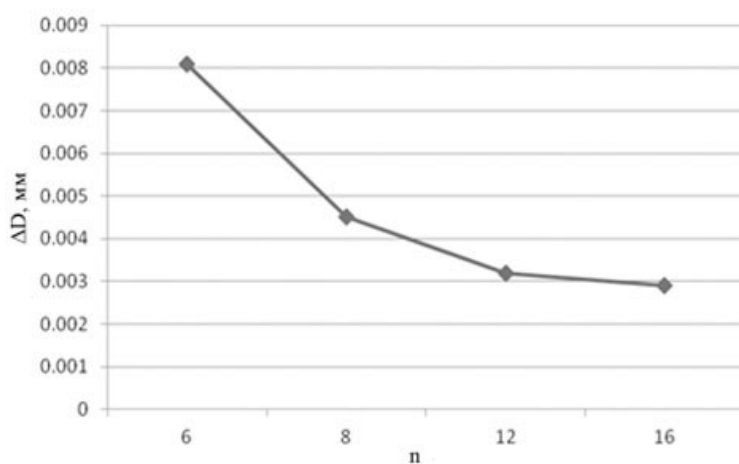


Рисунок 3.11 - Залежність помилки визначення кута конуса від кількості вимірних точок

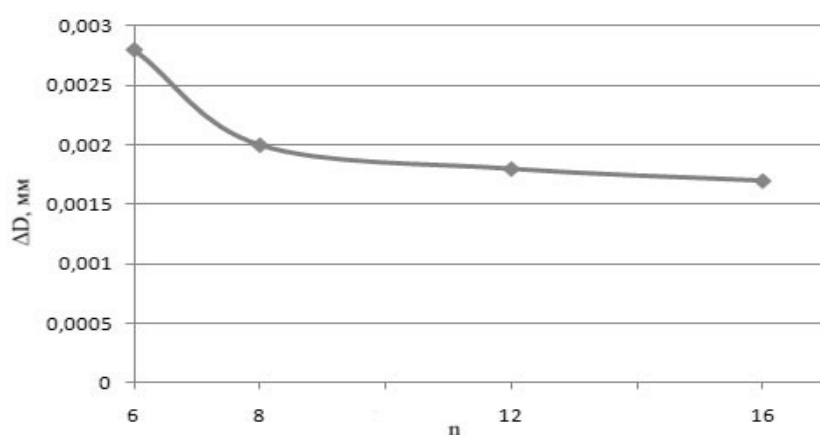


Рисунок 3.12 - Залежність помилки визначення діаметра циліндра від кількості вимірних точок

Для визначення параметрів циліндричних поверхонь на координатно-вимірjuвальних машинах доцільно вимірювати 8-12 точок.

Графік на рис. 3.13 показує розкид відхилень при вимірюванні параметрів тороїдальної поверхні в залежності від способу вимірювання (по 12, 16, 20 і 24 точкам).

Можна зробити висновок про те, що для визначення параметрів тороїдальних поверхонь слід вимірювати 16 точок.

При вимірі площин, з метою визначення відстані між ними, що актуально для контролю таких параметрів підшипників, як ширина кілець і монтажна висота, можна скористатися рекомендаціями статті [2] по оптимальній кількості точок при вимірах площин. З урахуванням допусків на ці розміри підшипників можна рекомендувати вимірювання торцевих площин по 4-м точкам [5].

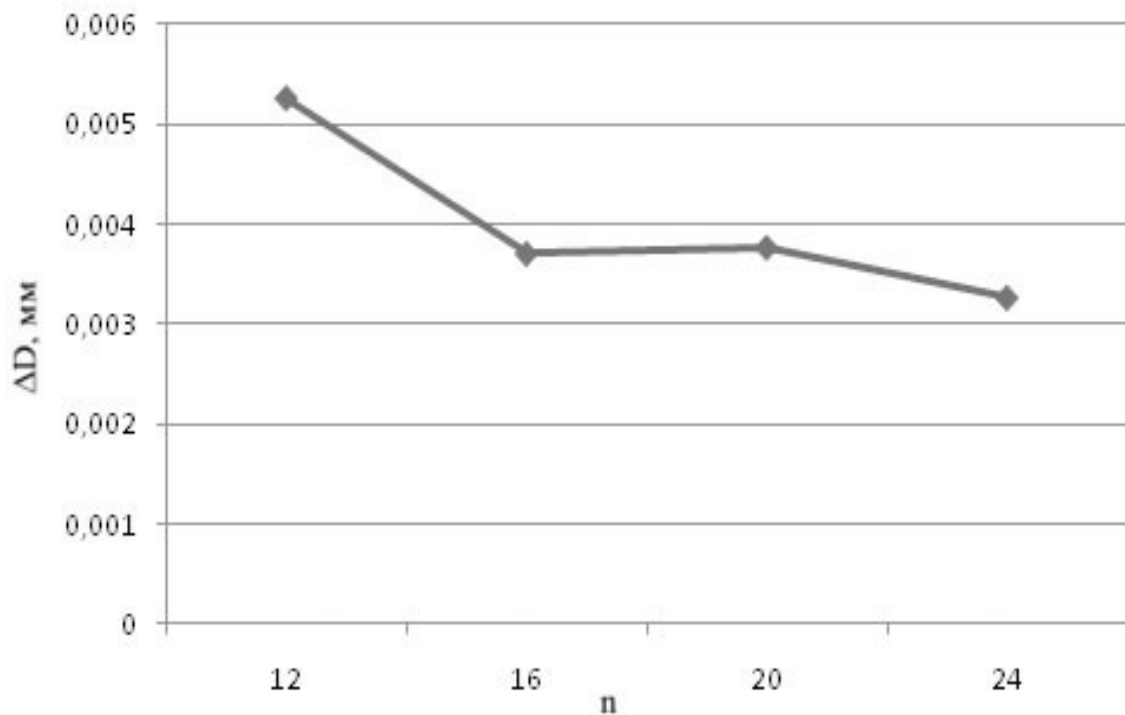


Рисунок 3.13 - Залежність помилки визначення діаметра тора від кількості вимірjаних точок

В табл. 3.2 наведені рекомендації по способу вимірювання поверхонь (мінімальної кількості вимірюваних точок n , для отримання достатньої точності), що входять в конструкцію кілець підшипників кочення на координатно-вимірювальних машинах, зроблені на основі вищеописаних експериментів.

Таблиця 3.2 - Рекомендована кількість точок для вимірювання

Поверхня	Площина	Окружність	Циліндр	Конус	Тор
n	4	4	8-12	12	16

Таким чином, отримані обґрунтовані рекомендації по оптимальній кількості вимірюваних точок для кожної складової поверхні кільця підшипника, що дозволить мінімізувати витрати в комплексних вимірюваннях.

3.3 Методика вимірювання кілець підшипників кочення на координатно-вимірювальних машинах

Для проведення контролю геометричних параметрів кілець підшипників кочення потрібно виміряти ряд поверхонь, отримати їх параметри і розрахувати деякі відносини між ними.

Контроль діаметра і відхилення форми (нециліндричності) циліндричних поверхонь кілець буде визначено за допомогою стандартної процедури вимірювання циліндрів, з мінімальною кількістю точок рівним 12 (рис. 3.14).

Контроль нестабільності діаметрів циліндричних поверхонь, тобто радіальних биття (різниць найбільшого і найменшого відстані від точок реального профілю поверхні до базової осі в перерізі площиною, перпендикулярної базової осі [20]) здійснюється за допомогою стандартної

процедури, яка передбачає вимірювання полігону по перетину циліндра площиною (рис. 3.14).

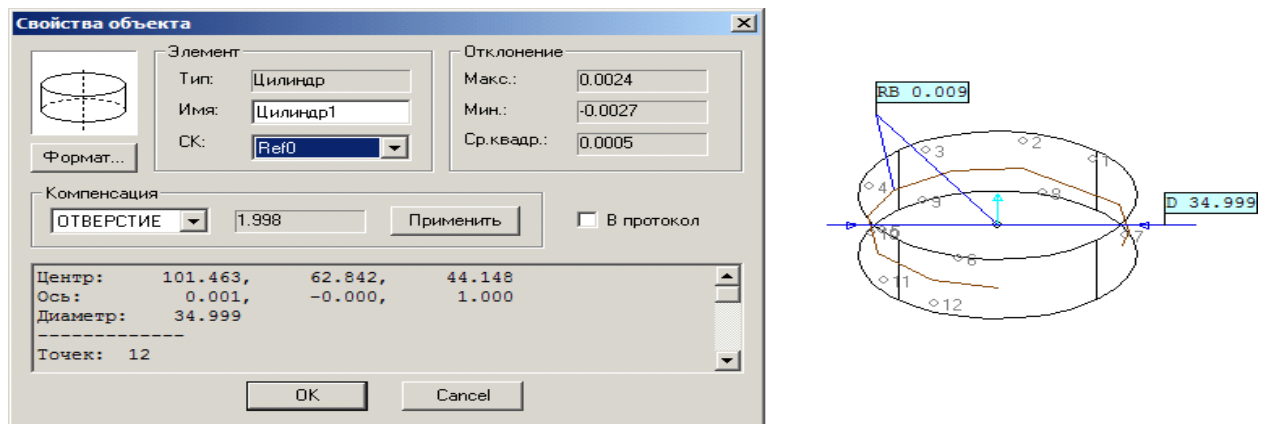


Рисунок 3.14 - Вимірювання діаметра і його нестабільності

Контроль діаметра отвору в одиничній площині і відхилення його форми (некруглої) здійснюється за допомогою процедури вимірювання окружності, із зазначенням базової площини по торця кільця.

Контроль ширини кілець здійснюється за допомогою стандартної процедури вимірювання відстані між площинами, вимірюваними мінімум по 4 точкам [24].

Контроль нестабільності ширини кілець, тобто їх торцеві биття (різниці найбільшого і найменшого відстані від точок реального профілю торцевої поверхні, до площини, перпендикулярної базової осі [20]) здійснюється за допомогою процедури, аналогічної процедури вимірювання радіального биття (рис. 3.15).

Непаралельність доріжки кочення кільця підшипника відносно торця - це різниця між найбільшим і найменшим відстанями в осьовому напрямку від базового торця до радіальної площини, перпендикулярної до осі тороїдальної поверхні бігової доріжки кільця. Непаралельність доріжки кочення вимірюється за допомогою стандартної процедури вимірювання неперпендикулярності (рис. 3.16).

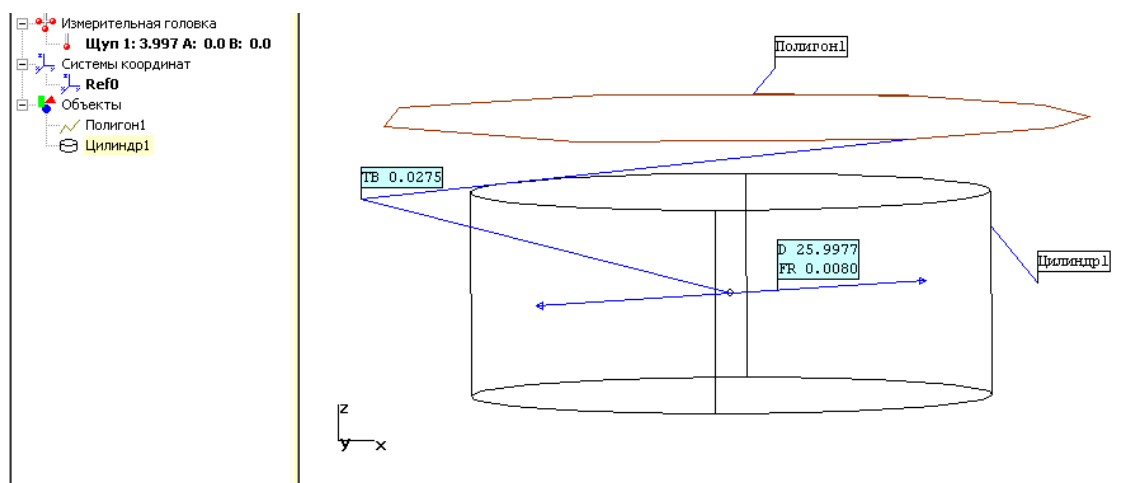


Рисунок 3.15 - Вимірювання ширини кільця

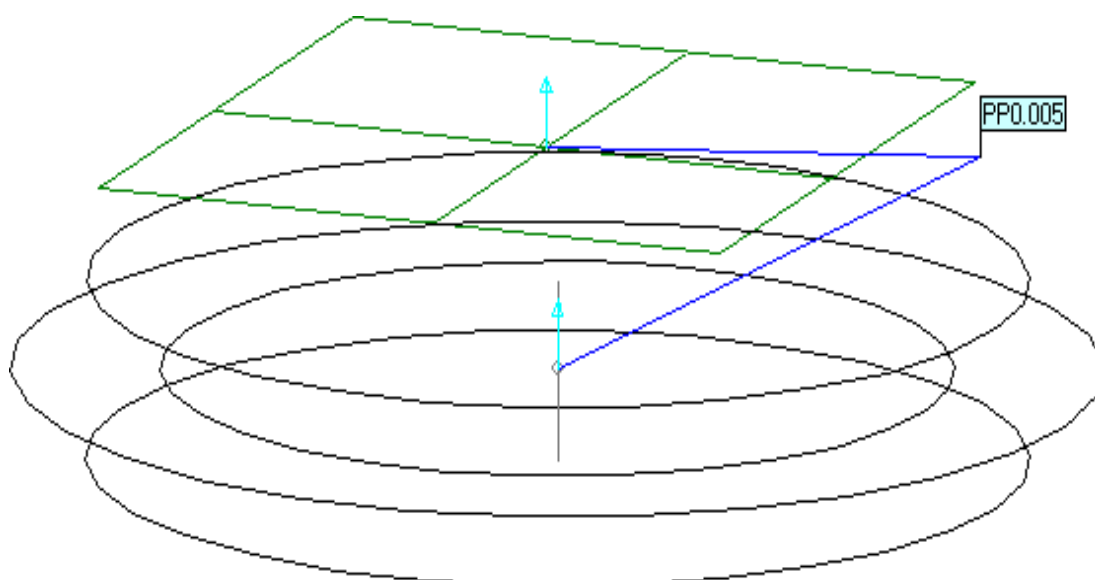


Рисунок 3.16 - Вимірювання непаралельності доріжки кільця

Неперпендикулярність торця кільця щодо циліндричної поверхні – це різниця між найбільшим і найменшим відстанями в осьовому напрямку від базового торця до радіальної площини, перпендикулярної до осі кільця, на відстані від осі в радіальному напрямку, що дорівнює половині середнього діаметра циліндра. Неperпендикулярність торця вимірюється за допомогою стандартної процедури вимірювання неперпендикулярності.

Контроль різнотовщинності доріжки кочення здійснюється за допомогою процедури вимірювання відстані від центру тороїдальної поверхні бігової доріжки кільця, до осі циліндра.

Контроль діаметра і радіуса жолоба бігової доріжки здійснюється за допомогою модуля вимірювання тороїдальних поверхонь.

Доріжка кочення кільця кулькового підшипника є тор. Процедура контролю передбачає побудову тора по 4-м перетинах і точках, узятим в області контакту з кульками по периметру доріжки (рис. 3.17).

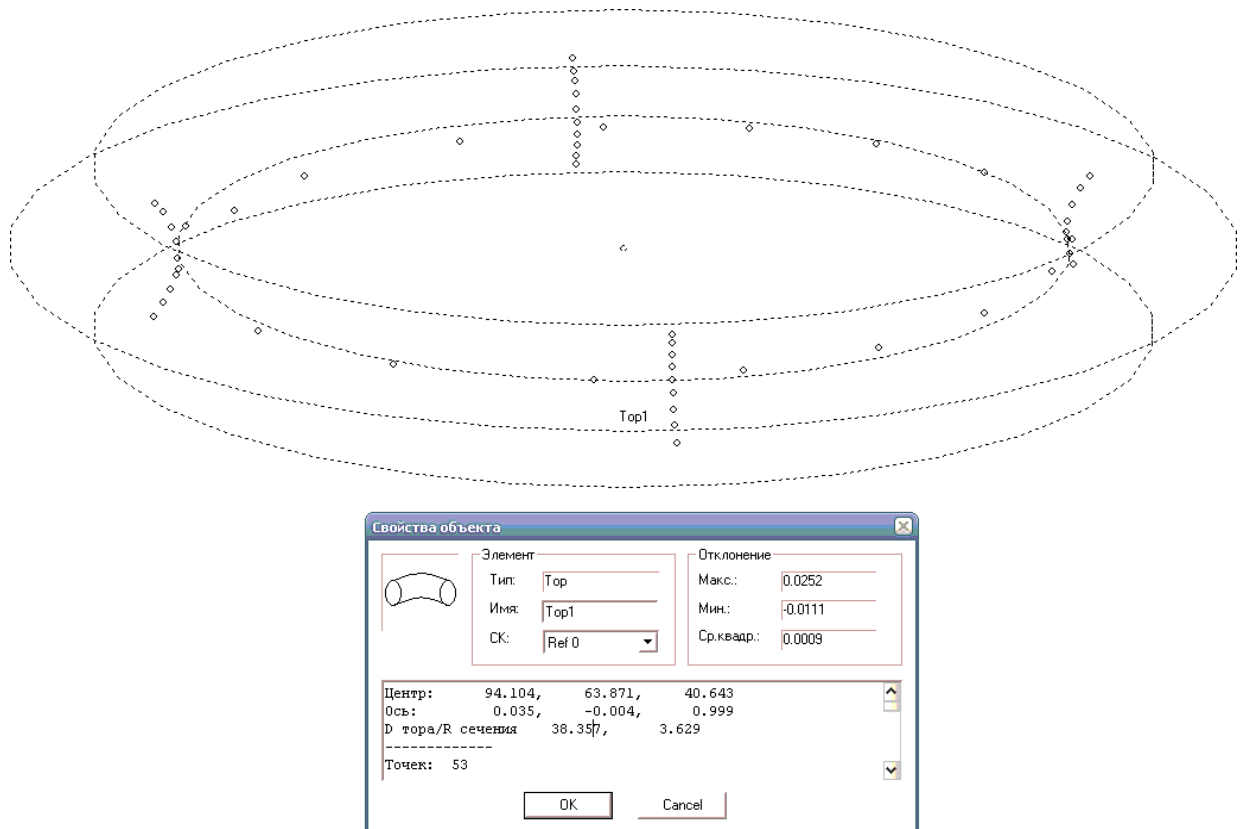


Рисунок 3.17 - Вимірювання доріжки кочення кільця кулькового підшипника

Контроль нестабільності діаметра бігової доріжки здійснюється за допомогою діаграми, побудованої за відхиленнями від тороїдальної поверхні точок, взятих по периметру доріжки кочення в зоні контакту з кульками або в разі роликового підшипника за відхиленнями точок, взятих в зоні контакту кільця з тілами обертання, від конічної поверхні (рис. 3.18). Точки, в яких виконується вимірювання, використовуються для побудови тора, завдяки чому можна визначити відхилення кожної з точок від поверхні.

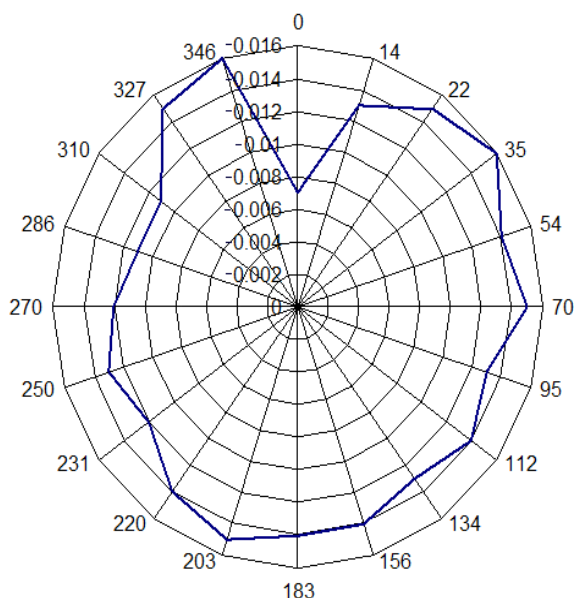


Рисунок 3.18 - Діаграма відхилень

Контроль нестабільності діаметра доріжки кочення здійснюється за відхиленнями від тороїдальної поверхні точок, взятих по перетинах тора, паралельним його осі.

Кут конусності і відхилення форми бігової доріжки кільця конічного підшипника визначається за допомогою процедури вимірювання конуса по 12 точкам (рис. 3.19).

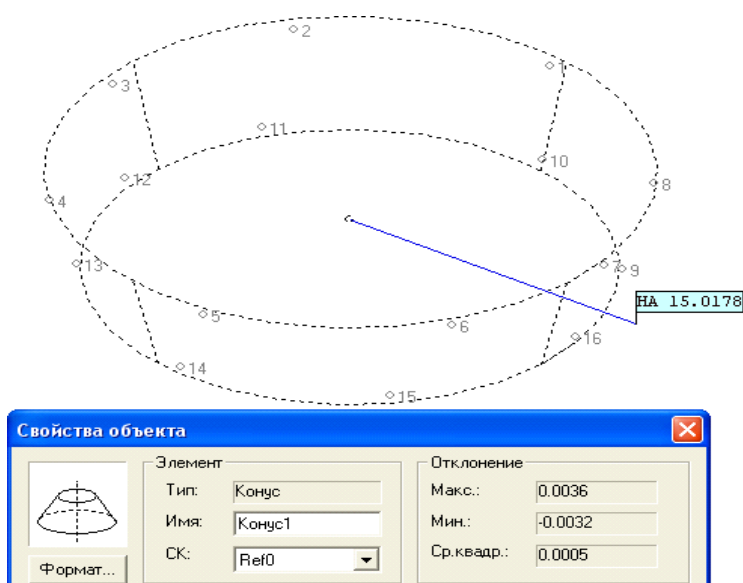


Рисунок 3.19 – Контроль бігової доріжки кільця конічного підшипника

Поверхні, необхідні для вимірювання геометричних параметрів кільця кульового підшипника зображені на рис. 3.20.

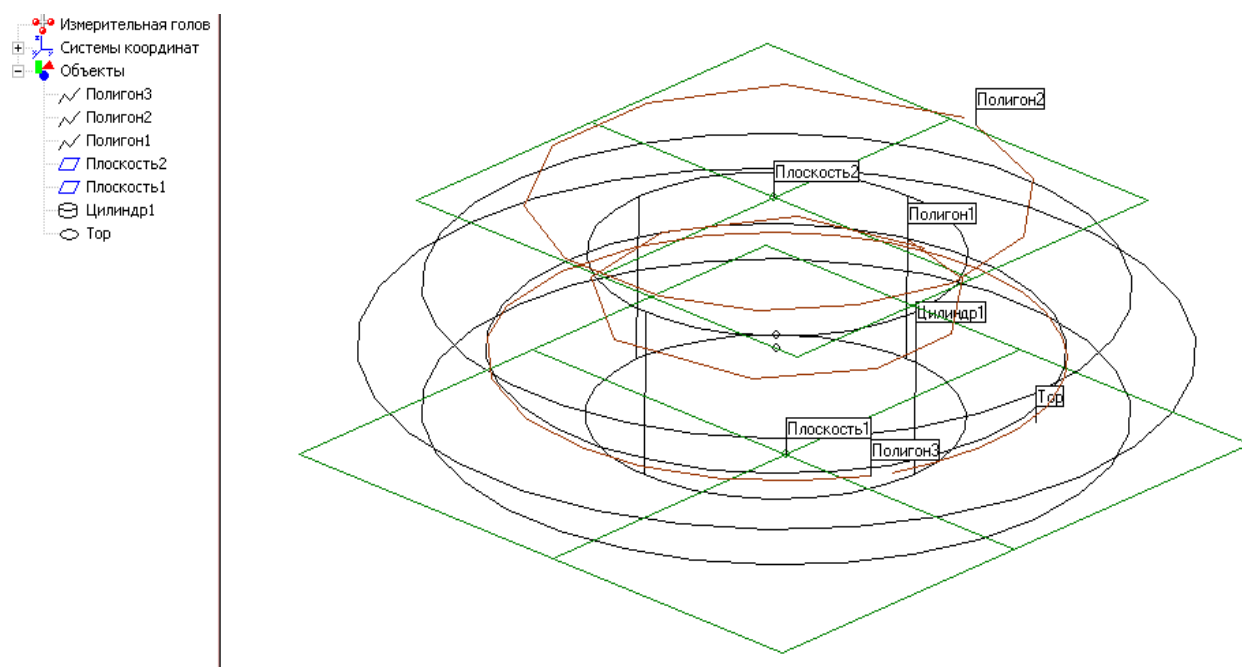


Рисунок 3.20 - Сеанс вимірювання кільця кульового підшипника

На рис. 3.21 представлені поверхні, необхідні для вимірювання геометричних параметрів кільця роликового підшипника.

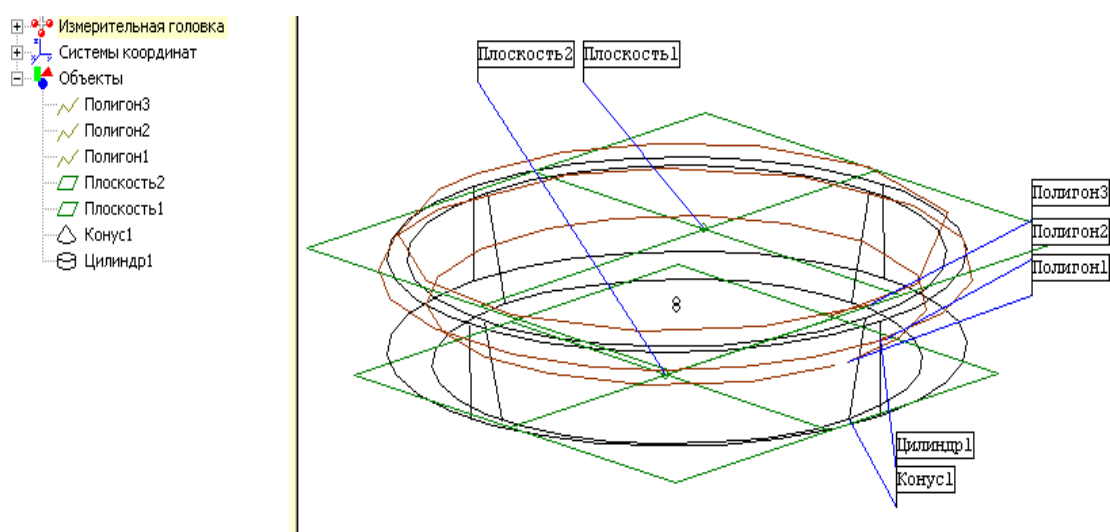


Рисунок 3.21 - Сеанс вимірювання кільця роликового підшипника

ВИСНОВКИ

1. У магістерській роботі досліджено вплив величини сегмента, на якому здійснюється вимірювання радіусу жолоба бігової доріжки підшипників та діаметру бігової доріжки, на точність вимірювань у разі використання для вимірювань координатно-вимірювальних машин. Встановлено, що у разі вимірювання тороїдальних поверхонь на секторі, довжина якого не перевищує 90° , невеликому розкиду відхилення форми бігової доріжки від тороїдальної форми (ΔE_{form}) відповідає на порядок більший розкид діаметру тора та радіуса жолоба бігової доріжки.

2. Встановлено, що додавання інформації про номінальні геометричні параметри бігових доріжок кулькових підшипників дозволяє знизити похибки, що виникають при їхньому вимірюванні на координатно-вимірювальних машинах до припустимих значень.

3. Розроблена методика комплексного контролю кілець підшипників кочення з використанням універсальних координатно-вимірювальних машин.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Асташенков А.И. Разработка системы обеспечения единства измерений геометрических параметров эвольвентных зубчатых зацеплений. Дис. д-ра техн наук. Москва 2001г.
2. Исследования и разработка координатных методов и средств измерений геометрических параметров эвольвентных поверхностей и их метрологического обеспечения: Дис. канд. техн.Наук
3. Джунковский А.В., Суслин В.П. Исследование способов измерения концевых мер длины при калибровке координатно-измерительных машин // Законодательная и прикладная метрология. 2006. №5 (87).с. 54-57
4. Суслин В.П. Метод наименьших квадратов для решения нелинейных геометрических задач// Сб. науч. трудов НПО НИИТавтопром. М. 1987. Вып.1. С.122-138.
5. Суслин В.П, Джунковский А.В. Современные методы измерения и контроля в машиностроении //Технология машиностроения. 2004. №5. с.49-51
6. Суслин В.П., Макаров А.И., Джунковский А.В.,ШутерМ.И.Программы измерений и контроля геометрии деталей автомобильной техники //Автомобильная промышленность. 2005. №3.с.39-40.
7. Остроушкин Г.П., Федотов Н.Н. Конструкция и технология производства подшипников с листоштампованными кольцами. М: НПО ВНИПП 1991.
8. Спришевский А.И. Подшипники качения [http](http://mybearing.ru/) [HYPERLINK](http://mybearing.ru/) ["http://mybearing.ru/"](http://mybearing.ru/):// [HYPERLINK](http://mybearing.ru/) ["http://mybearing.ru/"](http://mybearing.ru/)mybearing [HYPERLINK](http://mybearing.ru/) ["http://mybearing.ru/"](http://mybearing.ru/). [HYPERLINK](http://mybearing.ru/) ["http://mybearing.ru/"](http://mybearing.ru/)ru [HYPERLINK](http://mybearing.ru/) ["http://mybearing.ru/"](http://mybearing.ru/)
9. Чудов В.А.,Цидулко Ф.В., Фредгейм Н.И. Размерный контроль в машиностроении.-М.: Машиностроение. 1982.-328с.
10. Рольт Ф.Г. Калибры и точные измерения. Т.1.- Л.: ОГИЗ 1933. 286 с.

11. Л. Константайн, Л. Локвуд. Разработка программного обеспечения.- СПб.-Питер.-2004.-592 с.
12. Стройк Дж. Краткий очерк истории математики. М.: Наука. 1990. 251 с.
13. Грановский В.А. Динамические измерения.-ЛЛ: Энергоатомиздат. 1984.224 с.
14. Солопченко Г.Н. Формальные компоненты измерительных систем.//В сб.
15. Тарбеев Ю.В. Современные проблемы теоретической метрологии.//Итоги науки и техники. Сер. «Метрологияи измерительная техника» М. ВИНТИ.-1991.-Т.8.-130с.
16. Соломахо В.Л. Оптимизация методов управления качеством координатных измерений в машиностроении. Дисс.д-ра техн наук. Минск, БГПА, 2000.
17. Дич Л.З. Геометрическая теория точности координатных измерительныхприборов. Дисс. д-ра техн наук. СПб. 1996.
18. Каспарайтис А.Ю., Кумейтатис Ю.П. Конструкция и точность координатных измерительных машин // Станкостроение Литвы.-1982.- т.14.- с.12-27.
19. Каспарайтис А.Ю., Шилюнас П.И. Метод оценки составляющих погрешности координатных измерительных машин.//Измерительная техника.- 1990.- №7.- С. 15-18.
20. Каспарайтис А.Ю. Методы исследования и построение прецизионных автоматических координатных измерительных машин. Автореф. дисс. д-ра техн. наук -М., 1990. -42 с. ИМАШ им. А.А. Благонравова.
21. Лысенко В.Г. Разработка и исследование системы обеспечения единства координатных измерений Дисс. д-ра техн наук. Москва, 2005.

22. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения. Москва, 2003.
23. ГОСТ 8.207-76 Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений.
24. ГОСТ 24642-81 – Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски и формы расположения поверхностей.
25. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. РМГ 29-99.