

Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра технології машинобудування

Магістерська
дисертація на здобуття
ступеня магістра

Використання цифрових вимірювальних систем на верстатах з ЧПК

Автор Яремчук Тетяна Олександрівна

Н.кер. Шуплецов Данило Костянтинович

2019

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК В ЯКОСТІ КВМ.....	5
1.1 Індикація верстатів	6
1.1.1 Типи енкoderів.....	9
1.1.2 Ємнісні енкoderи.....	11
1.1.3 Індуктивні енкoderи.....	12
1.1.4 Оптичні енкoderи	13
1.1.5 Магнітні енкoderи	16
1.2 Точність позиціонування верстатів.....	20
1.2.1 Поняття точності позиціонування	20
1.2.2 Чинники, що впливають на точність позиціонування.....	21
1.2.3 Вплив системи ЧПК	21
1.2.4 Вплив на точність позиціонування механіки верстата.....	24
1.3 Порівняння вертикально-фрезерних верстатів з ЧПК різних виробників	25
1.4 Координатно-вимірювальні машини	29
Компоновка КВМ	29
Кріплення деталей на КВМ	36
Порівняння координатно-вимірювальних машин різних виробників	37
Переваги та недоліки використання КВМ	40
1.5 Принцип роботи та конструкція вимірювальних щупів	43
1.5.1 Аналіз вимірювальних щупів фірми Renishaw.....	44

1.6	Висновки:	49
РОЗДІЛ 2. ВИКОРИСТАННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ, ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ		50
2.1	Використання статистичних методів аналізу.....	51
2.1.1	Аналіз однорідності дисперсій.....	54
2.1.2	Визначення рівня впливу «шуму»	55
2.1.3	Перетворення даних	56
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОХИБКИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ТОЧНІСТЬ ВЕРСТАТУ		66
3.1	План експерименту та виконання дослідження.....	67
3.2	Аналіз отриманих статистичних даних	73
3.3	Висновки:	77
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ		78
4.1	Опис ідеї послуги	79
4.1.1	Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї	79
4.2	Технологічний аудит ідеї проекту.....	80
4.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	82
4.4	Розроблення ринкової стратегії проекту	88
4.5	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	90
4.6	Висновки:	91
Використані літературні джерела.....		92
ДОДАТКИ.....		96

ВСТУП

З неперервним розвитком машинобудування вимоги до точності та якості оброблюваних деталей та виробів також зростають. В машинобудуванні найчастіше для вимірювання високоточних деталей таких, як прес форми, лопаті турбін використовують координатно-вимірювальні машини (КВМ), які дають змогу отримати деталізовану інформацію про деталь: розміри, шорсткість і таке інше. Проте, нині, сучасні верстати з ЧПК стають все точнішими та вже майже не відрізняються від КВМ за точністю позиціонування.

Для підвищення точності позиціонування на верстатах використовують додаткові пристрої для вимірювання: лазерні інтерферометри, вимірювальні енкодери, контактні датчики. Найуживанішими системами є саме контактні вимірювальні датчики або ж вимірювальні щупи, що призначені для роботи на верстатах, найчастіше на фрезерних обробних центрах. Вони допомагають зменшити час налагодження, збільшити час експлуатації верстата і найголовніше - підвищити точність виготовлених деталей. [28]

Для того, щоб можна було всебічно оцінити можливості вимірювання деталей за допомогою вимірювального щупа, необхідно перевірити це на практиці. Потім стане зрозуміло, чи можливо замінити КВМ таким способом оцінки деталі, адже використання вимірювальних машин – задоволення не з дешевих.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК
В ЯКОСТІ КВМ

1.1 Індикація верстатів

Сучасний світ диктує свої вимоги та норми виробництва. Ті компанії, які не займаються автоматизацією виробництва та внесенням технологічних вдосконалень залишаються в аутсайдерах. Одним із елементів, що призвів до технологічного стрибка в промисловості, зокрема в металообробній галузі стало введення в користування верстатів з числовим програмним керуванням. З їх появою знизилася собівартість продукції, значно зросли об'єми та якість вироблених деталей, і відповідно - прибуток.

Числове програмне керування (ЧПК) - комп'ютеризована система управління, що використовує команди, які написані на спеціалізованій мові програмування і керує рухомими елементами верстату. [1]

Переваги ЧПК:

- високий рівень автоматизації виробництва;
- простота і гнучкість обробки - для обробки різних деталей необхідно просто змінити програму
- зменшення впливу в процес людського фактору
- висока точність і повторюваність обробки
- швидкодія
- можливість виготовлення деталей складної просторової форми
- довготривале планування виробництва, так як є врегульований час операції і можливе прогнозування терміну виконання робіт.

Так, достоїнств у верстатів з ЧПК велика кількість, але не будемо забувати про плюси універсальних верстатів. [17] Їх широкі використовують на масовому виробництві однотипних деталей, якщо вимоги до точності і часу обробки невисокі. Універсальні машини легко обробляють з найпоширенішими видами матеріалів. Ними часто оснащуються невеликі підприємства і особисті майстерні, які спеціалізуються на ремонтно-механічних роботах. [2] Але якщо все-таки потрібні більш точна обробка, а грошей на центри ЧПК немає, то є певна альтернатива - модернізація універсальних верстатів.

Найпоширенішим методом є установка на верстат пристрою цифрової індикації (ПЦІ) разом з вимірювальними лінійками.

Пристрій цифрової індикації (ПЦІ) призначений для обробки електричних сигналів, які поступають від оптоелектронних перетворювачів лінійних переміщень (оптичних лінійок), і здійснює візуалізацію отриманої інформації на цифровому табло, а також допомагає у виконанні операцій обробки. [3]

ПЦІ разом з лінійними датчиками можна поставити на всі групи верстатів, де потрібно виміряти довжину переміщень. Таке обладнання обійдеться дешевше, ніж повноцінний комплекс з ЧПУ, і дозволить скористатися більшою частиною переваг, які дають сучасні цифрові технології.

Застосування пристроїв цифрової індикації разом з датчиками положення дозволяє зменшити вплив зносу механічної частини верстатів на точність обробки і значно підвищує якісні показники деталей. Це досягається за рахунок правильності установки вимірювальних датчиків і високою роздільною здатністю вимірювальної часті. Величина роздільної здатності вимірювальної частини може досягати частки мікрона при цьому не сильно залежати від зношення механічної частини обладнання. [4]

Завдяки використанню пристроїв цифрової індикації підвищується не тільки точність обробки, але і значно знижується ймовірність помилок оператора і відсоток браку, за рахунок наявності індикації безпосереднього положення виконавчого механізму, при цьому не потрібно робити поправку на люфти, і проводити розрахунки поділок шкали лімба на реально одержуваний розмір. Для ручної обробки даних на пристрої можливе виконання простих математичних розрахунків. [3]



Рисунок 1.1 – Універсальний верстат з ПЦІ (вимірювальна лінійка та ПЦІ)

Системи пристроїв цифрової індикації не мають люфту, який часто зустрічається в механічних системах вимірювання. Саме це дає змогу застарілому обладнанню працювати з точністю нового. З використанням ПЦІ можливо побачити реальне положення осей верстата, з урахуванням повної і неповної вибірки люфту. [5]

На перший погляд може здатися, що установка вимірювальної системи не може прибрати недоліки механічного зносу вузлів верстата. Так, це вірно, але враховуючи те, що вимірювальні лінійки встановлюються безпосередньо на виконавчий механізм (ту частину верстата, яка переміщується) повністю виключається такий фактор, як люфти (зношення ходових гвинтів) і випрацювання напрямних. Так на дисплеї пристрою цифрової індикації буде відображатися реальне переміщення механізму. Виходячи з цього, точність вимірювання верстата збільшується в рази. Оцінимо це на більш конкретному прикладі: на фрезерний верстат, який має ціну ділення лімба - 0,5мм встановимо ПЦІ дискретністю 5мкм. Тепер точність верстата стане 5мкм. Тільки оцінювати точність потрібно не на рукоятці штурвала і лімба, а на

зручному цифровому дисплеї ПЩІ, на якому зображена поточна координата верстата з точністю до 3-го знаку після коми. [6]

Додаткові функції сучасних пристроїв цифрової індикації:

- Функція розрахунку радіуса дуги окружності
 - Свердління отворів вздовж похилої лінії
 - Функція 200 допоміжних точок вихідного положення
 - Функція поділу окружності на рівні дуги
 - Обробка кутової поверхні
 - Обробка прямокутного внутрішнього пазу
 - Вихід в нуль
 - Функція калькулятора
 - Корекція на діаметр інструмента
 - Функція цифрового фільтра
 - Функція пам'яті 200 інструментів
 - Функція вимірювання для конуса
- Переклад розмірів (мм- дюйми, кутові-лінійні і т.д.).

1.1.1 Типи енкодерів

В середині минулого століття для лінійних вимірювань почали застосовувати механічні індикаторні головки, пневматичні і індуктивні прилади. На той момент - це було великим досягненням, але також стали очевидними недоліки цих систем: невеликий діапазон вимірювань та нелінійність характеристик. Саме останній фактор заважав можливості збільшення діапазону вимірювань і збільшував похибку вимірювань. В той час машинобудування розвивалося шаленими темпами, тому ці проблеми були неприпустимими і потребувалися більш нові технології, основані на інших фізичних принципах.

Тоді і почали виготовляти інкрементні енкодери, в яких були відсутні нелінійність характеристик і границі діапазону вимірювань. Натомість можуть

зафіксувати навіть невелике збільшення вимірюваної координати при переміщенні вимірювача і додаючи їх, і отримуючи величину переміщень.

Енкодери почали розробляти давно, але їх низька точність і якість були пов'язані з відсутністю знань в технології матеріалів та електроніці.

Розробка сучасних енкодерів сприяла розвитку координатних вимірювань (наприклад, координатно-вимірювальних машин) і появі верстатів з ЧПК, а також розвитку електроніки, обчислювальних технологій. Сьогодні всі технологічні та конструктивні дефекти вирішені і випускається величезна кількість інкрементних перетворювачів, що працюють за різноманітними принципами дії. При чому нинішні перетворювачі мають дуже високу точність, і колосальні діапазони вимірювань (до кількох десятків метрів). [7]

Нині випускають і широко використовують у вимірювальній техніці і на верстатах з ЧПК декілька типів лінійних та кутових енкодерів:

- оптичні (фотоелектричні);
- магнітні;
- ємнісні;
- індуктивні.

Таблиця 1.1.1 - порівняння інкрементних перетворювачів:

Технологія	Переваги	Недоліки
Оптичні	точність менше 1,0 мкм	велика споживана потужність
Магнітні	надрукована шкала	недостатня лінійність
Ємнісні	лінійність 0,2 % кроку T	чутливість до вологості
Індуктивні	лінійність 0,2 % кроку T	вплив ємності

1.1.2 Ємнісні енкодери

Ємнісні і індуктивні енкодери (рис. 1.2) вигідно відрізняються невисокою потужністю, що потрібна для зчитування інформації з шкали. Тому ємнісні і індуктивні енкодери найчастіше використовуються у вимірювальних системах з жорсткими обмеженнями на споживану потужність. Принцип їх роботи застосовують в ручному вимірювальний інструмент з цифровим поділками (штангельциркулі, мікрометри, індикатори і т.п.) на батарейках. [8]

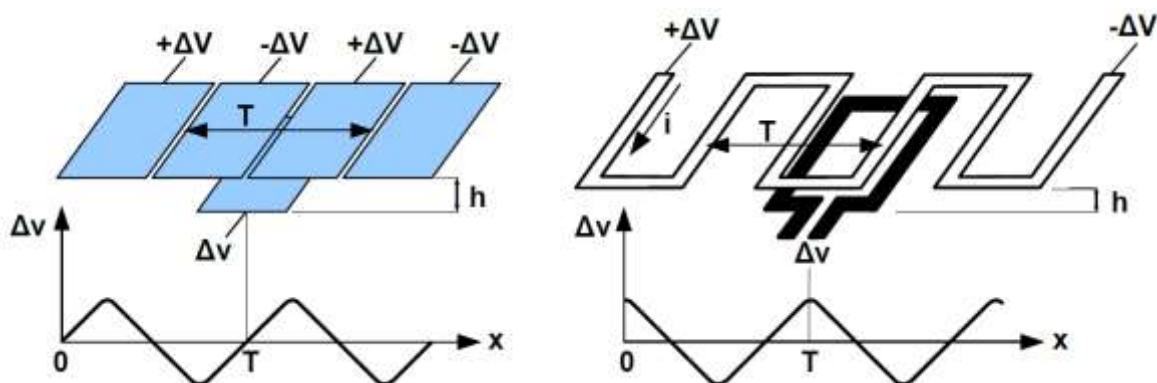


Рисунок 1.2 - Спрощені схеми ємнісного та індуктивного енкодера

Ємнісні енкодери мають дуже просту будову і високу надійність при використанні. На них негативний вплив має лише підвищена вологість.

Однак, ємнісні енкодери не мають таку точність як оптичні енкодери. Це пояснюється тим, що носії інформації - шкали перетворювача виконані з пластика і крок і технологія нанесених на них електродів не може бути виконаний таким чином, як на скляних шкалах оптоелектронних ІІ.

Дискретність цифрового відліку у діючих приладів з ємнісними енкодером становить 0,01; 0,001; 0,0001 мм. Повторюваність лінійних ємнісних ІІ становить 2-4 мкм. Похибка залежить від того вимірювального засобу, в якому використовується ІІ і від діапазону вимірювання. Зазвичай не менше 5-10 мкм. [7]

1.1.3 Індуктивні енкодери

Ємнісні енкодери, як всі ємнісні перетворювачі дуже чутливі до зміни вологості навколишнього середовища, що сильно впливає на лінійність перетворювача.

Індуктивний енкодер, на відміну від ємнісного, працює в магнітному полі і тому не чутливий до вологості і інших забруднень шкали.

Індуктивний енкодер складається з шкали (лінійки) і зчитуючого пристрою, який переміщається над шкалою з невеликим зазором h . Шкала, схожа на сходи, складається з серії замкнутих петель, розташованих з кроком T , струми яких спрямовані зустрічно. На зчитувальному пристрої на двох сторонах плати нанесена послідовність з трьох плоских зигзагоподібних основних обмоток, що чередуються і трьох зигзагоподібних знімних обмоток, що чередуються, з кроком H . Дві плоскі зигзагоподібні обмотки взаємодіють через рухливу петлю (рис. 1.4) [7]

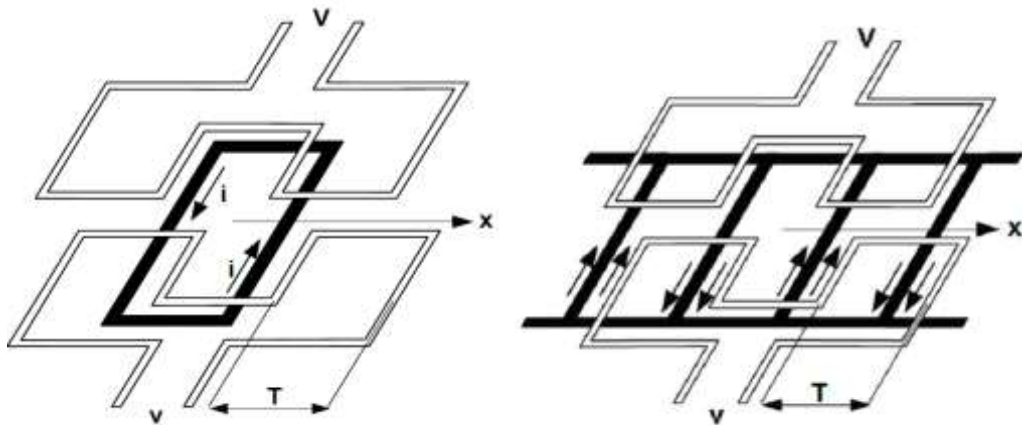


Рисунок 1.4 - Принцип дії індуктивного енкодера

Дискретність ЦІ приладів з індуктивними енкодерами становить 0,01; 0,001; 0,0001 мм.

1.1.4 Оптичні енкодери



Рисунок 1.5 - Оптичні лінійки від Renishaw із зчитувальними головками АТОМ

Оптичні кодери зазвичай використовують одну із форм фотоелектричного сканування на основі відбиття чи дифракції світла для визначення положення. Скляна шкала позначена дуже тонкими лініями, які називаються решітками, з періодом решітки в кілька мікрон. Скануюча сітка (частина скануючої або зчитувальної головки) має решітки, з таким же інтервалом, як і шкала.

При скануванні світлодіодне джерело пропускає світло через скануючу сітку. Коли скануюча сітка і шкала рухаються відносно один одного, світло модулюється. Якщо зазори в решітках вирівнюються, проходить світло, але якщо лінії сітківки збігаються з проміжками шкали (або навпаки), світло не може пройти. Фотоелектричні комірки стежать за цими перепадами світла і перетворює їх в електричні сигнали для відстеження руху.

Інтерференційне сканування, як правило, використовується для періодів решітки в діапазоні від 5 мкм і менше і використовує тривимірні структури на шкалі, які спираються на дифракцію та інтерференцію світла. Коли світло проходить крізь сітку, воно розсіюється на три часткові хвилі, і коли ці часткові хвилі потрапляють у шкалу, 3-D решітки на шкалі дифракують хвилі. Потім хвилі знову зустрічаються біля сітківки, де вони далі дифракують і заважають одна одній. У міру переміщення сітківки і шкали відносно один одного виробляється змінна інтенсивність світла. Ця зміна інтенсивності світла

контролюється фотоелектричними елементами і перетворюється в електричні сигнали.



Рисунок 1.6 – Розташування лінійних енкoderів поблизу джерел бруду

Можливо, найпоширенішим застосуванням лінійних енкoderів зі скляною шкалою є надточна обробка, особливо шліфувальні та токарні верстати для оптики та деталі, що використовуються в аерокосмічній промисловості. Запчастини, оброблені з однозначною або субмікронною точністю, повинні бути перевірені, а скляні енкoderи дозволяють вимірювальним пристроям, таким як координатні вимірювальні машини (КВМ), виконувати це завдання.

Крім того, оптичні енкoderи пропонують більш високу роздільну здатність, ніж магнітні. Вони мають набагато менший коефіцієнт теплового розширення, тобто на шкалу практично не впливає зміна температури, що може змінити крок решіток шкали та знизити точність вимірювання. Оптичні енкoderи також можуть використовуватися у вакуумних середовищах, включаючи високі та надвисокі вакууми.

Але оптичні енкoderи все ще залишаються спеціалізованим продуктом - у більшості випадків вони використовуються лише там, де це конче необхідно. Частково це пов'язано з вартістю, але також і тому, що для оптичних енкoderів поставлені інші завдання при застосування, ніж для магнітних версій. Маючи менший крок решітки, ніж більшість магнітних кодерів, будь-які помилки в монтажі мають більш виражений вплив на точність оптичної шкали.

[9]

Рухомою частиною лінійки є зчитувальна головка, яка рухається вздовж скляної шкали з обох сторін. Конструкції сучасних зчитувальних головок стали більш продуманими. Якщо раніше, щоб встановити оптичну лінійку, потрібно було багато часу і різних пристосувань щоб виставити необхідні зазори, то зараз процес установки значно спростився.

У конструкції головки застосований принцип шарнірного з'єднання, що не виставляє жорстких вимог при установці головки щодо самої лінійки. Плюс до цього, в сучасних оптичних лінійках зчитувальна головка має завжди однаковий зазор по відношенню до скляної шкали. Це можливо за рахунок застосування в конструкції головки 5-ти підшипників, за рахунок яких вона переміщується по склу, будучи однаково притиснутою з усіх боків. Цим і забезпечується створення необхідних зазорів.

Після встановлення оптичної шкали, захист її від забруднення надзвичайно важлива. Магнітні лінійки здебільшого чутливі лише до магнітного забруднення, тоді як оптичний енкодер чутливий до будь-якого сміття, що заважає пропусканню світла. Це важливе питання, яке потребує вирішення, оскільки оптичні лінійки встановлюються на рухомі осі, де виконується робота, а це пряме джерело стружки, рідин та іншого сміття.

Раніше використовувалися оптичні лінійки відкритого типу, в яких оптична шкала не була захищена металевим корпусом, але застосування таких лінійок на даний момент вкрай нераціональне у зв'язку з їх слабким захистом від пилу та бруду. В сучасних оптичних лінійках конструкція корпусу з суцільнотягнутого дюралюмінієвого профілю. Таким чином вдається досягти високого рівня захищеності і геометричної стабільності. [10]

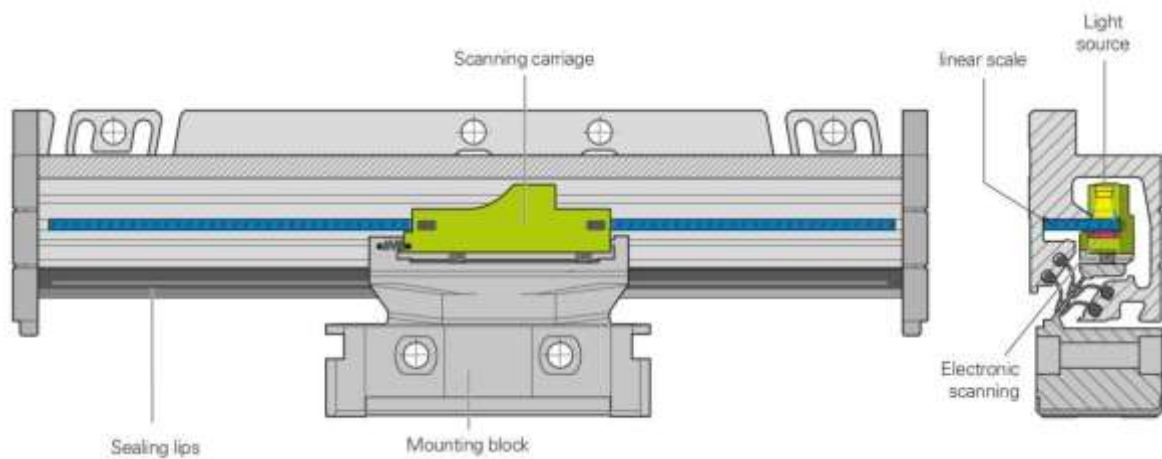


Рисунок 1.7 - Розміщення лінійки в алюмінієвій екструзії з герметичним ущільнювачами

1.1.5 Магнітні енкодери



Рисунок 1.8 - Магнітний енкодер Renishaw для абсолютного позиціонування

Одним з недоліків оптичних лінійок є те, що використання в якості вимірювача - скляної смужки, робить саму конструкцію лінійки досить чутливою. Скло, як всім нам відомо, є дуже крихким матеріалом. Тому така конструкція має обмеження по довжині (до 3 метрів).

Альтернативою є використання магнітних енкодерів.

Там, де оптичні лінійні енкодери використовують шкалу з періодичними градаціями, джерелом світла та фотодетектором для визначення положення, магнітний енкодер використовує зчитувальну головку, яка кріпиться за допомогою кронштейна до рухомої частини верстату. В конструкції вона має чутливий елемент у поєднанні зі шкалою, який фіксує при русі зміну полярності на магнітній стрічці, і перетворює її в електричний TTL сигнал. Зчитувальна головка виявляє магнітні полюси на шкалі через зміну напруги або

зміну магнітного опору. Поперединний північний і південний магнітні полюси розташовані на точній відстані, що називається кроком полюса. Зазвичай використовують крок 5 + 5 мм та 2 + 2 мм.

Шкала, що використовується в магнітних лінійних кодерах, є багатошаровою, включаючи гнучкий базовий шар з клейкою підкладкою, магнітну шкалу, а в деяких випадках - додаткові смуги із пластику або нержавіючої сталі для захисту магнітної шкали.

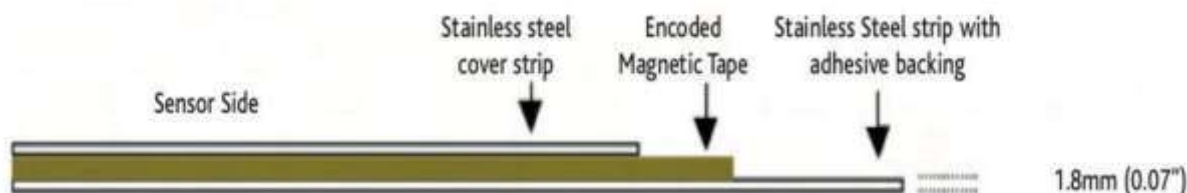


Рисунок 1.9 – Конструкція магнітного енкодера

Установка магнітної лінійки - процес досить простий, в порівнянні з установкою оптичної лінійки. Магнітна стрічка просто приклеюється на поверхню. Для установки магнітної лінійки не потрібно ідеальна геометрична поверхня (база), як для оптичних лінійок. Це дуже важливо, так як універсальні верстати з самого початку не мають підготовлених, геометрично точних поверхонь для установки вимірювальної системи. Але бувають випадки, коли поверхня, на яку буде встановлюватися лінійка ну зовсім крива. У таких випадках застосовуються так звані напрямні (Pad Strips), які кріпляться до станини верстата через регульовані по висоті опори. При чому ці напрямні є по суті каркасом для магнітної стрічки. Спочатку встановлюються, геометрично перевіряються і жорстко фіксуються напрямні, а потім в них закладається сама магнітна стрічка. Потім стрічка закривається захисною стрічкою з нержавіючої сталі. Використання такої каркасної системи дозволяє встановлювати магнітну лінійку на поверхню з перепадами по довжині до 2 см !! Трудомісткість, звичайно, дещо зростає, але це не порівняти з процесом установки оптичної лінійки аналогічної довжини. [11]

Однією з переваг магнітних лінійних енкодерів є те, що магнітна стрічка може використовуватися на великих довжинах - до 50 метрів. Але магнітне

кодування має недолік - щоб отримати остаточні результати вимірювання необхідне проходження всієї довжини кодера, а це все - витрати часу. Ось чому магнітні стрічки часто включають кодовані “опорні” позначки. Ці позначки - це магнітні полюси, які включені додатково до шкали стандартних магнітних полюсів. Опорні позначки розташовуються індивідуально (тобто їх відстань не однакове по довжині стрічки) і незалежно від стандартних магнітних полюсів. Після проходження двох опорних знаків кодер може визначити абсолютне положення на основі положення першого опорного знака,

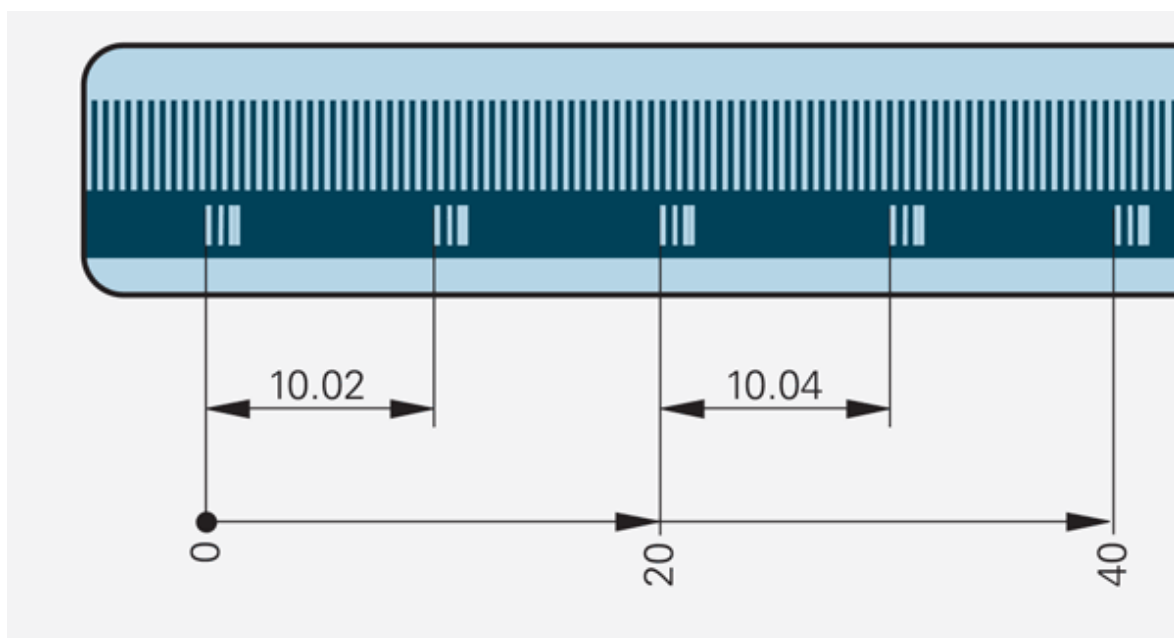


Рисунок 1.10 – Метод нанесення опорних знаків для магнітного кодування

Тут показано метод нанесення опорних знаків, що кодуються на відстані, де парні позначення парних номерів зміщуються на 1 решітний період, а будь-які дві послідовні опорні позначки, які виявляються, дозволяють машинному керуванню обчислювати, де головка зчитувача знаходиться по всій довжині кодера масштаб при запуску.

Для забезпечення абсолютного вимірювання положення магнітні кодери зазвичай використовують дві магнітні доріжки в одній шкалі - інкрементну та абсолютну доріжку. Абсолютна доріжка кодується певним малюнком, який надає кожній позиції унікальне «слово», яке зчитується датчиком. Зчитувальна голівка містить два датчики - по одному на кожну доріжку. Загальна установка використовує датчик Холла для зчитування абсолютної доріжки, а

магнітострикційний датчик для зчитування інкрементальної доріжки. При запуску кодер зчитує абсолютну доріжку для визначення її положення, а потім під час руху зчитує інкрементальну доріжку для відстеження та вимірювання позиції.

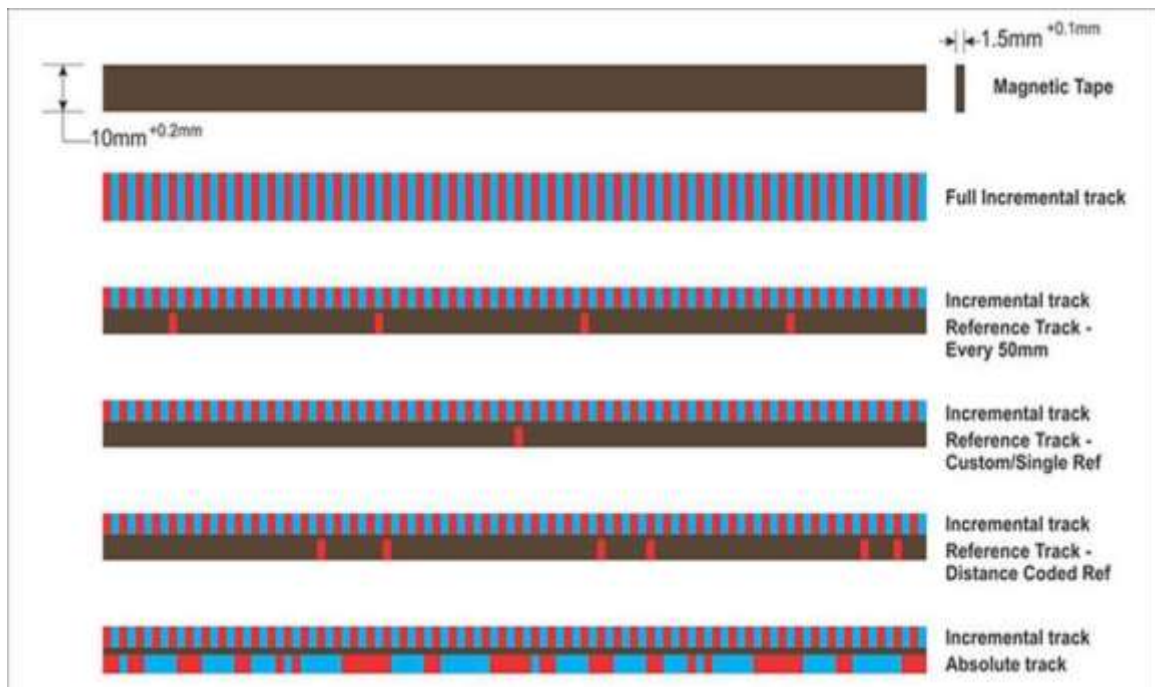


Рисунок 1.11 – Типи магнітних енкодерів (інкрементальні та абсолютна)

Технологія магнітного кодера практично усуває один з основних недоліків оптичних кодери - чутливість до бруду, пилу, рідин та інших сміття. Оскільки оптичні конструкції покладаються або на відбиття, або на заломлення світла, все, що заважає пропусканню світла, може спричинити проблеми із сигналом. Оскільки магнітні енкодери не потребують оптичного контролю для вимірювання положення, забруднення не впливає на їх продуктивність. (Виняток становлять будь-які магнітні забруднення або навколишнє середовище, які будуть перешкоджати здатності магнітного кодера вимірювати положення.) Крім того, оптичні енкодери вимагають збереження невеликого повітряного зазору - зазвичай в межах 0,25 мм. між шкалою і детектором, і цей зазор може бути порушений вібраціями або ударами. [12]

1.2 Точність позиціонування верстатів

Верстати з числовим програмним управлінням стали невід'ємним елементом в машинобудуванні. На універсальних верстатах загального призначення точність обробки визначається як самим станком і технічною системою, так і в значній мірі кваліфікацією оператора. Точність обробки на верстатах з ЧПУ залежить від точності верстата, технологічної системи і системи ЧПУ і в значно меншій мірі точність обробки залежить від кваліфікації оператора. Тому для верстатів з ЧПУ дуже важливо оцінити точність виходу вузлів в задану точку, це є оцінкою впливу на точність обробки складових елементів механічної та електронної частин верстата. [13]

1.2.1 Поняття точності позиціонування

Нові та відремонтовані верстати піддаються перевірці на відповідність вихідних параметрів по точності вимогам стандартів. Зазвичай перевіряються геометричні параметри верстатів і жорсткість вузлів. У верстатах з ЧПУ, крім зазначених, піддається перевірці параметр точності позиціонування $D_{\text{поз.}}$, під яким розуміється відхилення дійсного стану робочого органу верстата x_i від заданого керуючою програмою $x_{\text{прог}}$. При багаторазовому двосторонньому позиціонуванні робочого органу в заданій точці по одній з координатних осей (рис. 1.12) застосовується метод статистичної оцінки точності позиціонування. У цьому випадку її величина оцінюється за результатами ряду повторних випробувань з визначенням їх статистичних характеристик: середнього арифметичного значення \bar{X}_n (при підході з правого боку) і (при підході з лівого боку) і середнього квадратичного відхилення відповідно σ_n і σ_d .

Багаторазовий підхід до заданої точки з одного боку називається параметром повторюваності позиціонування, а багаторазовий підхід з двох сторін дозволяє визначити зону нечутливості f (рис. 1.12), що виникає в результаті наявності зазорів в кінематичних ланцюгах. У верстатах з ЧПУ з імпульсним заданням величин переміщень крім перерахованих параметрів точності позиціонування (точність позиціонування при підході з двох сторін, з одного

боку, повторюваність позиціонування, зона нечутливості) актуальною є перевірка відпрацювання системою одиничних імпульсів. [13]

1.2.2 Чинники, що впливають на точність позиціонування

Точність позиціонування формується механічними параметрами верстата і його системою управління і залежить від багатьох факторів: точності кінематичних ланцюгів привода, [15] похибки блоків і елементів пристрою ЧПК, похибки приводу подачі (двигуна і передавальних механізмів), геометричних похибок верстата, похибок датчиків зворотних зв'язків та ін. В ході експлуатації верстата з ЧПК на точність позиціонування постійно мають вплив зовнішні параметри - вібрації, теплові деформації, механічний знос направляючих верстата, накопичення механічних змін в елементах пристрою ЧПК та ін. [13]

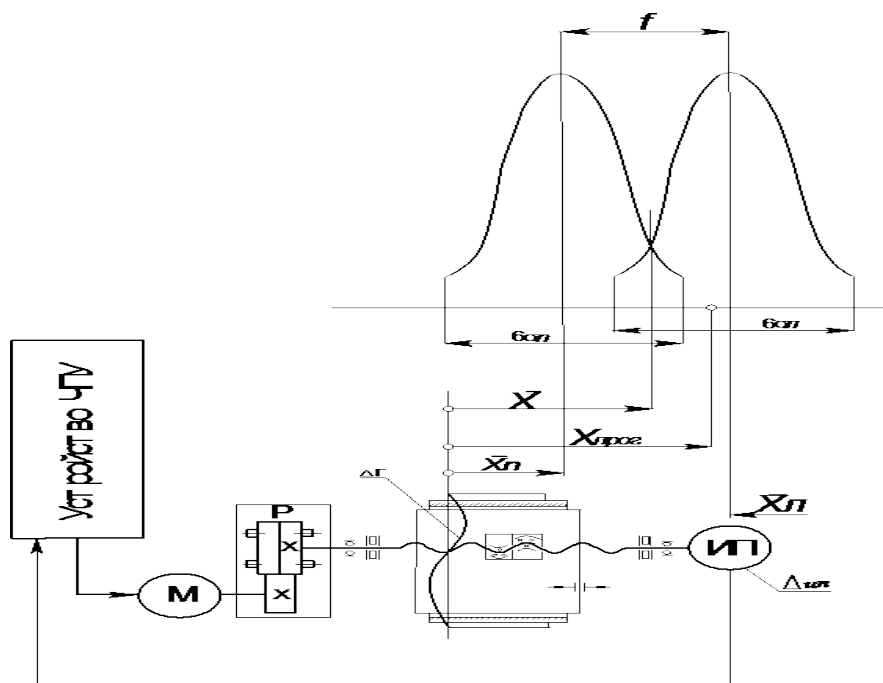


Рисунок 1.12 - Схема освіти похибки позиціонування

1.2.3 Вплив системи ЧПК

Найважливішою частиною верстата з ЧПК є сама система числового програмного керування, яка визначає його технологічні можливості, а також точність і надійність роботи.

Верстати з ЧПК в залежності від технологічних завдань управління обробкою можуть оснащуватися позиційною, контурною або комбінованою системою ЧПК.

Позиційні системи ЧПК забезпечують повернення інструменту в задану точку. При цьому переміщення при постійній швидкості вздовж різних осей координат можуть виконуватися одночасно або послідовно.

З огляду на високу точність координатних переміщень, стіл верстата на останній ділянці переміщається на більш повільній швидкості. У цей момент на точність позиціонування діють сили тертя (в напрямних, в передачі гвинт-гайка і ін.)

Аналогічними системами оснащуються свердлильні й розточувальні верстати для обробки деталей типу плит, фланців, кришок та ін.

Контурні системи отримують задану траєкторію руху інструменту за допомогою інтерполятора між двома заданими точками за рахунок витримування з необхідною точністю зміни миттєвих швидкостей за двома або більше координатами. Контурними системами ЧПК оснащують в основному токарні та фрезерні верстати.

Система числового програмного керування буває розімкнутого і замкнутого типу.

Розімкнені системи ЧПК будують на основі застосування силових або несилових крокових електродвигунів (КД). В останньому випадку КД використовують в комплекті з гідروпідсилювачем ГП (рис. 1.13). Через відсутність контролю дійсного стану робочого органу верстата, незважаючи на простоту цих систем, на точність переміщення в них будуть впливати похибки крокового електродвигуна, гідропідсилювача і передавальних механізмів приводу подач (зубчастої передачі, пари гвинт-гайка і ін.).

В основі роботи замкнутих систем ЧПК лежить принцип роботи систем управління відстеження. Замкнені системи ЧПК поділяються на два основних типи.

У системах ЧПК першого типу (рис. 1.14) проводиться непряме

вимірювання положення робочого органу за допомогою кругового вимірювального перетворювача ВП (датчика зворотного зв'язку), встановленого на ходовому гвинті. Для цього типу замкнутих систем ЧПК пред'являються високі вимоги до точнісних характеристик передачі гвинт-гайка (точність виготовлення, жорсткість, відсутність зазорів), яка в цьому випадку не охоплюється зворотним зв'язком. Застосування ж в приводах подач верстатів з ЧПК точно виготовлених кулькових гвинтових пар і створення в них попереднього натягу для усунення зазорів і збільшення жорсткості дозволяють широко застосовувати замкнуті системи ЧПК з розташуванням ВП на ходовому гвинті (рис. 1.14). [13]

Другий тип системи з ЧПК з лінійним ВП (рис. 1.15) забезпечує безпосереднє вимірювання переміщення робочого органу верстата. Це дозволяє охопити зворотним зв'язком всі передавальні механізми приводу подачі, що забезпечує більш високу точність переміщень. [16] Однак лінійні ВП складніше і дорожче, ніж кругові ВП. Його габарити залежать від довжини робочого органу верстата. Крім того, на точність роботи даних ВП можуть впливати похибки верстата (наприклад, знос направляючих, теплові деформації і тд.). [13] [14]

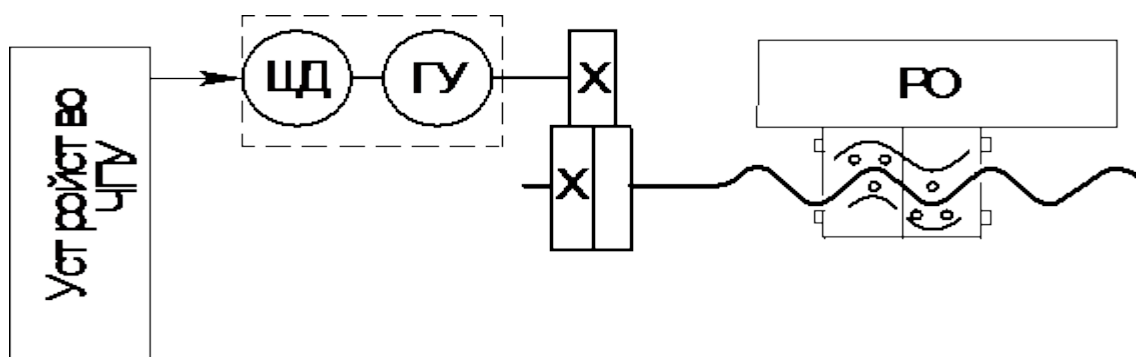


Рисунок 1.13 – Розімкнена система ЧПУ

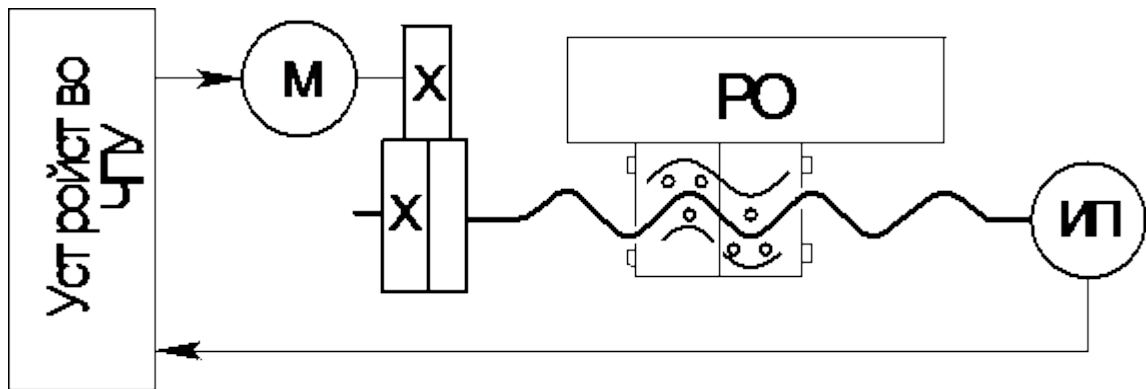


Рисунок 1.14 – Замкнена система ЧПК з датчиком, розміщена на ходовому гвинті

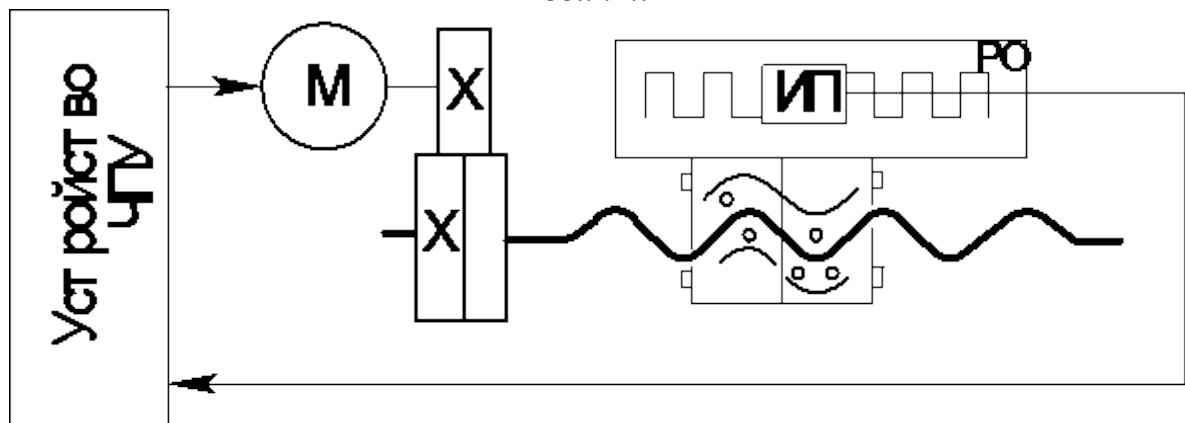


Рисунок 1.15 – Замкнена система з ЧПК з безпосереднім вимірюванням положення робочого органа (РО)

1.2.4 Вплив на точність позиціонування механіки верстата

Основними причинами, які можуть знижувати точність позиціонування верстатів з ЧПК, є похибки геометричних параметрів верстата (непрямолінійність переміщення робочого органу, непаралельність його переміщення щодо осі шпинделя і ін.), інерційність вузлів і сили тертя в напрямних, похибки передач, наявність зазорів, осьова жорсткість приводу подач.

Направляючі верстатів з ЧПК повинні забезпечувати високу точність переміщення і стабільність положення робочих органів верстата, їх рівномірне переміщення (особливо на малих швидкостях). Нерівномірність переміщення РОВ на малих швидкостях визначається різницею сил тертя спокою і руху. Різниця коефіцієнтів тертя спокою і руху для звичайних напрямних при звичайному змащенні становить в середньому 0,09. Знижують

коефіцієнт тертя за рахунок застосування спеціальних пластмасових синтетичних матеріалів, антифрикційних металів, а також за рахунок застосування напрямних кочення. Останні застосовують в легких і середніх верстатах з ЧПК, коли необхідний швидкий і точний вихід в задану позицію (наприклад, в багатоопераційних верстатах з ЧПК). Маючи малий коефіцієнт тертя спокою і руху, що дорівнює 0,005, що направляючі кочення забезпечують рівномірне переміщення при низьких і високих швидкостях, високу точність повторюваності виходу в задану позицію. [13] [16]

1.3 Порівняння вертикально-фрезерних верстатів з ЧПК різних виробників

1. Okuma

Фрезерні вертикальні обробні центри серії MB-V - це обладнання нового покоління з широким спектром можливостей. Завдяки своїм конструктивним особливостям, підвищеної жорсткості і прецизійної точності верстата цієї серії надійно працюють як при чорновому силовому, так і при чистовому високошвидкісному фрезеруванні. Можливість установки на верстатах керованого від ЧПУ поворотного столу і забезпечення тим самим додаткової четвертої координати дозволяє з одного установа обробляти деталь з декількох сторін. Можливість використання на верстаті в процесі обробки вимірювальної головки, автоматична настройка «нуля», автоматична компенсація зносу інструменту, точності параметри верстата дозволяють гарантовано забезпечувати високі технічні вимоги, що пред'являються до виготовлення точних деталей. [24]

Виробник	Okuma
Модель	MB-46VA
Країна	Японія
Розмір робочої поверхні столу	760 x 460 мм
Номінальна потужність приводу обертання головного шпинделя	7,5 кВт
Частота обертання шпинделя	8000 об/хв
Точність позиціонування верстат	$\pm 0,004$ мм
Повторюваність позиціонування	$\pm 0,0015$ мм



Рисунок 1.16 – Інформація про верстат Okuma MB-46VA

2. Hurco

3-осьові обробні центри серії VM відрізняються невеликими габаритами самого верстату й великим розміром деталей, що можна обробити на них. Цей ефективно спроектований фрезерний центр має шпиндельну систему Big Plus і працює на базі програмного забезпечення WinMax, що є ключем до поліпшення рентабельності одиничних виробництв, тому що ця система управління робить дрібносерійне / багатомоделювальними виробництво економічним, скорочуючи час на переналагодження і програмування. [25]

Виробник	Hurco
Модель	VM-10i-HSI
Країна	США
Розмір робочої поверхні столу	760 x 405 мм
Номінальна потужність приводу обертання головного шпинделя	8,5 кВт
Частота обертання шпинделя	12 000 об/хв
Точність позиціонування верстату	$\pm 0,01$ мм
Повторюваність позиціонування	$\pm 0,005$ мм



Рисунок 1.17 – Інформація про верстат Hurco VM-10i-HSI

3. Kitamura

Особливі характеристики верстатів компанії Kitamura серії Mycenter:

- висока точність позиціонування $\pm 0,002$ мм;
 - всі поверхні елементів конструкції обробляються шабруванням вручну з метою досягнення ідеального прилягання поверхонь;
 - верстати, сконструйовані згідно концепції TGA - True Geometric Accuracy - справжня геометрична точність, яка виходить із конструкції верстата і доводки поверхонь, а не введення корекцій;
 - за рахунок міцних чавунних виливків - прекрасне поглинання вібрацій.
- [26]

Виробник	Kitamura
Модель	Mycenter 3020g
Країна	Японія
Розмір робочої поверхні столу	860 x 500 мм
Номінальна потужність приводу обертання головного шпинделя	7,5 кВт
Частота обертання шпинделя	15 000 об/хв
Точність позиціонування верстат	$\pm 0,002$ мм
Повторюваність позиціонування	$\pm 0,001$ мм



Рисунок 1.18 – Інформація про верстат Kitamura Mycenter 3020g

4. Doosan

Верстати Doosan серії DNM мають станину підвищеної жорсткості, що забезпечує максимальні режими різання при відсутності вібрацій. Максимальна вага інструменту - 8 кг і рекордний час заміни інструменту (інструмент-інструмент) - 1,3 с.

Виробник	Doosan
Модель	DNM 400 II
Країна	Південна Корея
Розмір робочої поверхні столу	920 x 435 мм
Номінальна потужність приводу обертання головного шпинделя	11 кВт
Частота обертання шпинделя	8 000 об/хв
Точність позиціонування верстат	$\pm 0,005$ мм
Повторюваність позиціонування	$\pm 0,002$ мм



Рисунок 1.19 – Інформація про верстат Doosan DNM 400 II

5. HAAS

Верстати серії VF оснащені безредукторним шпинделем HAAS з прямим приводом і швидкістю обертання 8100 об/хв, забезпечуючи високу якість обробки, неперевершену температурну стабільність і безшумну роботу. [27]

Виробник	HAAS
Модель	VF-2
Країна	США
Розмір робочої поверхні столу	914 x 356 мм
Номінальна потужність приводу обертання головного шпинделя	22,4 кВт
Частота обертання шпинделя	8 100 об/хв
Точність позиціонування верстат	$\pm 0,005$ мм
Повторюваність позиціонування	$\pm 0,0025$ мм



Рисунок 1.20 – Інформація про верстат HAAS VF-2

1.4 Координатно-вимірювальні машини

Координатно-вимірювальна машина (КВМ) - програмно-технічний комплекс, який використовується в галузях виробництва для контролю геометричних параметрів готових виробів, заготовок, інструменту, оснащення і т. д. Робота КВМ заснована на почерговому вимірі координат певного числа точок поверхні деталі і подальших розрахунках лінійних і кутових розмірів, відхилень розміру, форми і розташування у відповідних системах координат. [19]

Сучасні КВМ можуть виміряти будь-які деталі, навіть тривимірні, як турбінні лопатки. Причому КВМ можуть сформулювати не тільки необмежену кількість розмірних вимірів, такі як відхилення форми і положення, але і побудувати цифрову і графічну модель деталі.

Основними компонентами, що забезпечують роботу КВМ є інкрементні лінійні енкодери, датчик торкання і числове програмне забезпечення. Не можна виключити і інші важливі компоненти КВМ – кам'яний стіл, портал і піноль, регульовані електроприводи - лінійні, аеростатичні напрямні та ін. [20]

Компоновка КВМ

Компонування КВМ в значній мірі визначається вимогами до конструкції та параметрами основних вузлів. У свою чергу - компоновка залежить від габаритних розмірів, маси і типу вимірюваних деталей; розташування вимірюваних поверхонь; необхідного числа координатних переміщень, заданої точності і продуктивності процесу вимірювання; застосовуваних компонентів і вузлів КВМ; умов експлуатації та взаємодії КВМ з іншим технологічним обладнанням.

Компонування КВМ, призначеної для вирішення певних завдань, повинна оптимально задовольняти наступні вимоги:

- мінімальне відхилення по принципу Аббе (принцип виключення компараторної похибки). За цим принципом еталонний елемент пристрою повинен бути розташований співвісно з деталлю, яку

вимірюють. В такому випадку похибка взаємного лінійного розташування еталонного і робочого елемента при виникненні повороту деталі (зазорів, похибки форми, деформацій і тд) зменшуються. [21]

- забезпечення оптимальних динамічних властивостей; зменшують деформацій вузлів КВМ, що залежать від їх маси і швидкості переміщень;
- наявність відкритого з вимірювального простору, що забезпечує зручність установки деталі і хорошу її видимість в процесі вимірювання.

Єдиної класифікації компоновок КВМ немає, але умовно їх поділяють на кілька груп:

- КВМ з нерухомою в процесі вимірювання деталлю (столом). Компонування з нерухомою деталлю більш універсальні;
- КВМ з рухомою деталлю (столом);

На сьогодні різноманіття КВМ дуже широке, вони мають різні конфігурації і призначення.

Умовно можна виділити наступні варіанти виконання КВМ:

- консольні малогабаритні КВМ
- порталні КВМ;
- машини для контролю тіл обертання з вертикальним розташуванням деталі з поворотним столом;
- машини стоечного типу - одна чи дві стійки;
- машини мостового типу;
- портативні мобільні машини типу «Рука».
- порталні КВМ

Хоча всі порталні КВМ (рис. 1.21) мають ідентичну конструкцію, але існують багато варіантів дизайну. Найпоширеніші набору вузлів і компонентів порталних машини:

- аеростатичні або кулькові напрямні;

- електропривод;
- інкрементальні лінійні оптоелектронні перетворювачі;
- датчик дотику або лазерний сканер;
- поворотна головка для установки датчика торкання;
- змінні щупи;
- датчики температури
- демпфери;
- програмне забезпечення;
- комп'ютер;
- компресор і блок підготовки повітря для живлення аеростатичних напрямних;
- калібрувальні зразки, наприклад, сфера. [20]

Портальні КВМ

Портальні КВМ (рис. 1.21) є найбільш точними і найпоширенішими машинами. Ці КВМ представлені рядом різноманітних конфігурацій. Вони мають високу жорсткість основних вузлів, точність, хороші динамічні властивості і хороший огляд в процесі вимірювання. [19] Вони теж складаються з приблизно однакового набору вузлів і компонентів. Крім перерахованого вище набору компонентів портальні машини мають:

- основа;
- вимірювальний стіл;
- портал;
- піноль.



Рисунок 1.21 - Портальна КВМ

Стіл для вимірювань

В сучасних КВМ стіл виготовляється з цільного шматку граніту, зазвичай чорного кольору або граніту і прокладки з пористого алюмінію. Чим більше діапазон виміру КВМ, тим товща і важча плита. Плита з граніту має невеликий коефіцієнт температурного розширення. Поверхня плити - з доводкою і має відхилення від площинності не більше 2 мкм / м. В неї вкручують різьбові втулки для кріплення вимірюваних деталей, еталонів та ін. Товсті плити з граніту і плити з граніту і пористого алюмінію добре амортизують зовнішні коливання і вібрації.

Портал

Портал виготовляється з кераміки, міцного алюмінієвого сплаву або граніту. Це забезпечує високу жорсткість порталу. Портал з алюмінієвого сплаву має невелику вагу, що забезпечує хорошу динаміку КВМ. Крім того, алюміній швидко приймає температуру навколишнього середовища, що знижує температурні похибки. Портал переміщається по вимірювальній плиті на аеростатичних замкнутих напрямних.

Піноль

По верхній перекладині порталу на аеростатичних напрямних переміщається каретка. У середині неї вертикально переміщається чотиригранна

гранітна піноль (координата Z), встановлена на аеростатичних замкнених підшипниках. На кінці пінолі встановлена вимірювальна головка з датчиком торкання. Піноль з кераміки або граніту має високу жорсткість низький коефіцієнт лінійного розширення і хорошу температурну стабільність.

Більшість фірм використовують в конструкції КВМ різні матеріали, наприклад, сталь для опор, кераміку для моста і колони по осі Z . Значні відмінності у фізичних властивостях цих матеріалів один від одного, наприклад, в коефіцієнті теплового розширення, негативно впливають на точність вимірювань. Для компенсації цього доводиться використовувати додаткові датчики, що стежать за температурою різних вузлів машини і зміною їх розмірів. Отримані від датчиків дані треба обробити і ввести поправку на вимірювання. Все це призводить до ускладнення конструкції і системи управління, збільшує вартість вимірювальної машини, і призводить до посилення і без того строгих вимог до приміщення.

Деякі фірми виготовляють вузли КВМ з вуглепластика.

У порівнянні, наприклад, з алюмінієм вуглепластик має в 14 разів більшу межу міцності при розтягуванні, в 19 разів менший коефіцієнт теплового розширення, в 5 разів більше модуль пружності, і при цьому його питома вага майже в два рази менше.

Одностосєчні КВМ

Одностосєчні КВМ (рис.1.22) випускають давно і є кілька варіантів їх конструкцій. Зазвичай одностосєчна КВМ складається з колони, яка переміщується вздовж плити на аеростатичних або кулькових направляючих. Це координата X . По колоні також на аеростатичних направляючої переміщається опора (координата Z), по якій на аеростатичних направляючої горизонтально переміщається квадратна піноль (координата Y). На кінці пінолі встановлений датчик дотику. Іноді плити немає, а напрямні розташовані на рівні підлоги. Перевага одностосєчних КВМ в тому, що весь робочий простір відкрито для завантаження контрольованої деталі і доступно оператору. Для контролю великогабаритних деталей, наприклад, кузовів автомобілів

встановлюють дві таких КВМ, а між ними розташоване робочий простір, куди можна помістити, наприклад, кузов автомобіль. Одностоечні КВМ мають більш низьку точність в порівнянні з порталними КВМ і досить високу ціну через великі габарити. Останнім часом великого поширення набули портативні КВМ, що складаються з поворотних сполучень, що мають великий напівсферичний робочий простір до 4,5 м і значно нижчу ціну. Можливо, портативні КВМ частково витіснять одностоечні КВМ. [20]

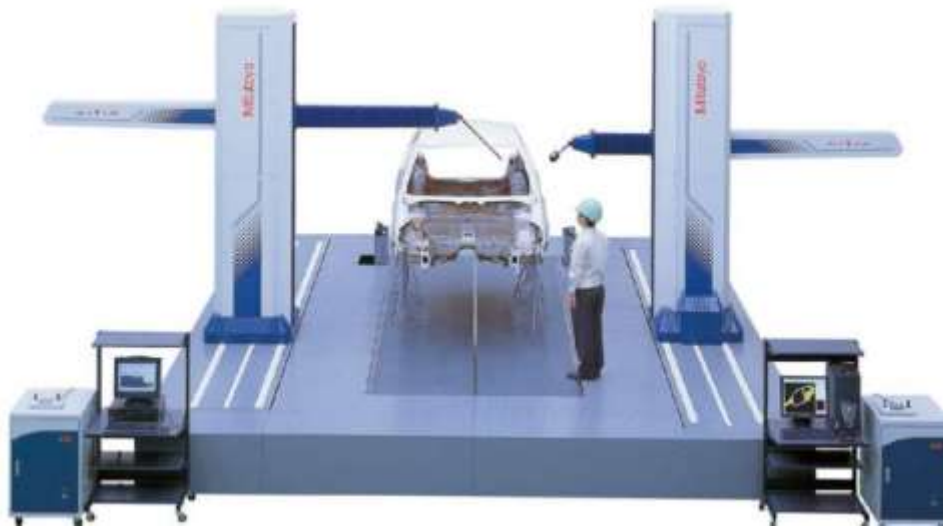


Рисунок 1.22 - Одностоечні КВМ

Мостові КВМ

Мостові КВМ (рис. 1.23) призначені для вимірювання великогабаритних деталей, вузлів і цілих виробів. У цих КВМ каретка з піноллю переміщається по рухомій траверсі, обома своїми кінцями базуючись на горизонтальних нерухомих балках, які на колонах підняті над столом для установки деталі. Привод і датчики переміщення траверси кріпляться до однієї з балок. КВМ такого компонування має обмежений доступ для завантаження деталей і контролю вимірювань. Мостова компоновка дозволяє отримати меншу в порівнянні з іншими компоновками масу рухомих вузлів при високій жорсткості і стійкості. Ці машини трудомісткі у виготовленні, коштовні і тому, можливо, частково будуть замінені портативними КВМ.



Рисунок 1.23 - Мостові КВМ

Консольні КВМ

Консольна компоновка - такі машини відрізняються наявністю горизонтальної, рухомої по одній або двом горизонтальним осях консолі і кращим в порівнянні з порталної компонованням - доступом для установки деталі. Однак такі КІМ дуже чутливі до зміни маси вузлів, рухомих щодо консолі. Висока точність і динамічність таких машин досягається за рахунок використання інноваційних матеріалів з високою міцністю і малою масою. Дана компоновка використовуються для КІМ середніх і малих габаритів. [19]

Кріплення деталей на КВМ

При вимірюванні деталей на КВМ легкі деталі складної конфігурації необхідно надійно закріпити, в уникненні їх зсуву при рухах столу або від випадкових причин. Для кріплення деталей випускають багато спеціальних пристосувань (рис. 1.24).

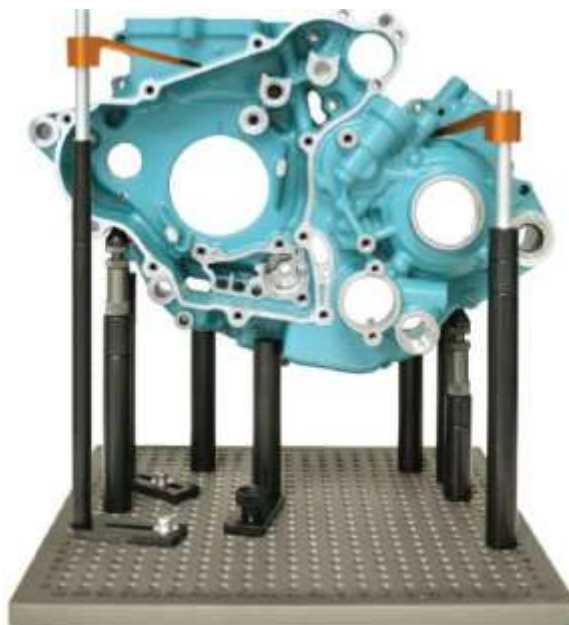


Рисунок 1.24 - Приклад кріплення деталі на КВМ

У багатьох випадках установку і закріплення контрольованих деталей роблять так, щоб щупу датчика торкання були доступні всі контрольовані поверхні. Особливість установки і кріплення деталі на КВМ полягає в тому, що не потрібно виставляти контрольовану деталь за координатами машини. Програмне забезпечення КВМ зробить віртуальне базування - процедуру, яка полягає в розрахунку, розташування системи координат деталі (СКД) по попередньо виміряним в системі координат машини (СКМ) точках базових елементів деталі і подальшої трансформації координат точок інших елементів деталі з СКМ в СКД. При кріпленні деталей, особливо з легких сплавів необхідно стежити за тим, щоб не деформувати деталь при загвинчування кріпильних елементів. Для цього застосовують динамометричні ключі. [20]

Порівняння координатно-вимірювальних машин різних виробників

1. MORA

Новий тип порталних вимірювальних машин, КВМ Primus - це результат інтенсивного розвитку в області сучасних інженерних технологій. Вимірювальна машина нового покоління представлена в полегшеній конструкції і з поліпшеним високо динамічним двигуном. Primus має високоточну систему, з поліпшеними динамічними характеристиками двигуна в сучасному стилі. Компактна конструкція машини і закриті направляючі гарантують захист від бруду і пилу. [29]

Виробник	MORA
Модель	Primus 575
Країна	Німеччина
Тип КВМ	Портальний
Режим роботи	Автоматичний
Розмір робочої поверхні столу, мм X x Y x Z	500 x 700 x 500
Максимальне навантаження на стіл, кг	800
Точність МРЕе, мкм (при $t_{\circ} = 18-22 \text{ C}$)	$1,7+L/300$



Рисунок 1.25 – Інформація про КВМ MORA Primus 575

2. ABERLINK

Швидка, точна і надійна автоматична координатно-вимірювальна машина Ахіом ТОО з ЧПУ випускається в 4 модифікаціях в залежності від довжини столу і діапазону вимірювань по осі Y до 1500 мм. Повністю алюмінієва конструкція порталу забезпечує не тільки низьку інерцію і високе прискорення, а й швидке прийняття температури навколишнього середовища, що ідеально, якщо машина використовується в приміщенні з нестабільними температурними

умовами. Температурна компенсація програмного забезпечення призводить всі результати вимірювань до значень, як якщо б вони проводилися при температурі 20 ° С. Високотехнологічний стіл з граніту і пористого алюмінію забезпечує оптимальне гасіння високочастотної вібрації, а гранітна напрямна осі Y, затискають повітряними підшипниками порталу в обох напрямках, забезпечує максимальну точність.

Програмне забезпечення Aberlink 3D власної розробки є лідером по простоті використання і ідеально підходить як для початківців користувачів, так і для професіоналів метрології. [30]

Виробник	ABERLINK
Модель	АХІОММ ТОО
Країна	Великобританія
Тип КВМ	Портальний
Режим роботи	Автоматичний
Розмір робочої поверхні столу, мм X x Y x Z	640 x 900 x 500
Максимальне навантаження на стіл, кг	300 (500)
Точність МРЕе, мкм	2,1+0,4L/100



Рисунок 1.26 – Інформація про КВМ ABERLINK AXIOMM TOO 640 x 900 x 500

3. Мікротех

В КВМ застосовані ряд інноваційних розробок:

- переміщення рухомих частин КВМ проводиться на аеростатичних опорах, що дає можливість досягти швидкість переміщення 300мм/с.
- робочий стіл виготовлений з високоякісного граніту з отворами для кріплення деталей;

- в стандартній комплектації ручних машин використовується система щупів Renishaw

Програмне забезпечення CMM Manager (США) дає широкі можливості для вимірювання геометричних параметрів площин, кіл, кривих, циліндрів, конусів, деталей зі складним рельєфом, зубчастих коліс, просторових ділянок; проведенні кутових вимірювань; побудови 3D моделі вимірюваного виробу; контроль відхилень параметрів деталі від шаблону. [31]

Виробник	<u>Мікротех</u>
Модель	КВМ-685А
Країна	Україна
Тип КВМ	Портальний
Режим роботи	Автоматичний
Розмір робочої поверхні столу, мм X x Y x Z	500 x 800 x 600
Максимальне навантаження на стіл, кг	800
Точність МРЕе, мкм	4+L/200



Рисунок 1.27– Інформація про КВМ Мікротех КВМ-685А

Переваги та недоліки використання КВМ

Основні переваги використання КВМ для вимірювання деталей:

- Економія часу та коштів - Після того, як виробництво функціонального прототипу або деталі завершено, успіх результату повністю залежить від точності деталі. Оскільки передові технології виготовлення стають здатними виробляти більш складні об'єкти, такі вимірювальні технології, як машини КВМ, є надзвичайно важливими. КВМ можуть швидко і надійно виміряти деталі і в кінцевому рахунку скорочуючи виробничі витрати і час.
- Гарантія забезпечення якості. Хоча є різні інструменти, які дозволяють цифровим чином виміряти та проаналізувати деталь, дуже мало пропонують додаткові опції, яку забезпечує КВМ, такі як: розмірний аналіз, порівняння САД, сертифікація інструментів, щоб впевнено перевірити кожен аспект продукції.
- Універсальний з декількома зондами та технікою - Хоча складні деталі та вузли можуть здатися важкими для вимірювання, машини КВМ можуть працювати з набором зондів та інструментів, які можна адаптувати для точної фіксації розмірів конструкції.

Хоча КВМ, безумовно, відіграють важливу роль у виробничому процесі, є кілька недоліків, які слід враховувати, перш ніж почати використовувати цей метод. Ось декілька факторів, які необхідно врахувати перед використанням КВМ:

- Зонд повинен торкатися об'єкта. Зонд, який використовується на і КВМ, необхідний для фізичного контакту з об'єктом для проведення вимірювань. Хоча це не може бути проблемою для прототипів і жорстких деталей, але це може потенційно пошкодити делікатні поверхні.
- Необхідно вибрати правильний зонд. Існують різні типи зондів, які можна використовувати з машиною КВМ залежно від деталі, яка буде виміряна. Кожен стилус має різну функціональність, коли

справа стосується вимірювання різноманітних конструктивних особливостей та розмірів. Але, на жаль, ціна стилусів “кусається”, тому наявність у своєму арсеналі декількох видів доступна лише заможним підприємствам.

- При перенесенні деталей (верстат-КВМ-верстат), наприклад, коли потрібно продовжити обробку, формуються похибки перебазування, закріплення і так далі. Всі ці похибки можуть накопичуватися і потім точність обробки падає. Можливий варіант зменшення цих похибок за рахунок професійності оператора. [22]
- Точність КВМ напряму залежить від температури приміщення, де вона знаходиться. На більшості КВМ, щоб отримати заявлену точність, необхідно створити лабораторні умови. Зміни температури мають негативний вплив на шкали, вимірювані деталі та елементи самої машини - викликають їх звуження чи розширення, і, навіть, паплюження результатів нелінійного характеру. Так, на КВМ часто передбачені можливості компенсації цих змін, але в умовах вимірювання в цеху, де слідкувати за температурою - завдання нереальне, призводять до суттєвої невизначеності вимірювань. Тому, надзвичайно важливо розуміти як саме впливає зміна температури на результат.

Зазвичай, виробники КВМ намагаються знайти вихід з цієї ситуації, вказуючи похибки в декількох температурних діапазонах.

Для умов, в яких відсутній достатній контроль температури, потрібен більш детальний опис залежності точності КВМ від змінних температур навколишнього середовища. Більш реальною альтернативою опису процесу є визначення точності у вигляді безперервної функції навколишньої температури.

Більш реальний результат видно далі, коли ми відобразимо на одному графіку попередній гіпотетичний приклад, в якому робочий діапазон представлений у вигляді декількох широких температурних діапазонів.

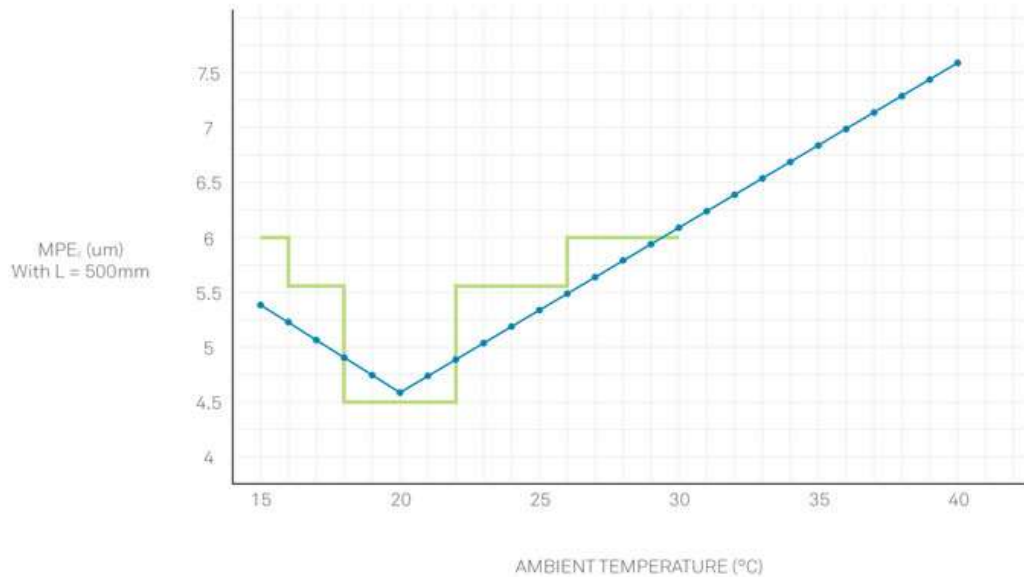


Рисунок 1.28 - Температурні характеристики

Крім того, що безперервна характеристика дає більш точну картину похибки КВМ при коливанні температури, ця характеристика є способом визначення характеристик точності машини і особливо добре підходить для використання в складанні автоматизованих звітів результатів вимірювання. [23]

Розглянемо далі ще один дуже популярний спосіб вимірювання деталей, але уже на верстатах з ЧПК – вимірювання за допомогою контактних датчиків.

1.5 Принцип роботи та конструкція вимірювальних щупів

Датчики, що встановлюються на верстатах, часто називають тригерними контактними датчиками (або датчиками торкання): в них реалізована система спрацьовування при контакті вимірювального наконечника (щупа) датчика з деталлю при її вимірі або установці. Ступінь повторюваності спрацьовування є дуже високою.

При спрацьовуванні датчик посилає сигнал в систему управління через інтерфейс, і система управління (майже одночасно) автоматично фіксує положення верстата по його енкодер (система зворотного зв'язку)(рис. 1.26).



Рисунок 1.29 – Схема роботи контактної системи вимірювання

Після реєстрації координат точки датчик переміщується далі для спрацьовування в іншому місці. після реєстрації декількох точок стає відомою форма елементів і профілю деталей. Мінімальна кількість точок, в яких потрібно виконати вимір в разі елемента кожного типу (рис. 1.27), визначається відомими ступенями свободи даного елемента.

При вимірах виконується заміна елемента деталі його теоретичною моделлю, наприклад, окружністю або тривимірним кутовим елементом. порівняння фактичного і розрахункового розмірів дозволяє визначити відхилення і виконати точний, вичерпний контроль. Результуючий зворотний зв'язок є основою наступних видів контролю: профілактичного, що прогнозує,

активного і інформативного, які необхідні для забезпечення комплексного ефективного контролю технологічних процесів[28].

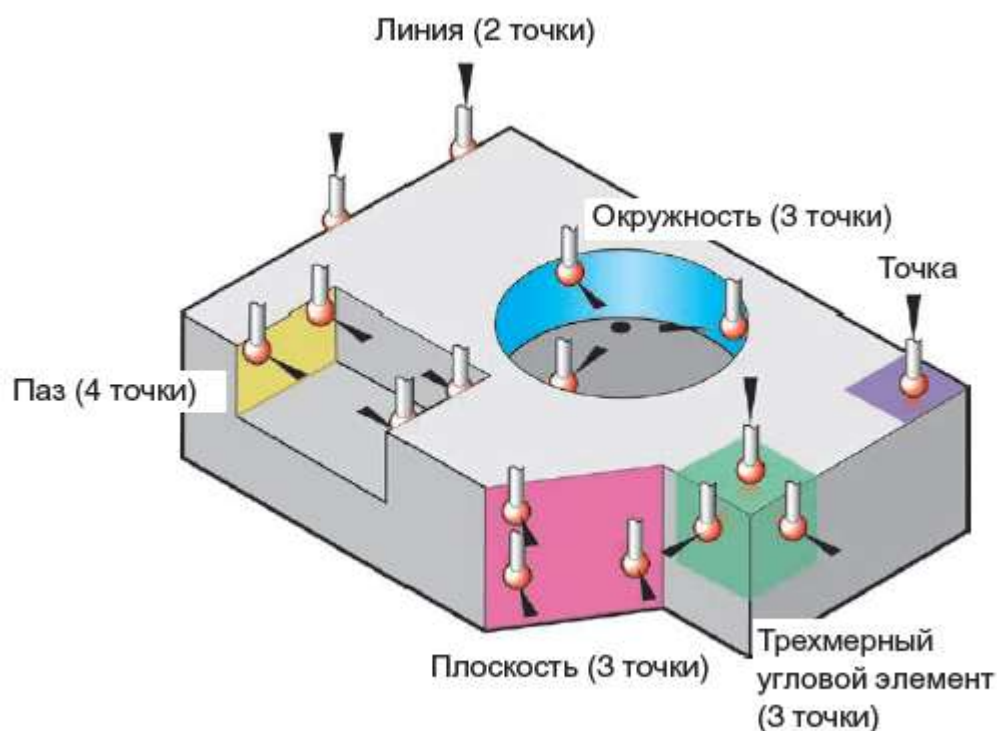


Рисунок 1.30 – Схема отримання даних про поверхню

1.5.1 Аналіз вимірювальних щупів фірми Renishaw

Верстати обладнані надсучасними вимірювальними пристроями, такими як трикоординатні щупи різноманітних фірм Renishaw, Blum, Amikr, що дозволяють виконувати будь-які вимірювання поверхонь деталей безпосередньо на столі верстату.

Компанія Renishaw пропонує рішення для налагодження інструменту, виявлення несправного інструменту, установки заготовок, вимірювання розмірів заготовки в процесі обробки і контролю перших оброблених після переналагодження верстата деталей з автоматичним оновленням параметрів корекції.

Протягом більше 40 років Renishaw випускає інновації, що стали віхою в промисловій метрології. З оригінального сенсорного тригерного зонду та

автоматичних індексних головок, повторюваних стилусів і модульних систем сканування, датчики Renishaw для координатних вимірювальних машин (КВМ) є галузевим стандартом.

Діапазон вимірювання осей являє собою найбільшу ступінь зміни вимірювання, яку коли-небудь вводили, забезпечуючи безпрецедентну швидкість та гнучкість вимірювань, одночасно уникаючи компромісів швидкості та точності, властивих звичайним методам. Чи є сканування REVO або сенсорний тригер PH20, осі системи підвищують пропускну здатність вимірювань, мінімізують час очікування та дають виробникам більш повне уявлення про якість своєї продукції[28].

OMP40-2 - Надкомпактний трьохкоординатний контактний тригерний датчик з оптичною системою передачі сигналу. Призначений для контролю прив'язки деталі на мало-і середньогабаритних оброблюючих центрах, а також на верстатах для швидкісної механічної обробки з малими шпинделями типу HSK і малими конусними шпинделями (рис 1.28).

Основні характеристики і переваги

- Випробуваний на практиці кінематичний механізм
- Виключно висока стійкість до світлових перешкод в режимі передачі модульованого сигналу
- Передача сигналів в межах 360°
- Надкомпактна конструкція
- Повторюваність: 1,00 мкм (2σ)



Рисунок 1.31 – Щуп OMP40-2

Виходячи з цього доцільним є виконання вимірювання високоточних деталей безпосередньо на верстатах з ЧПК, що дозволить уникнути похибки перебазування та витрат часу на підготовчо-заклучні операції[28].

верстати обладнані надсучасними вимірювальними пристроями, такими як трикоординатні щупи різноманітних фірм Renishaw, Blum, Amikr, що дозволяють виконувати будь-які вимірювання поверхонь деталей безпосередньо на столі верстату.

Виходячи з цього доцільним є виконання вимірювання високоточних деталей безпосередньо на верстатах з ЧПК, що дозволить уникнути похибки перебазування та витрат часу на підготовчо-заклучні операції.

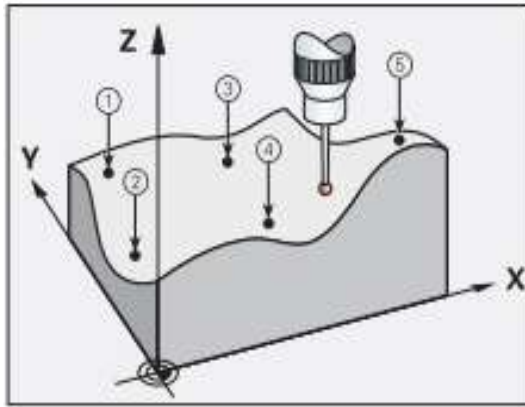


Рисунок 1.32 - Вимірювання поверхні двовимірної кривизни

Проте використання такого програмного забезпечення не завжди можливо, та й потребує наявності досить коштовного ПО. Саме тому є можливість програмування трикоординатних вимірювальних датчиків з допомогою спеціальних циклів верстатів з ЧПК та циклів Renishaw. Програмування щупа полягає у використанні вбудованих Макро програм у стійці верстату, що обладнана вимірювальною системою Renishaw[28].

Приклад написання макропрограми для виконання рухів щупа:

%

O4203 (назва програми)

T20 M06 (Виклик щупа з 20ї комірки барабану)

G54 (Перехід до робочої системи координат)

G1 X26. Y-2. F4000 (Швидкий перехід до початкової точки вимірювань)

G43 H20 Z150 (Виклик коректора на довжину щупа)

G65 P9832 (Початок виконання циклу вимірювання)

G65 P9810 Z-3 F2000 (Опускання щупа на швидкій подачі в заготовку)

G65 P9811 X23 S54 (Виконання вимірювання по осі X першої точки, з занесенням результату у 54 комірку)

G65 P9833 (Завершення першого циклу вимірювання)

G1 X26. F4000 (Відведення щупа від заготовки на безпечну відстань)

G1 Y-4. (Перехід до наступної точки вимірювання)

G65 P9832 (Початок нового циклу)

G65 P9810 Z-3 F2000

G65 P9811 X23 S55

G65 P9833

.....

G28 Z150

M99

%

1.6 Висновки:

Оцінивши переваги та недоліки КВМ можемо зробити висновок, що це обладнання можна використовувати за близьких до лабораторних умов, а не в реаліях цехів. Перед покупкою такої машини, потрібно впевнитися, що вдасться створити і підтримувати цей мікроклімат.

Враховуючи, точність позиціонування сучасних верстатів з ЧПК і ще й додатково з використанням вимірювальних щупів, - можемо сміливо порівнювати їх з точністю позиціонування КВМ.

Значимим плюсом використання контактних щупів під час обробки на верстатах - можливість вчасно відкоригувати програму і не зіпсувати деталь. Не потрібно витратити час на перенесення, базування деталі (верстат – КВМ – верстат) – це значно економить час обробки деталі, не виникають похибки базування і закріплення деталей.

Це, в свою чергу, економить час, гроші, ресурси і не потребує додаткових спеціалістів.

**РОЗДІЛ 2. ВИКОРИСТАННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ,
ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ**

2.1 Використання статистичних методів аналізу

Якість результатів та висновків при використанні статистичних методів, в тому числі і при плануванні експерименту, в великій мірі залежить від якості первинної інформації. Тому при проведенні експерименту необхідно виконувати всі вимоги теорії планування експериментів. Основні з них:

1. Виключення систематичних помилок.

2. Проведення експериментів у відповідності з планом і методикою.

3. Проведення повторних дослідів в номінально однакових умовах. Вони необхідні для забезпечення якості математичної моделі:

- якщо немає повторних дослідів, то один результат є випадковим числом; середнє кількох повторних дослідів вже не є випадковим числом; зауважимо, що збільшенні числа повторних дослідів більше 3 не дає значного ефекту;

- повторні досліді дозволяють виявити аномальні експерименти, які можуть суттєво деформувати математичну модель;

- за допомогою повторних дослідів визначається дисперсія відтворюваності, яка використовується при формуванні структури рівняння регресії і оцінці якості.

4. Використовувати в експерименті не результати повторних вимірювань, а повторних дослідів. Справа в тому, що при використанні повторних вимірів враховується тільки помилка вимірювання, котра є тільки частиною (звичайно незначною) помилки відтворюваності. Неправильне значення дисперсії відтворюваності може привести до помилок у визначенні структури моделі;

5. При проведенні експериментів необхідно використовувати рандомізацію. Це означає, що досліді повинні виконуватися в випадковому порядку. Це дозволяє зменшити систематичні помилки. Якщо порядок виконання дослідів не випадковий, в результаті може бути порушення однієї з передумов регресійного аналізу – незалежність експериментів. Це зв'язано з тим, що при проведенні експериментів зручно зафіксувати всі незалежні змінні і змінювати при переході від досліді до досліді тільки одну, а не багато як вимагає теорія планування експерименту. Така організація дослідів приводить

до автокореляції, заниженої дисперсії дослідів та появи систематичних помилок.

В тих випадках, коли рандомізація неможлива в силу економічних, технічних, організаційних чи інших причин, необхідно прикласти всі зусилля для забезпечення незалежності спостережень. Як один із підходів можна рекомендувати «розстройку» обладнання чи процесу після кожного експерименту і встановлення їх заново.

6. В експерименті необхідно використовувати матеріали, обладнання, персонал тощо, які мають однорідні властивості. Повинні фіксуватися всі можливі причини внесення неоднорідності.

7. Якщо використання моделі носить відповідальний характер, а також при використанні даних пасивного експерименту і роботі з насиченими та над насиченими планами (в яких кількість факторів дорівнює чи більше числа експериментів) необхідно мати контрольну вибірку, Експерименти в контрольній вибірці не повинні співпадати (а область планування повинна співпадати) з навчальною, по якій побудована модель.

Пасивний експеримент. В теорії пізнання (як і в більшості природничих наук) розрізняють спостереження та експеримент. При цьому під експериментом розуміють таке пізнання, при якому дослідник може активно впливати на досліджуване явище чи процес. В теорії планування експерименту (ТПЕ) під експериментом розуміють будь які дані, які необхідно обробляти з метою отримання математичної моделі. При цьому розрізняють пасивний та активний експеримент:

Активний експеримент – це такий експеримент, матриця умов проведення якого сформована у відповідності з теорією планування експерименту.

Пасивний експеримент – це експеримент, матриця якого з точки зору ТПЕ не оптимальна. При цьому не має ніякого значення, що з точки зору дослідника план експерименту відповідає його уявленням про оптимальність. Єдиним виключенням з цього правила є план повного факторного

експерименту, тобто план в якому наявні всі варіанти поєднування рівнів факторів. До пасивного експерименту відносяться також і спостереження.

Пасивний експеримент по якості вихідного матеріалу суттєво гірше активного. Результати його складно обробляти, а якість отриманої моделі практично завжди невисока, особливо для показників інформативності, стійкості та прогностичних властивостей.

Особливо небезпечною формою пасивного експерименту, яка, на жаль, досить поширена, є ситуація, коли результати експерименту і значення незалежних змінних знімаються безпосередньо з діючого режиму функціонування технологічного процесу.

Спроба отримання моделі за такими даними буде невдалою, за виключенням ситуації, коли технологічний процес сильно роз лагоджений.

Основною причиною невдачі буде той факт, що будь-який процес функціонує в деякій фазі стаціонарній області, При цьому параметри управління процесом вибрані таким чином, щоб їх зміни в межах цієї області суттєво не спливали на результат. Тому при звичайному функціонуванні на відгук в основному впливають (з точки зору відхилення його від номінальних значень) випадкові фактори.

Крім того, оскільки значення незалежних змінних в такому випадку фактично є випадковими величинами, то для отримання моделі необхідно використовувати не регресійний, а конклюдентний аналіз, який складний і вимагає більше інформації. Не слід робити таких «досліджень». Це даремно витрачений час і гроші.

Виключенням є такі дослідження, в яких активний експеримент неможливий в силу природи процесу, який досліджується. Це стосується в основному економічних, соціальних, екологічних, біологічних та інших подібних систем. При їх вивченні необхідно особливу увагу на формування вибірки. Виходити необхідно з мети дослідження. При пасивному експерименті необхідно виконати наступні дії:

1. Розділити всю вибірку на однорідні підвибірки.

2. Кожну однорідну вибірку необхідно розділити на навчальну та контрольну вибірки.

3. В кожній однорідній вибірці по навчальній вибірці побудувати свою модель і перевірити по контрольній вибірці.

Необхідність розподілу на однорідні вибірки викликано тим, що при розривній області експерименту (неоднорідній) адекватну і інформативну модель побудувати неможливо.

Бажано також намагатися відібрати дані так, щоб головні ефекти і взаємодії були як можна менше закорельовані один з одним. Це означає, що експериментальні точки повинні бути рівномірно розподілені по факторному простору. При невеликій кількості факторів це можна визначити візуально по діаграмам розсіяння.

2.1.1 Аналіз однорідності дисперсій

Перед виконанням експериментів необхідно провести попередню обробку даних. На цьому етапі розраховуються середні значення відгуку та дисперсії в кожному досліді. Потім, використовуючи критерій Кохрена, перевіряють однорідність дисперсій та розраховують дисперсію відтворюваності. Розраховуються критерій Кохрена за наступною формулою:

$$G_{p''kp} = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (2.1)$$

де S_{max}^2 – максимальна із дисперсій; S_i^2 – дисперсія, розрахована в кожному досліді по повторним (дублюючим) дослідом за формулою:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (Y_{ij} - Y'_i)^2}{n - 1}, \quad (2.2)$$

де n – кількість повторювань дослідів в номінально однакових умовах; Y'_i – середнє значення відгуку в i -ому досліді; Y_{ij} – значення відгуку в i -ому досліді при j -ому повторенні.

Результат порівнюється з табличним, і якщо $G_{\text{розр}} < G_{\text{табл}}$, то гіпотеза про однорідність приймається і дисперсія відтворюваності розраховується за наступною формулою:

$$S_{\text{відтв}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}, \quad (2.3)$$

Особливо цікавою є ситуація, коли перевірка по G -критерію показує, що дисперсії дослідів – неоднорідні. В такому випадку бажано проробити наступні рекомендації. Оскільки причиною неоднорідності дисперсій може бути або грубі помилки в результатах експерименту, так звані «викиди», або закон розподілу помилки, який відрізняється від нормального. Для того, щоб визначити, яка причина викликала в конкретному випадку неоднорідність дисперсій, необхідно проаналізувати значення відгуку в тому експерименті, в котрому дисперсія є найбільша. Спеціаліст має прийняти рішення, чи є це «викидом». Якщо це є «викид», то цей експеримент необхідно провести ще раз для отримання нормального результату.

2.1.2 Визначення рівня впливу «шуму»

Перед тим як почати роботу по побудові моделі, бажано визначити, чи можливо взагалі з цих даних виділити якусь закономірність. Це можливо формально визначити перевіряючи, чи належать до однієї генеральної сукупності дисперсія відносно загально середнього і дисперсія відтворюваності. Це можливо визначити з наступних формул:

$$F_{\text{розр}} = \frac{S_{\text{відтв}}^2}{S^2} < F_{\alpha, N(n-1), N-1}^{\text{табл}}, \quad (2.4)$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (Y'_{ij} - Y')^2}{N - 1}, \quad (2.5)$$

де Y' - загальне середнє, тобто середнє всіх середніх по стовпчику.

Позитивна відповідь на це питання означає, що з заданим рівнем значимості в наших даних немає ніякої закономірності. Причини такої ситуації можуть бути наступні:

- рівень впливу неконтрольованих факторів дуже високий і на фоні їх дії корисна інформація не проявляється;

- не правильно вибрані незалежні змінні;

- не правильно вибрані інтервал чи рівні варіювання незалежних змінних і вони внаслідок цього не впливають значимо на відгук, тобто в експеримент не включена частина факторів, які значимо впливають на відгук, або інтервал їх зміни занадто вузький (чи занадто широкий, при двох рівнях варіювання).

В такій ситуації по об'єктивним причинам отримати якісну модель скоріш за все – неможливо. Тому необхідно старанно проаналізувати умови проведення експерименту та формалізацію, а потім провести нові дослідження в нових умовах, або прийняти отриманий результат для врахування факту відсутності статистичного значимого зв'язку між незалежними змінами і відгуком для використання в наступних практичних дослідженнях.

2.1.3 Перетворення даних

Побудова моделі передусє етап перетворення вихідної матриці незалежних змінних. Перетворення необхідні для:

- формування моделі, достатньо складні для адекватного опису процесу або явища (ортогональні контрасти і взаємодії);

- забезпечення стійкості і структури коефіцієнтів рівняння регресії (ортогональні контрасти та нормування);

- перетворення області експерименту складної форми до стандартного виду (конструювання плану в нестандартних областях);

- врахування особливостей залежності відгуку від факторів (наприклад, логарифмування та інші спеціальні перетворення).

До стандартних перетворень відносять побудову ортогональних контрастів, нормування та побудову взаємодій.

Ортогональні контрасти є поліномами Чебишева, першого, другого та вищих степенів від вихідного стовпчика змінної. Степінь не може бути вище,

ніж число рівнів варіювання змінної мінус одиниця. Всі новостворені стовпці будуть ортогональні один до одного. Якщо ж не виконати перетворення до ортогональних контрастів, а будувати матрицю x , x^2 , x^3 і т.д., то її стовпці будуть сильно закорельовані. Більш того, це така звана матриця Гільберта, яка з ростом степені швидко стає погано обумовленою, а потім і виродженою (з степені 8), незалежно від того як вибрано вихідний стовпчик.

Ортогональність може буди порушена, якщо рівні варіювання змінної розміщені на числовій осі дуже нерівномірно – розрізняються на порядок і більше. В такому випадку між змінною x_i і відгуком існує логарифмічна залежність, і необхідно виконати заміну: $x'_i = \ln(x_i)$.

Поліноми Чебишева в загальному вигляді поліноміальними функціями від рівнів варіювання вихідних факторів:

$$f_{iu}^1 = x_{iu} = a_{11i}(X_{iu} + a_{10i}), \quad (2.6)$$

$$f_{iu}^2 = a_{22i}((f_{iu}^1)^2 + a_{21i}f_{iu}^1 + a_{20i}), \quad (2.7)$$

$$f_{iu}^3 = a_{33i}((f_{iu}^1)^3 + a_{32i}((f_{iu}^1)^2 + a_{31i}f_{iu}^1 + a_{30i}), \quad (2.8)$$

де i – номер фактору; u – номер дослід; x_{iu} – вихідні значення рівнів варіювання.

Значення коефіцієнтів знаходиться з наступних умов:

$$\sum_{u=1}^N f_{iu}^{(p)} f_{iu}^{(p')} = 0, \quad (2.9)$$

де $f_{iu}^{(p)}$, $f_{iu}^{(p')}$ – ортогональні контрасти степенів (p) , (p') для фактору X_i .

Підставляючи вирази для ортогональних контрастів у відповідні формули, ми отримуємо системи лінійних рівнянь, корені яких і будуть коефіцієнтами ортогональних поліномів Чебишева.

Для поліномів першого та другого порядку, ці корені розраховують за наступними формулами:

$$a_{10i} = -\frac{\sum_{u=1}^N X_{iu}}{N}, a_{20i} = -\frac{\sum_{u=1}^N (f_{iu}^{(1)})^2}{N}, a_{21i} = -\frac{\sum_{u=1}^N (f_{iu}^{(1)})^3}{\sum_{u=1}^N (f_{iu}^{(1)})^2}, \quad (2.10)$$

де $a_{11i}, a_{22i}, a_{33i}$ – встановлюється таким чином, щоб розраховані значення поліномів Чебишева змінювалися в інтервалі $(-1, 1)$.

Але для того, щоб забезпечувати добру обумовленість, однієї ортогональності недостатньо. Якщо зазначення змінних сильно відрізняється одне від одного, то це може приводити до помилок в зв'язку в погіршенням обумовленості матриці та накопиченою похибки при обчислювальних процедурах. Нормування пропонується виконувати так. Щоб суми квадратів по стовпчикам були однакові:

$$\sum_{u=1}^N (f_{iu}^{(p)})^2 = N, \forall p \text{ та } \forall i \in (1, m), \quad (2.11)$$

Третьою стандартною операцією є побудова взаємодій. Не треба плутати взаємодії зі взаємовпливом. Взаємовплив – це вплив одного фактору на інший, а взаємодія – сумісний вплив кількох факторів на відгук. Результатом взаємодії є така поведінка відгуку, яка не може бути пояснена простим складанням дії факторів. Взаємодії будуть по членним перемноженням відповідних стовпців ефектів. ПРІАМ дозволяє автоматично будувати будь-які типи взаємодій. Звичайно, достатньо подвійних взаємодій, оскільки вважається, що чим складніша взаємодія, тим менше ймовірність її впливу на відгук. Але можуть буди процеси, де складні взаємодії фізично присутні і їх необхідно будувати і аналізувати. Для повного факторного експерименту необхідно будувати всі можливі види взаємодій, тобто в матриці повинні бути взаємодії від подвійних до таких, що отримані перемноженням m стовпців ортогональних контрастів, де m – число вихідних факторів. Для матриці ПФЕ при невиконанні цієї умови можлива невдача при побудові інформативної і адекватної моделі.

Крім вказаних вище загальних перетворень досить часто зустрічаються перетворення, які пов'язані з особливостями конкретної задачі. Такі перетворення необхідно виконати до описаних вище стандартних перетворень. Найбільш часто зустрічаються наступні перетворення:

- перетворення для приведення області експерименту до стандартного виду;

- логарифмування окремої змінної X_i . Таке перетворення виконується в тому випадку, коли інтервал варіювання змінної дуже великий (найбільше значення більш ніж у 10 разів більше найменшого). Такий інтервал, як правило, свідчить про логарифмічну залежність відгуку від X_i .

Побудова коефіцієнтів математичної моделі та їх статистичних характеристик. Розрахунок коефіцієнтів математичної моделі базується на використанні методу найменших квадратів (МНК). Суть його пошуку в такій математичній моделі, для якої сума квадратів відхилень розрахованих по моделі значень відгуку від експериментальних буде мінімальна, тобто:

$$Q = (Y_i - Y_{i\text{експ}})^2 \rightarrow \min, \quad (2.12)$$

Якщо задати в явному вигляді вид моделі, то взявши часткові похідні від приведенного функціоналу по невідомим параметрам і прирівнявши їх до нуля, отримаємо систему лінійних рівнянь, коренями якої і є коефіцієнти моделі.

Із сукупності рівнянь виду $\frac{\partial Q}{\partial b_i} = 0$, підставивши замість Y_i значення виразу для Y отримаємо систему рівнянь наступного виду (в матричній формі запису):

$$X^T X B = X^T Y, \quad (2.13)$$

де B – вектор невідомих коефіцієнтів регресії; Y – вектор результатів експериментів (значень відгуку); X – умови експерименту (значення незалежних змінних); T – знак До недоліків МНК відноситься нестійкість його до викидів – при наявності їх модель занадто «перетягується» до цих спостережень і, таким чином, спотворюється. Взагалі-то кажучи, оцінки по методу МНК співпадають з оцінками по максимуму правдоподібності тільки у випадку нормального розподілу похибок. У всіх інших випадках необхідно корегування, або використання інших методів. Тому в тих випадках, коли передбачається можливість викидів, використовується метод найменших модулів (МНМ), в якому використовується функціонал:

$$Q = |Y_i - Y_{i\text{експ}}| \rightarrow \min, \quad (2.14)$$

У випадку ортогональної матриці система розпадається на окремі

рівняння, незалежні одне від одного і коефіцієнти регресії знаходяться по формулі:

$$b_i = \frac{\sum(X_i - X')(Y_i - Y')}{\sum_{i=1}^N (X_i - X'_i)^2}, \quad (2.15)$$

Індивідуальні довірчі інтервали для коефіцієнтів регресії визначається за формулою:

$$b_i \pm t_{\alpha, \nu} S \sqrt{C_{ii}}, \quad (2.16)$$

де S – середнє квадратичне відхилення (корінь квадратний з дисперсії відтворюваності), C_{ii} – діагональний елемент матриці дисперсій-коваріацій, тобто матриці $(X^T X)^{-1}$, яка утворюється в процесі розв'язання системи рівнянь; $t_{\alpha, \nu}$ – табличне значення критерію Стюдента з рівнем значимості α , і ν степенями свободи. При цьому, $\nu = N(n-1)$ для випадку, коли в кожному експерименті n повторів та $\nu = n - 1$, коли відтворюваності обчислюється по n окремим дослідом.

Для більш точного визначення положення вектору істинних значень коефіцієнтів регресії використовують спільну довірчу область або інтервали Бонфероні. Довірчі інтервали можна розраховувати тільки в тому випадку, коли похибка розподілена по нормальному закону. В практичній діяльності аналіз довірчих інтервалів майже ніколи не виконують (крім однофакторної регресії). Це зв'язано з тим, що коли модель має задовільні характеристики по опису досліджуваного процесу, то інші її характеристики вважають менш значимими.

Слід пам'ятати, що величина коефіцієнта регресії може слугувати характеристикою його значущості відносно інших коефіцієнтів тільки у випадку ортонормованої матриці. При наявності мультиколінеарності необхідно правильно визначити структуру рівняння регресії, оскільки в такому випадку величина коефіцієнта буде залежати від послідовності включення регресорів у модель. Знак коефіцієнту регресії однозначно вказує на напрямок впливу ефекту натуральної змінної тільки для лінійних ефектів. У всіх інших випадках необхідно аналізувати цю залежність, наприклад, за допомогою графіків часткових рівнянь регресії.

Звичайно для перевірки значимості коефіцієнта регресії використовують значення t , долю участі, значення F для включення та деякі інші показники.

При використанні критерію Стьюдента розраховується:

$$t = \frac{b_i}{S\sqrt{C_{ii}}}, \quad (2.17)$$

Якщо $t > t_{\alpha, \nu}$ то коефіцієнт значимий, інакше – ні. Строго кажучи, обґрунтоване використання цього критерію можливе у випадку повного факторного експерименту, коли всі стовпці матриці ортогональні. У всіх інших випадках t не дає правильного уявлення про значимість коефіцієнта.

Доля участі – показник, який вираховується як доля від загальної суми квадратів, яку пояснює даний регресор.

Іноді обчислюють β -коефіцієнт $\beta = b_i \frac{S_{xi}}{S_y}$. Він показує наскільки змінюється значення відгуку при змінюванні значення даного регресора на величину його середньоквадратичної помилки.

Потрібно мати на увазі, що вказані показники (коефіцієнт кореляції, доля участі, значення t , значення F для включення тощо) узгоджуються між собою тільки у випадку повної ортогональності матриці, по якій обчислюють коефіцієнти регресії. У всіх інших випадках вони можуть суперечити один одному. Така ситуація може слугувати непрямом ознакою неправильного визначення структури рівняння.

Вказані показники можуть також входити в протиріччя з іншими – адекватності та інформативності. Причому таке протиріччя може мати місце навіть у повному факторному експерименті. Наприклад, включення нових, формально значимих членів у модель, веде до зниження її інформативності. Або модель вже адекватна, але є ще формально значимі регресори, які в неї не ввійшли.

Для прийняття рішення про межі використання побудованої моделі необхідно провести аналіз її властивостей. Із вищевказаного випливає, що оцінка якості моделі по одній чи двом характеристикам недостатня. Необхідна

комплексна оцінка, яка дозволяє оцінити статистичні та споживацькі властивості моделі в повному обсягу. Основними показниками якості моделі можна назвати:

1. Інформативність.
2. Адекватність.
3. Стійкість (коефіцієнтів регресії та структури моделі).
4. Описуючі властивості моделі.
5. Прогностичні властивості моделі.
6. Відображення структури зв'язків між факторами та відгуком.

Обов'язково необхідно перевіряти інформативність, адекватність та стійкість. Бажано також аналізувати прогностичні властивості моделі.

В нижче приведеній таблиці дані розрахункові формули та назви дисперсій, які в подальшому використовуються при аналізі якості моделі.

Таблиця 2.1 – Дисперсії, котрі використовуються в регресійному аналізі

Назва дисперсії	Формула розрахунку
Дисперсія відтворюваності $S_{\text{відтв}}^2$	
Залишкова дисперсія $S_{\text{зал}}^2$	$\sum_{i=1}^N \frac{(Y'_i - Y''_i)^2}{(N - k)}$
Загальна дисперсія (дисперсія відносно загального середнього) S^2	$\sum_{i=1}^N \frac{(Y'_i - Y')^2}{(N - 1)}$
Дисперсія, що пояснюється моделлю S_R^2	$\sum_{i=1}^N \frac{(Y_i - Y')^2}{(k - 1)}$

де N – число експериментів; k – число членів моделі; n – число дублюючих дослідів в кожному експерименті; Y_{ij} – значення відгуку в i -ому експерименті при j -ому дублі; Y'_i – середнє значення по дублюючим дослідом i -ому експерименті; Y''_i – значення відгуку, розраховане для i -ого експерименту по моделі; Y' – загальне середнє.

Інформативність. Найбільш часто оцінкою інформативності слугує величина множинного коефіцієнта кореляції R (коефіцієнт кореляції між

експериментальним значенням відгуку та значенням відгуку, розрахованим по моделі). Чим ближче він до одиниці, тим інформативність моделі вище. Величина R^2 показує долю загальної суми квадратів, що пояснюється моделлю:

$$R^2 = \frac{S_{\text{зал}}^2}{S^2}, \quad (2.18)$$

Його (R) значення повинно бути як найближче до одиниці. Але це тільки необхідна, але не достатня умова. Необхідно перевірити значимість коефіцієнта множинної кореляції по критерію Фішера:

$$F_R = \frac{S_R^2}{S_{\text{зал}}^2} > F_{\alpha, V_R, V_{\text{ост}}}, \quad (2.19)$$

де $V_R, V_{\text{ост}}$ – степені свободи для дисперсії, що пояснюється моделлю та залишкової дисперсії відповідно.

Якщо розраховане значення більше табличного з заданим рівнем значимості, то модель інформативна. Така перевірка є якісною (типу так або ні). Для того, щоб оцінити рівень інформативності кількісно, необхідно скористатися критерієм Бокса-Веца. Для якісної моделі необхідно, щоб значення параметра g -критерію Бокса-Веца було не нижче чим 2-3. Величина g -критерію визначається з наступного рівняння:

$$F_0 = \cong (1 + g)F_{\alpha, V_0, V_{\text{ост}}}, \quad (2.20)$$

$$\text{де } V_0 = V_R \frac{(1+g)^2}{(1+2g^2)}$$

При неможливості точно визначити g по цій формулі, пам'ятайте, що значенню $g = 3$ відповідає ситуація, коли $F_{\text{разр}} \approx 10F_{\text{табл}}$.

Адекватність. В математичному моделюванні під адекватністю розуміється відповідність моделі об'єкту, який вона описує, по сукупності певних умов. В регресійному аналізі у вузькому значенні перевірка адекватності зводиться до перевірки по критерію Фішера належності дисперсії відтворюваності та залишкової дисперсії до однієї генеральної сукупності. При позитивній відповіді (F -табличне менше F -розрахованого) різниця дисперсій статистично незначуща і модель вважається адекватною.

Звертаємо вашу увагу на деякі важливі моменти. Ця перевірка є формальною, тому кінцеве рішення об адекватності моделі необхідно приймати, виходячи з придатності моделі для практичного використання по всій сукупності показників. Можлива така ситуація, що модель формально неадекватна, але практично вона задовольняє дослідника (адекватно описує процес): структура зв'язків, точність опису та прогнозування тощо.

При наявності дублюючих дослідів адекватність перевіряється по критерію Фішера:

$$F = \frac{S_{\text{ВідТВ}}^2}{S_{\text{Зал}}^2} < F_{\text{табл}, \alpha, (n-1)N, N-k}, \quad (2.21)$$

В тому випадку, коли повторні досліді відсутні, модель вважається адекватною, якщо виконується умова:

$$\frac{S^2}{S_{\text{Зал}}^2} > \frac{(N - k)}{(N - 1)(1 + ((k - 1)(N - k))F_{\alpha, k-1, N-k}}, \quad (2.22)$$

Потрібно мати на увазі, що ця формула не може дати інформацію для прийняття рішення про припинення включення регресорів в модель і її адекватності. Бажано провести смисловий аналіз і можливо виконати наступні дії.

1. Проаналізувати діаграму впливу регресорів (підрозділ «Аналіз структури зв'язків»).

2. Проаналізувати характер зміни значень $S_{\text{Зал}}^2$ від включення нових членів в модель. Якщо залишкова дисперсія починає збільшуватися, то введення нових членів необхідно припинити.

3. Проаналізувати динаміку зміни F_R при включенні нових членів і зупинитися на моделі з його максимальним значенням.

Після того як модель стала адекватною по F -критерію, не слід в неї включати додаткові члени, оскільки вони не несуть ніякого смислового навантаження і це приводить до зниження або навіть втрати інформативності (зменшується F_R). Результати експерименту і розраховані по адекватній моделі значення розрізнити статистично неможливо.

Розраховане значення F -критерію завжди повинно бути більше одиниці, тобто це відношення більшої дисперсії до меншої. В тому випадку, якщо воно виявилось менше одиниці, його необхідно перерахувати. При цьому потрібно не забувати, що для табличного значення F -критерію числа степенів свободи V_1 і V_2 поміняються місцями і само значення буде іншим.

**РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОХИБКИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ
НА ТОЧНІСТЬ ВЕРСТАТУ**

3.1 План експерименту та виконання дослідження

Для виконання прикладних досліджень був обраний вертикальний обробляючий центр VF-2 фірми HAAS (рис 3.1), що має стійку HAAS.



Рисунок 3.1 – Верстат HAAS VF-2

Обраний верстат має такі характеристики:

- Розміри робочої поверхні столу, мм 1321x457
- Найбільші програмовані переміщення, мм:
 - по осі X 762
 - по осі Y 406
 - по осі Z 508
- Конус шпинделя ISO 40
- Частота обертання шпинделя, об/хв 8100
- Межі робочих подач по осях X, Y, Z, мм/хв 0,1... 10000
- Найбільша сила подачі стола 10000Н

- Швидкість швидких переміщень по осях X, Y, Z, мм/хв 25400
- Кількість інструментів в магазині 20
- Потужність головного приводу, кВт 22,4
- Габарити верстата, мм 4085x2311x2807
- Маса верстата, кг 3311

На верстаті був встановлений щуп Renishaw OMP 40 з технічними характеристиками, що наведені на рис (3.2).

Тип щупа	Матеріал	Клас	Отклонение от сферической формы	Конструкция	Состав	Чистота	Плотность	Твердость	Сопротивление скалыванию	Сопротивление износу	Сопротивление релаксации K1с
			(μm)	-	(M%)	(%)	(g/cm^3)	HV	(MPa)	(MPa)	(MN/m^2)
Al_2O_3 Сферическое наконечник из синтетического рубина	Сферическое наконечник из нитрида кремния	Класс 5*	0,13	Моно	99% Al_2O_3	99,90	3,99	2300	2100	400-700	1

Рисунок 3.2 – Технічні характеристики вимірювального щупа

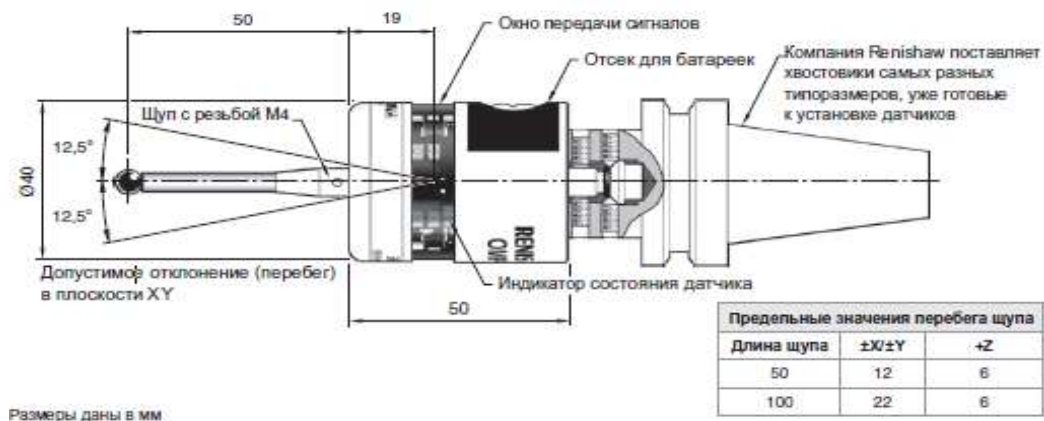


Рисунок 3.3 - Вимірювальний щуп фірми Renishaw OMP 40

На столі верстату з ЧПК було встановлено 2 кінцеві міри, міри розташовувались на крайніх положеннях стола верстату, за віссю X відстань між мірами була 665мм, відстань між мірами за віссю Y була зумовлена можливістю установки їх у T подібних пазах верстату, та становила 355мм, міри встановлювались по чергово за віссю X та Y, було виконано по 100 вимірювань в кожному напрямку. (рис. 3.4)



Рисунок 3.4 – Вимірювання за віссю X

Вимірювання проводились за спеціальної програмою руху щупа. З використанням безпечних циклів руху та вимірів за однією координатою, програма руху щупа наведена далі, в програмі було використано також МАКРО В програмування, замкнений цикл на 100 ітерацій (рис.3.5).

O46678

G40 G17 G90 G49 G21

M09

G91 G28 Z0.

G91 G28 X0. Y0.

G90 G53 G00

G90 G54

T20 M06 (вибір інструменту Щуп)

G43 H20 (прийняття корекції на довжину інструменту)

#1=0 (задання перемінної для лічильника)

G00 X10. Y-10.

G01 Z20. F1500.

WHILE [#1 LE 100] DO 1 (задання циклу виконання програми 100 разів)

G65 P9832 (включення щупа)

G65 P9810 Z-7. F500. (підхід на безпечному циклі роботи щупа)

G65 P9810 Y-10.

G65 P9811 X0. S154.01 (вимірювання координати X)

G65 P9810 X210.

G65 P9810 Y-125.

G65 P9811 X200. S154.02

G65 P9810 X410.

G65 P9810 Y-135.

G65 P9811 X200. S154.03

G65 P9810 X610.

G65 P9810 Y-265.

G65 P9811 X600. S154.04

G65 P9810 X610.

G65 P9810 Y-265.

G65 P9811 X600. S154.05

G65 P9810 Y-135.

G65 P9810 X410.

G65 P9811 X400. S154.06

G65 P9810 Y-125.

G65 P9810 X210.

G65 P9811 X200. S154.07

G65 P9810 Y-10.

G65 P9810 X10.

G65 P9811 X0. S154.08

#1=#1+1 (зміна перемінної лічильника)

END1 (завершення циклу після виконання 100 операцій)

G65 P9810 Z20. F500.

G65 P9833 (виключення щупа)

G91 G28 Z0.

M30

%



Рисунок 3.5 – Відпрацювання програми вимірювання на верстаті з ЧПК

Для запису даних з верстату було використано систему підключення через Ethernet порт, система опитування перемінних верстату була розроблена на кафедрі Технології машинобудування, дані накопичувались безпосередньо на комп'ютері, та формувалися у вигляді текстового файлу (рис 3.6).



Рисунок 3.6 – Збір статистичних даних на комп'ютері
Загальний вигляд отриманого текстового файлу представлено на рисунку

3.7.

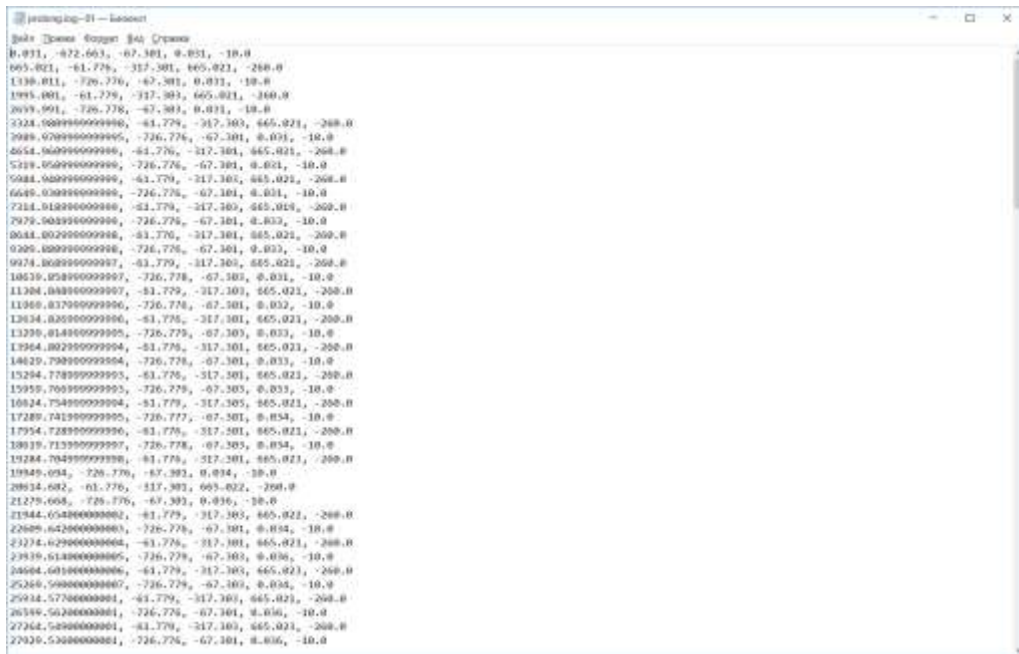


Рисунок 3.7 – Збір даних вимірювання у текстовому файлі

3.2 Аналіз отриманих статистичних даних

Отриманий файл з даними необхідно адаптувати для роботи з ПРІАМ, формуємо 2 стовпчики даних за кожною координатою.

ений мм	пройд шлях, мм	по хибка по осі X, мм	прой дений шлях, мм	по хибка по осі Y, мм
			354.3	0.0
6	664.99	0.0	15	01
	1994.9	0.0	1062.	0.0
90		0.0	947	01
	3324.9	0.0	1771.	0.0
84		0.0	579	01
	4654.9	0.0	2480.	0.0
76		0.0	210	01
	5984.9	0.0	3188.	0.0
69		0.0	842	02
	7314.9	0.0	3897.	0.0
59		0.0	472	03
	8644.9	0.0	4606.	0.0
47		0.0	100	03
	9974.9	0.0	5314.	0.0
35		0.0	729	03
	11304.	0.0	6023.	0.0
923		0.0	358	03
	12634.	0.0	6731.	0.0
914		0.0	988	03
	13964.	0.0	7440.	0.0
901		0.0	617	03
	15294.	0.0	8149.	0.0
890		0.0	246	04
	16624.	0.0	8857.	0.0
876		0.0	874	04
	17954.	0.0	9566.	0.0
863		0.0	502	04
	19284.	0.0	1027	0.0
851		0.0	5.131	04
	20614.	0.0	1098	0.0
833		0.0	3.756	05
	21944.	0.0	1169	0.0
			2.381	05

813	09		1240	0.0
	23274.	0.0	1.007	05
797	09		1310	0.0
	24604.	0.0	9.632	05
777	09		1310	0.0
	24604.	0.0	9.648	06
808	11		
			

При виконанні роботи виконуємо наступну послідовність дій:

- введення вихідних даних (опис змінних, робочу матрицю, матрицю результатів експерименту);
- перетворення вихідної матриці (ортогоналізація, нормування, побудова взаємодій);
- побудова регресійної моделі;
- аналіз якості моделі (аналіз залишків, аналіз структури, інформативність, адекватність, стійкість, описові та прогностичні властивості).

Для прийняття рішення про межі використання побудованої моделі необхідно провести аналіз її властивостей. Необхідна комплексна оцінка, яка дозволяє оцінити статистичні та споживацькі властивості моделі в повному обсязі. Основними показниками якості моделі є:

1. Інформативність.
2. Адекватність.
3. Стійкість (коефіцієнтів регресії та структури моделі).
4. Описуючі властивості моделі.
5. Прогностичні властивості моделі.
6. Відображення структури зв'язків між факторами та відгуком.

Обов'язково необхідно перевіряти інформативність, адекватність та стійкість. Бажано також аналізувати прогностичні властивості моделі.

В математичному моделюванні під адекватністю розуміється відповідність моделі об'єкту, який вона описує, по сукупності певних умов. В регресійному аналізі у вузькому значенні перевірка адекватності зводиться до перевірки за критерієм Фішера належності дисперсії відтворюваності та

залишкової дисперсії до однієї генеральної сукупності. При позитивній відповіді ($F_{\text{експ}} < F_{\text{крит}}$) різниця дисперсій статистично незначима і модель вважається адекватною.

Звіт роботи ПРИАМ

Результаты работы программы преобразований

Преобразование матрицы из файла: D:\PRIAM_TP\nu.x

Работа выполнена в диалоговом режиме

Количество главных эффектов - 4

Количество генерируемых взаимодействий - 0

Количество определяемых взаимодействий - 0

Всего взаимодействий и эффектов - 4

Типы генерируемых взаимодействий: 2;

Ограничение главного эффекта по степени: Нет

Ограничение взаимодействия по степени: Нет Суббота 7 Декабря 2019 года. Время 10:57:04

Доработка полученной модели

Список эффектов кандидатов

имя/номер коэффициента	коэффициент корреляции
1 - x1	0.965607
2 - z1	0.229233
3 - u1	0.0574939
4 - v1	0.0220207

Цель: МОДЕЛЬ

Параметры, влияющие на формирование структуры модели:

Способ формирования структуры модели - Програмный

Алгоритм определения списка кандидатов - На основе главных эффектов

Управление качеством модели:

Адекватность - Да ; Информативность - Нет

Значимость коэф - Нет ; Доля Участия - Да

Ограничение max коэф. корреляции между эффектами - 0.4

Ограничение min коэф. корреляции эффектов с откликом - 0.01

Ограничение минимальной доли рассеяния - 0.005

Получена модель:

$$Y = 0.0166505 + 0.0110839x_1$$

где:

$$x_1 = 1.47967e-005 * (X_1 - 67409.2);$$

$$z_1 = 1.53251 * ((x_1^2) - 0.0110731 * x_1 - 0.336401);$$

$$u_1 = 2.59662 * ((x_1^3) - 0.0195915 * (x_1^2) - 0.601825 * x_1 + 0.0028656);$$

$$v_1 = 4.72762 * ((x_1^4) - 0.0197841 * (x_1^3) - 0.862122 * (x_1^2) + 0.00586384 * x_1 + 0.0875648);$$

АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Остаточная дисперсия 3.05577e-006

Дисперсия воспроизводимости 0.000832524

Расчетное значение F-критерия 14.6474

Уровень значимости F-критерия для адекватности 0.05
для степеней свободы $v_1 = 1$ $v_2 = 101$

Табличное значение F-критерия для адекватности 3.93519

Табличное значение F-критерия

(при отсутствии повторных опытов) 1.02878

Стандартная ошибка оценки 0.00174808

(скоррект. с учетом степеней свободы) 0.00174808

Модель адекватна

Примечание:

Дисперсия воспроизводимости задана пользователем

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ МОДЕЛИ

Основные характеристики

Доля рассеивания объясняемая моделью 0.932398

Введено регрессоров (эффектов) 2

Коэффициент множественной корреляции 0.965607

(скоррект. с учетом степеней свободы) 0.965607

F отношение для R 1393.03

Уровень значимости F-критерия для информативности 0.05

3.3 Висновки:

1. Проведені дослідження з вимірювання точності, похибки позиціонування верстату HAAS VF2.
2. Було виконано обробку статистичних даних, розроблено регресійну модель залежності похибки від довжини переміщення. Модель перевірено на адекватність та інформативність в програмному середовищі ПРІАМ.
3. Зважаючи на отримані дані рекомендовано на верстаті HAAS VF2, при вимірюванні деталей виконувати занулення координат верстату кожні 20-40 метрів переміщення, при виконанні оброблення деталей з довжиною траєкторії руху інструмента більше 100 метрів, виконувати занулення кожні 100 метрів переміщення.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї послуги

Зміст ідеї заключається в створенні і впровадженні методики експериментального визначення точності позиціювання верстата, компенсування похибки і використання його в якості КВМ.

Головною відмінністю даного проекту від існуючих аналогів та заміників є:

- в нашому випадку пропонується методологія вимірювання деталей прямо на верстаті з ЧПК;
- не потребується купівля дорогого обладнання КВМ

Таблиця 4.1.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Технологія вимірювання деталі на вертикально-фрезерних верстатах з ЧПК з використанням шупів Renishaw	Підвищення точності обробки деталей	Точність деталей зростає без додаткових зусиль
	Скорочення часу виготовлення деталі	Не витрачається час на перенесення деталі верстат – КВМ - верстат
	Зменшення кількості обладнання (КВМ) на підприємстві.	Не потрібно купувати КВМ

4.1.1 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї

На теперішній час, оцінка точності позиціювання верстата і компенсація наявних похибок, не має прямих конкурентів, які могли б забезпечити такі самі показники якості та швидкості виготовлення деталі. Одним з аналогів є використання КВМ для вимірювання, але це потребує великих часових і фінансових витрат.

Єдиним чинником, який може стати на заваді успішного розвитку впровадження технології оцінки точності позиціювання верстата і компенсації наявних похибок в металообробці може стати кінцевий користувач – покупець.

Таблиця 4.1.1 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Використання КВМ	Використання вимірвальних лінійок	Конкуренти			
1.	Економія на масштабах	Так	Ні	Так	Ні			S
2.	Динаміка галузі	Так	Так	Так	Так			S
3.	Інформаційне забезпечення	Так	Так	Ні	Так		N	
4.	Змінні витрати	Ні	Так	Ні	Так			S

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.1.2 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
	Компенсувати похибку позиціонування верстата при обробці для підвищення точності	Розробка технології, за допомогою якої можна перевірити точність позиціонування і потім скоригувати значення похибки для її мінімізації.	Наявна	Так
		Поставити додатково на верстат оптичний енкодер для зменшення похибки точності позиціонування	Наявна	Ні

Обрана технологія реалізації ідеї проекту : Розробка технології, за допомогою якої можна перевірити точність позиціонування і потім скоригувати значення похибки для її мінімізації.

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок, що розробка технології, за допомогою якої можна перевірити точність позиціонування і потім скоригувати значення похибки для її мінімізації є цілком оправданою.[32]

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 2.3.1 Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум. од.	20000 у.о.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Нема обмежень. Ринок вільний
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	27

Середня норма рентабельності, в нашому випадку, де банківський відсоток на вкладення складає 20%, отже можна зробити висновок про те, що ринок, за попереднім оцінюванням, є привабливим для входження.

Тепер доцільно визначити потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформувані орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5).

Таблиця 4.3.2 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Отримання деталей високої якості без додаткових витрат на КВМ	Підприємства, що займаються металообробкою	Інформаційна обізнаність щодо можливостей сучасних верстатів з ЧПК	Висока якість готової деталі

Фактори, що сприяють ринковому впровадженню

Таблиця 4.3.3 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
	Недооцінення можливостей вимірювання деталі на верстатах з ЧПК	Стереотипи щодо точності позиціювання верстатів	Перемовини з клієнтом

Таблиця 4.3.4 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
	Якість	Підвищення якості отриманих деталей	Зміна технологічних параметрів процесу.
	Час	Зменшення часу обробки деталі (не потрібно перевстановлювати деталь на верстаті – КВМ – верстаті)	Збільшення прибутку за рахунок меншого часу на обробку
	Вартість	Відпадає потреба в купівлі КВМ	Використання кращих щупів для ще більш точного вимірювання

Тепер проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку

Таблиця 4.3.5 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - чиста	Ринок на цю ідею – вільний, аналогів зовсім мало	Створення оптимальної технології, з оптимізацією часу обробки
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	В інших країнах також працюють над покращенням вимірювань точності	Створення оптимальної технології, з оптимізацією часу обробки
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Актуальною є і в інших галузях (метрологія)	Розробка буде актуальною і в інших галузях
4. Конкуренція за видами товарів - товарно-видова	Можлива заміна купівлею додаткового обладнання	Наша перевага в тому, що розробка технології обійдеться в десятки разів дешевше, ніж купівля КВМ
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Для позитивного результату потрібно отримати	Результат буде найкращою рекламою

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера. [32])

Таблиця 4.3.6 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	ТОВ «Варітек», ПРАТ «ДІТЦ «КОНТАКТ»	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки	Партнерські засади	є можливості входу в ринок. Немає потенційних конкурентів, що могли б ввійти на ринок	Все залежить від технологічності програми конкурентів.	Клієнти не диктують умови роботи на ринку	Немає

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок, що наш проект є лідером серед конкурентів, так як програма вимірювання деталей на верстатах легко адаптується в технологію обробки з врахуванням похибки позиціонування.

Аналіз таких чинників представлено в табл. 4.3.7

Таблиця 4.3.7 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Швидка адаптованість технології під запити покупця	Можливість змінити програму в короткі строки під потреби покупця
2	Значне зменшення часу на обробку деталі	За рахунок відсутності потреби в перенесенні деталі версат-КВМ-верстат час обробки знижується
3	Відсутність обмежень щодо конфігурації деталі	Широка можливість використання написаної програми, навіть для складної форми деталей

За визначеними факторами конкурентоспроможності проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 4.3.8 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Швидка адаптованість технології під запити покупця	15	+						
2	Значне зменшення часу на обробку деталі	20				+			
3	Відсутність обмежень щодо конфігурації деталі	14			+				

Складання SWOT-аналізу:

Таблиця 39. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Всі фактори наведені в Таблиці 11	Слабкі сторони: Адаптація під стійки різних виробників
Можливості: Продаж ліцензій на методології вимірювання точності і компенсації похибок	Загрози: Недооцінення можливостей вимірювання деталей на верстах з ЧПК в порівнянні з КВМ

Альтернативи ринкової поведінки аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів.

Таблиця 4.3.10 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Продаж ліцензій на методологію вимірювання і компенсації похибки	Велика, так як це є затребуваною технологією і користуватиметься попитом серед металообробних підприємств	1-2 роки з моменту перших інвестицій
2.	Створення розгалуженої мережі демонстраційних центрів із залученням іноземних партнерів	За програмою «One road one belt» Китайської народної республіки – невелика імовірність отримання грантів	4-5 роки з моменту перших інвестицій

Перша альтернатива містить в собі великі переваги і має всі шанси бути реалізованою., оскільки для неї отримання ресурсів є більш простим та ймовірним, а строки реалізації – більш стислими. [32]

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.4.1 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Виробники та користувачі металообробного обладнання	Готові	Скорочення часу обробки, підвищення точності виробів	низька	проста
2	Виробники та користувачі метрологічних приладів	Невідомо	Підвищення точності позиціонування обладнання	низька	проста
3	Користувачі деревообробного обладнання	Не готові	Немає	Низька	Важка
Які цільові групи обрано: Виробники та користувачі металообробного обладнання та Виробники та користувачі метрологічних приладів					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) вибираємо стратегію диференційованого маркетингу;

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку.

Таблиця 4.4.2 Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Розробка ліцензії на методологію вимірювання і компенсації похибки	Диференційований маркетинг	Швидка адаптованість технології під запити покупця Значне зменшення часу на обробку деталі Відсутність обмежень щодо конфігурації деталі	Стратегія диференціації

Тепер виберемо стратегію конкурентної поведінки.

Таблиця 4.4.3 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Ні	Забирати існуючих у конкурентів	Ні	Стратегія виклику лідера

Розробка стратегії позиціонування, полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торговельну марку/проект. [32]

Таблиця 4.4.4 Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
	Точність, якість та вартість обробки	Стратегія диференціації	Відмова від використання КВМ, зменшення часу обробки	Висока точність обробки деталі за рахунок компенсації похибки позиціонування верстата

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 18 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.5.1 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Методологія вимірювання деталі і компенсація похибки позиціонування	Точність, швидкість, низька вартість	Відмова від використання дороговартісного КВМ, зменшення часу обробки

Через обмеженість інформації щодо наявних потреб українських споживачів було вирішено не створювати маркетингової кампанії для даної послуги. Наразі вивчається можливість просування цієї послуги компаніям за кордоном та створення ліцензії на методику вимірювання деталей. [32]

4.6 Висновки:

1. Наразі є можливість ринкової комерціалізації проекту (наявний живий попит, висока динаміка ринку, висока рентабельність роботи на ринку);
2. Наявні великі перспективи впровадження у виробництво цієї методології, так як є зацікавлені клієнти, немає серйозних бар'єрів входження, конкуренція на сьогоднішній день невелика, а конкурентоспроможність проекту - висока;
3. Для ринкової реалізації проекту бажано обрати альтернативу «Розробка ліцензії на методологію вимірювання і компенсації похибки»
4. Подальша імплементація проекту є доцільною.

Використані літературні джерела

1. Что такое станок с ЧПУ [Электронный ресурс]. - <http://tracemagic.ru/stati/stanki-s-chpu/что-такое-станок-s-chpu>
2. Чим верстат з ЧПУ відрізняється від універсального? [Электронный ресурс]. - <https://mirstankov.com/uk/chim-verstat-z-chpu-vidriznyayetsya-vid-universalnogo/>
3. Устройство цифровой индикации Lokshun SINO [Электронный ресурс].- <https://stankomach.com/katalog-stankov/tokarnye/misc/dro2/obzor/lokshun-sino.html>
4. УЦИ [Электронный ресурс]. - <http://mtg.org.ua/uslugi/utsi/>
5. Советы по выбору линейек [Электронный ресурс]. - <http://drotools.ru/index.php/advice-at>
6. <http://stankoservis.by/index.php/stati/170-st-2>
7. Емкостные, индуктивные и магнитные инкрементные энкодеры [Электронный ресурс]. - http://dopusk.net/?page_id=1458
8. Вороничев П. П., Менгазетдинов Н. Э. Инкрементные емкостные преобразователи перемещений //Датчики и системы. – 2001. – №. 3. – С. 6-11.
9. Alejandro I., Artes M. Machine tool errors caused by optical linear encoders //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2004. – Т. 218. – №. 1. – С. 113-122.
10. Оптические линейки [Электронный ресурс]. - <http://stankoservis.by/index.php/stati/171-st-3>
11. Магнитные линейки, в чем их плюсы? [Электронный ресурс]. - <http://stankoservis.by/index.php/stati/168-st-1>
12. How do magnetic linear encoders differ from optical versions? [Электронный ресурс]. - <https://www.linearmotiontips.com/how-do-magnetic-linear-encoders-differ-from-optical-versions/>
13. Ткачук А.А. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ МОД. 16К20Ф3 И 6Р13Ф3 [Текст]/А.А. Ткачук.// Наука и техника Казахстана. – 2008. - №2. – С.51-56

14. Точность и качество обработки на современных станках [Электронный ресурс]. - <https://infofrezer.ru/stati/tochnost-i-kachestvo-obrabotki-na-sovremennykh-frezernykh-stankakh-s-chpu/>

15. Беляковский В.П., Кипчарский С.В. АНАЛИЗ ПРИЧИН, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПОГРЕШНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СТАНКОВ С ЧПУ [Текст]/ Беляковский В.П., Кипчарский С.В.// Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2011. - №2(23). – С.203-208

16. CNC Machining Guide [Электронный ресурс]. - <https://geomiq.com/cnc-design-guide/>

17. Берлинер Э.М. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ [Текст]/Берлинер Э.М.// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2012. – С.219-222

18. Кольцов А.Г. Блохин Д.А. Кривонос Е.В. Нарезнев А.Н. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОМV-ТЕХНОЛОГИЙ [Текст]/Кольцов А.Г. Блохин Д.А. Кривонос Е.В. Нарезнев А.Н.// Динамика систем, механизмов и машин – 2016.

19. Потеряйко А.М., Скиба А.С. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ, СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ СКАНИРОВАНИЯ И ОБРАТНЫЙ ИНЖИНИРИНГ [Текст]/ Потеряйко А.М., Скиба А.С. // Український метрологічний журнал – 2016. - №4 – С.10-13

20. Координатно-измерительные машины [Электронный ресурс]. - http://dopusk.net/?page_id=1144

21. Принцип Аббе [Электронный ресурс]. - http://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?dir=2&tutindex=37&index=25&layer=1

22. Everything You Need to Know About the Coordinate Measuring Machine (CMM) Process and How it Improves Manufacturing Reliability [Электронный

ресурс]. - <https://www.3erp.com/blog/everything-about-coordinate-measuring-machine/>

23. Точность координатно-измерительных машин при работе в цеховых условиях [Электронный ресурс]. - <https://www.hexagonmi.com/ru-ru/solutions/technical-resources/technical-articles/coordinate-measuring-machine-accuracy-on-the-shop-floor>

24. OKUMA Фрезерные обрабатывающие центры [Электронный ресурс]. - https://okuma-russia.ru/frezernie_obraativaushie_centri.htm

25. HURCO Фрезерный станок VM-10i-plus [Электронный ресурс]. - <http://hurco-ukraine.com.ua/B5-hurco/milling/3-axes/high-performance/vm-10i-plus/>

26. KITAMURA Mycenter-3020G, 20k “Sparkchanger” Vertical Machining Center <https://www.kitamura-machinery.com/products/mycenter3xig-sparkchanger/>

27. Вертикально-фрезерный обрабатывающий центр Haas VF-2 [Электронный ресурс]. - <https://www.abamet.ru/catalog/metallorzhushhie/frezernye-chpu/v-obrabatyvajushhie-centry/haas-vf-2/>

28. Близнюк Т.О. Конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення деталі «Авіаційний корпус»: Дипломна робота.: 131 Прикладна механіка/Близнюк Тетяна Олександрівна. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2018.

29. Координатно-измерительная машина Primus [Электронный ресурс]. - <http://promcontrol.ru/katalog/koordinatno-izmeritelnye-mashiny/koordinatno-izmeritelnye-mashiny-mora-germanija/portalnaja-izmeritelnaja-mashina-primus/>

30. Автоматическая Координатно-измерительная машина 3Д AXIOMM TOO HS 640x600x500 [Электронный ресурс]. - http://microtech-ua.com/index.php?id_manufacturer=4&controller=manufacturer&id_lang=3

31. Координатно-измерительная машина ручная KBM-585A [Электронный ресурс]. - <http://microtech-ru.ru/laboratorное-oborudovanie/koordinatno->

izmeritelnaya-mashina-ruchnaya-kvm-554m-kvm-584m-kvm-665m-kvm-6105m-kvm-554a-kvm-554a-kvm-8106a-kvm-10158a.html

32. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

ДОДАТКИ