

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

(тема)

Методи оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ

Виконав: студент 2 курсу, гр. КІТПВМ-22-2

Дульський В.І.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність

151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані

технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Стародубцев М.Г.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

2024 р.

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Дульському Віталію Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ

затверджена наказом по університету від _____ 03.11.2023 р. № 1287 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 23.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи

3.1 Платформа програмування FreeCad;

3.2 Використання вимірювальної системи НРРА.

4. Зміст розрахункової записки(перелік питань, які потрібні розробити)

4.1 Вступ;

4.2 Сфери застосування верстатів з ЧПУ та актуальність оптимізації програм;

4.3 Автоматизація налаштувань верстатів;

4.4 Управління ресурсом інструменту і оптимізація керуючої програми;

4.5 Розробка технологічного комплексу обробки тіла обертання;

4.6 Висновок.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 13 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування Розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		Підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	15.11.2023	Виконано
2	Аналіз сфери застосувань верстатів з ЧПУ та оптимізації керуючих програм	23.11.2023	Виконано
3	Провести вибір платформи для реалізації керуючої програми та системи з ЧПУ	03.12.2023	Виконано
4	Провести розробку схеми системи, принципу підключення та обміну інформацією, описати датчик	12.12.2023	Виконано
5	Провести моделювання системи та отримати G-код	19.12.2023	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	03.01.2024	Виконано
7	Подання роботи до ЕК	24.01.2024	

Дата видачі завдання 25.11.2023

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

Дульський В.І.
(прізвище, ініціали)

доц. Стародубцев М.Г.
(посада, прізвище, ініціали)

Я як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

06.01.2024

A square image showing a handwritten signature in blue ink on a light-colored background. The signature is stylized and appears to be the initials 'V.I.' followed by a surname.

Дульський В.І.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 89 с., 1 табл., 23 рис., 36 джерел.

ОПТИМІЗАЦІЯ, ВЕРСТАТ, КЕРУЮЧА ПРОГРАМА, FANUC, РОБОТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС, СТУПИЦЯ ДИСКУ, ЕФЕКТИВНІСТЬ.

Об'єкт дослідження – процес оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ.

Предмет дослідження – роботизований комплекс для обробки ступиці диску.

Мета кваліфікаційної роботи – вибір платформи реалізації та розроблення методу оптимізації керуючої програми для верстата з ЧПУ, дослідження існуючих.

Методи дослідження включають літературний аналіз, математичне моделювання, статистичний аналіз.

У кваліфікаційній роботі визначено основні методи оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ. Встановлено основні цикли, які використовуються для верстатів з ЧПУ, розглянуто особливості автоматизації налаштувань верстатів з застосуванням засобів оснащення. Проведено огляд літературних джерел, встановлено основні методи і засоби оптимізації керуючих програм.

Проведено розробку робототехнічного комплексу, виконано основні розрахунки та наведений приклад керуючої програми.

THE ABSTRACT

Explanatory note: 89 p., 1 table, 23 figures, 36 references.

OPTIMISATION, MACHINE TOOL, CONTROL PROGRAMME,
FANUC, ROBOTIC COMPLEX, DISC HUB, EFFICIENCY.

The object of research is the process of optimization of control programs for CNC machines.

The subject of research is a robotic complex for processing a disc hub.

The purpose of the qualification work is selection of a platform for implementation and development of a control program optimization method for CNC machines, researching ones.

Research methods include literary analysis, mathematical modeling, statistical analyses.

The qualification work identifies the main methods of optimizing control programs for CNC machines. The basic cycles used for CNC machines are established, the features of automation of machine settings with the use of tooling are considered. A review of literature sources is carried out, the main methods and means of optimizing control programs are identified.

The development of a robotic complex was carried out, basic calculations were performed and showed an example of control program.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ.....	10
1 Сфери застосування верстатів з ЧПУ та актуальність оптимізації керуючих програм	12
1.1 Застосування верстатів з ЧПУ та основні технологічні процеси.....	12
1.2 Спрощене програмування при обробці деталей. Огляд основних циклів.....	16
1.3 Застосування ЧПУ FANUC та огляд основних функцій.....	27
1.4 Висновки до першого розділу.....	31
2 Автоматизація налаштувань верстатів з застосуванням засобів оснащення верстатів. Управління ресурсом інструменту і оптимізація керуючої програми	32
2.1 Вибір вимірювальної системи	32
2.2 Принцип підключення та обміну інформацією	35
2.3 Опис датчика	36
2.3 Управління ресурсом інструмента	38
2.4 Методи оптимізації керуючої програми.....	42
2.5 Висновки до другого розділу	49
3 Розробка технологічного комплексу обробки тіла обертання на прикладі ступиці диску з застосуванням ЧПУ FANUC та оптимізованої керуючої програми	50
3.1 Склад комплексу	50
3.2 Розробка оптимізованої керуючої програми для обробки тіл обертання.....	56
3.3 Питання з охорони праці.....	71
3.4 Висновки до третього розділу	72
Висновки	73
Перелік джерел посилання	74
Додаток А Код програми.....	78

	8
Додаток Б Апробація наукових результатів.....	83
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	89

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

РТК – роботехнічний комплекс;

КП– керуюча програма

ПР – пневморозподільник;

ЧПУ – числове програмне управління;

ШНМ – штучна нейронна мережа;

ПЗ – програмне забезпечення;

CAD – computer-aided design;

CAM – computer-aided manufacturing.

ВСТУП

З давніх часів основне обладнання, таке як токарні верстати, обробні центри, преси та термопластавтомати були основою виробництва. Немає жодного виробничого підприємства, яке, ймовірно, не інвестувало б у ці пристрої. Автоматизація цих машин дає виробникам явні переваги з погляду використання, вторинних процесів, трудових ресурсів та продуктивності. Щоразу, коли машина простоє або оператор недоступний для підтримки, це означає втрату продуктивності та прибутку.

Дані системи числового програмного управління (ЧПУ) викликають надмірне навантаження на інструмент в режимі різання, можуть прискорити зношування інструменту і навіть призвести до його пошкодження. В іншому випадку збільшення часу обробки може вплинути на продуктивність.

Таким чином, дані ЧПУ впливають як на якість, так і продуктивність роботи. Окрім цього, інтерполяція контролера з ЧПУ значно впливає на готовий виріб. Саме тому оптимізація керуючих програм для верстатів з ЧПУ в нинішній час є актуальним напрямком досліджень.

Метою написання кваліфікаційної роботи є дослідження методів оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ.

При написанні роботи були поставлені наступні задачі:

- розглянути сфери застосування верстатів з ЧПУ та актуальність оптимізації керуючих програм;
- навести методи автоматизації налаштувань верстатів з застосуванням засобів оснащення верстатів. Розглянути питання управління ресурсом інструменту і оптимізації керуючої програми;
- виконати розробку технологічного комплексу обробки тіла обертання на прикладі ступиці диску з застосуванням ЧПУ FANUC та оптимізованої керуючої програми.

Об'єктом дослідження є процес оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ.

Предметом дослідження є роботизований комплекс для обробки ступиці диску.

При написанні роботи були застосовані методи аналізу існуючих методів оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ; порівняння керуючих програм та циклів; дослідження методів оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ.

Практична цінність отриманих результатів. Розроблені рішення можна застосовувати на практиці при застосуванні ЧПУ FANUC та при обробці тіл обертання. Окрім того, можливе застосування оптимізованої програми.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації методів оптимізації керуючих програм та у запропонуванні власного методу оптимізації на прикладі тіла обертання за допомогою ЧПУ FANUC.

Робота виконана згідно [1-2]. Результати роботи опубліковані в [3].

1 СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ ОПТИМІЗАЦІЇ КЕРУЮЧИХ ПРОГРАМ

1.1 Застосування верстатів з ЧПУ та основні технологічні процеси, які виконуються на верстатах

З появою електроніки в 1960-х роках з'явилися перші верстати з ЧПУ, що дають змогу автоматизувати процес обробки, підвищуючи точність і швидкість виробництва. Відтоді вони стали ключовою технологією в сучасному виробництві та широко використовуються в таких секторах, як авіація, автомобілебудування, електроніка [4].

Нині зростає потреба в підвищенні продуктивності та зниженні витрат завдяки підвищенню ефективності та якості виробничих процесів.

У цьому контексті відбуваються швидкі та постійні удосконалення технологій, що дозволяють розробляти нові підходи до контролю, точності, цілісності поверхні та гнучкості процесів.

Останні тенденції в галузі верстатів з ЧПУ зосереджені на вдосконаленні управління процесом, включно з методами моніторингу процесу за допомогою онлайн-аналізу операцій, що дає змогу коригувати процес у режимі реального часу. Метою є забезпечення якості та повторюваності під час виробництва деталей, а також підвищення гнучкості та контролю процесу, щоб мати можливість адаптуватися до мінливих вимог ринку. Крім того, особлива увага приділяється цілісності поверхні деталей, щоб забезпечити їхню функціональність і довговічність.

Обробка з ЧПУ – це сучасний спосіб виготовлення речей, який змінив обробку промисловість. Він використовує комп'ютерні програми для управління машинами і створення точних деталей, що відповідають конкретним вимогам. Це важливо для багатьох галузей промисловості, таких як аерокосмічна, оборонна, автомобільна та медична [4].

Найпоширенішими верстатами з ЧПУ є фрезерні верстати з ЧПУ, свердлильні верстати з ЧПУ, токарні верстати з ЧПУ, фрезерні верстати з ЧПУ і електроерозійні верстати (дротяно-ерозійна обробка).

Обробка з ЧПУ – це сучасна технологія в галузі механічної обробки, яка використовує кероване комп'ютером переміщення осей (зазвичай 3, 4 або 5) для значного підвищення точності та ефективності виготовлення деталей. Широко застосовується для обробки різних матеріалів, таких як метал, пластик, дерево, кераміка тощо.

Порівняно з традиційною обробкою, обробка з ЧПУ має очевидні переваги. Його основні застосування в технології механічної обробки включають:

Виробництво деталей. Верстат з ЧПУ може виробляти дуже складні тривимірні деталі, використовуючи 3D-моделі, створені за допомогою САПР або іншого програмного забезпечення для механічного проектування, і створюючи програми ЧПУ за допомогою програмного забезпечення САМ. ЧПУ дає змогу домогтися високоточного виготовлення деталей, що дає змогу заощадити витрати і час на дослідження і розробки, а також підвищити ефективність виробництва.

Різьба. Обробку з ЧПУ можна використовувати для різьблення і прикраси, наприклад, по дереву, каменю, пластику тощо. Завдяки точному контролю над траєкторією кривої інструменту можна домогтися складного різьблення, наприклад, ефектів високого рельєфу, роблячи його красивішим.

Виробництво прес-форм. Процес обробки з ЧПУ є найкращим вибором для виготовлення прес-форм, оскільки прес-форми вимагають високої точності, повторюваності та масового виробництва, що є сильною стороною технології ЧПУ. Використання верстатів з ЧПУ для виготовлення прес-форм дає змогу домогтися ефективного виробництва і збільшення обсягів виробництва.

Обробка деталі. Під час механічного оброблення деталей зазвичай вимагає ручного оброблення, наприклад, з використанням напилків і

наждачного паперу, що може призвести до отримання нерівних поверхонь і складних геометричних форм. Обробка на верстатах з ЧПУ дає змогу виконати ці завдання, забезпечуючи при цьому гладкі поверхні, високу точність і високу ефективність.

Автоматизовані виробничі процеси. Обробку з ЧПУ також можна використовувати на виробничих лініях комп'ютерно-інтегрованого виробництва (СІМ) або автоматизованого виробництва (САМ). Це робить механічне виробництво повністю автоматизованим, тим самим знижуючи виробничі витрати, підвищуючи ефективність і якість виробництва, а також підвищуючи надійність і стабільність виробництва деталей [4].

Обробка з ЧПУ знаходить різні застосування в різних галузях обробної промисловості, включно з автомобільною, аерокосмічною, медичною та електронною. Верстати з ЧПУ можуть виробляти високоточні деталі та компоненти, що використовуються в багатьох продуктах, від блоків двигунів до хірургічних інструментів [4].

Автомобільна промисловість. В автомобільній промисловості верстати з ЧПУ виробляють деталі, що вимагають жорстких допусків і точних характеристик, такі як блоки двигунів, корпуси трансмісії та компоненти підвіски. Верстати з ЧПУ також можуть створювати індивідуальні деталі, унікальні для конкретної моделі автомобіля.

Аерокосмічна промисловість. Верстати з ЧПУ виробляють деталі літаків, космічних кораблів і супутників в аерокосмічній промисловості. Ці деталі мають бути легкими, міцними і витримувати екстремальні умови. Верстати з ЧПУ можуть створювати складні форми і контури, які неможливо досягти традиційними методами обробки.

Медична промисловість. Верстати з ЧПУ виробляють хірургічні інструменти, протези та імплантати в медичній промисловості. Ці деталі мають бути точними та надійними, щоб забезпечити безпеку пацієнта. Верстати з ЧПУ можуть мати деталі складної конструкції та жорстких допусків, необхідні для медичного застосування.

Електронна промисловість. Обробка з ЧПУ є незамінною технологією в електронній промисловості, яка використовується для виробництва широкого спектра електронних компонентів і пристроїв з високою точністю і акуратністю. ЧПУ використовується для різання і свердління друкованих плат, формування корпусів і роз'ємів, виготовлення радіаторів, створення електронних компонентів і прототипування.

Промисловість оптичного зв'язку. Обробка на верстатах з ЧПУ використовується в індустрії оптичного зв'язку для створення точних компонентів, таких як оптоволоконні роз'єми, наконечники, оптичні фільтри та з'єднувачі. Ці компоненти мають вирішальне значення для ефективної передачі даних оптичних волокон.

Військова та оборонна промисловість. Обробка з ЧПУ широко використовується в оборонній промисловості для виробництва високоточних компонентів аерокосмічних систем, систем озброєння, броні, компонентів транспортних засобів, засобів зв'язку та електроніки. Це має вирішальне значення для забезпечення надійності та продуктивності цих систем.

Нафтова та газова промисловість. Обробка з ЧПУ широко використовується в нафтогазовій промисловості для різних цілей, включаючи виробництво компонентів бурового обладнання, клапанів, насосів та трубопроводів. ЧПУ також використовується при виготовленні морських споруд, а також при ремонті та модернізації обладнання. Обробка на верстатах з ЧПУ забезпечує високу точність та надійність критично важливих компонентів у суворих умовах.

Енергетика. В енергетичній галузі на верстатах з ЧПУ виготовляються складні деталі для різних застосувань, таких як турбіни, обладнання для буріння нафти та газу, компоненти атомних електростанцій та каркаси сонячних батарей. Цей процес гарантує високу точність, акуратність, довговічність та стійкість до зносу [4].

Обробка на верстаті з ЧПУ має низку переваг у порівнянні з традиційними методами обробки. Верстати з ЧПУ можуть виробляти деталі з

більшою точністю, стабільністю та повторюваністю, що має вирішальне значення у багатьох галузях промисловості. Верстати з ЧПУ також можуть створювати складні деталі та форми, які неможливо отримати за допомогою традиційних методів обробки.

Верстати з ЧПУ можуть працювати цілодобово та без вихідних з мінімальним втручанням людини, що робить їх ідеальними для виробництва більших обсягів деталей. Окрім того, верстати також можуть виконувати кілька операцій, таких як фрезерування, свердління та нарізування різьблення, за одну установку, що скорочує час та вартість виробництва [3].

Верстати з ЧПУ також можуть знизити ризик людської помилки, що призводить до дорогих помилок та затримок виробництва. У верстатах з ЧПУ використовується попередньо запрограмоване комп'ютерне програмне забезпечення, яке контролює їх рухи та дії, що гарантує, що деталі щоразу виробляються відповідно до точних специфікацій.

1.2 Спрощене програмування при обробці деталей. Огляд основних циклів

В останні роки пропозиції відомих виробників систем управління включають системи управління ЧПУ з програмним забезпеченням, які дозволяють адаптувати звичайні машини до автоматичної роботи, аналогічні роботі верстатів з ЧПУ.

Основною перевагою використання є підвищення продуктивності та гнучкості верстатів з механічним керуванням.

Характерними рисами даних систем є [5, 6]:

- контроль ходу операцій на графічних моніторах;
- використання напіваавтоматичних циклів обробки;
- корекція геометрії інструменту (до 15 інструментів);
- підтримка постійної швидкості на поверхні об'єкта;

- створення програм, що зберігаються в кодї DIN-ISO, та перетворення програм циклу на код ISO;

- відображення одиниць подачі в мм/хв і мм/оберт.

Крім того, можна проводити такі операції:

- зміна конфігурації екрана оператора ЧПУ;

- розширена діагностика в режимі реального часу;

- управління інструментами та інтеграція з офісом заводу;

- автоматична сигналізація обслуговування верстатів;

- редактор візуалізації логічного процесу;

- програмне забезпечення для узгодження сервоприводу.

Коли тривимірна комп'ютерна модель використовується для токарної обробки, свердління та фрезерування в системі ручного керування, вона може перетворитись на програму ISO з використанням G кодів [7, 8].

Під час редагування програми система відображає всі значення функцій, що використовуються, включаючи графічну підтримку. Таке спрощене «геометричне» програмування дозволяє обчислювати координати, які не вказані в кресленні деталі.

При використанні циклів чорнової обробки на токарному верстаті з ЧПУ є кілька варіантів [9, 10].

Розглянемо стандартні цикли G71, G72, G73.

Цикл чорнової обробки G71 дозволяє швидко видаляти матеріал на токарному верстаті з ЧПУ, а також записувати траєкторію фрези як підпрограму, яку можна повторно використовувати під час циклу чистової обробки (G70) [11].

Стандартний цикл G71 виконує чорнову обробку профілю з використанням лінійних переміщень осі Z [11].

Приклад програмування циклу G71 наведено на рис. 1.1.



G0 X32. Z3.
 G71 U2. R0.2
 G71 P100 Q150 U0.3 W0.3 F0.15

N100 G1 X10 Z0
 N110 G1 Z-8
 N120 G1 X20 Z-18
 N130 G1 X30
 N140 G1 Z-25
 N150 G1 X32.

Рисунок 1.1 – Програмування циклу коду G71

G71 – це G-код, який повідомляє органам управління, що необхідно використовувати цикл чорнової обробки і наступна подальша інформація застосовується до нього.

U у першому рядку коду – це глибина різання кожного чорнового проходу. R вказує на те, як далеко інструмент відійде від деталі X при швидкому поверненні до початку циклу.

Значення «P» та «Q» визначають відповідно початкову та кінцеву точки підпрограми. Ці значення можуть бути будь-якими трицифровими числами, якщо вони збігаються з числами N підпрограми.

Розглянемо приклад [11]:

N100;

ПІДПРОГРАМА ПРОФІЛЮ;

N200;

У наведеному вище прикладі "P" - P100, а "Q" - Q200.

Літера U у другому рядку G71 повідомляє верстату, скільки необхідно залишити для чистового проходу в X, а W - це припуск на чистову обробку в осі Z.

Приклад коду G71:

G71 U1.0 R1.0;

G71 P100 Q200 U0.2 W.05 F0.2;

N100 G00 X19.0;

G01 G42 Z0.0 F0.2;

X20.0 Z-0.5;

Z-20.0;

X40.0 Z-30.0;

Z-65.0, R5.0;

X60.0;

N200 G40 X70.0 Z5.0 F200;

Розберемо цей код.

G71 U1.0 R1.0;

Цей перший рядок каже, що робиться пропил 1,0 мм (U), а інструмент відводиться на 1,0 мм після кожного розрізу (R).

G71 P100 Q200 U0.2 W.05 F0.2;

Вказується початок профілю підпрограми, якою необхідно, щоб чорновий інструмент слідував. P100 повідомляє органам управління шукати N100 і починати зчитування з цієї точки. Q200 повідомляє машині про припинення читання підпрограми під час читання N200.

N100 G00 X19.0;

N визначає перший рядок підпрограми, наступний код – це профіль деталі, яку необхідно вирізати. G00 X19.0 переміщує інструмент у вихідне положення для обробки фаски під 45 градусів на передній частині деталі. (Припускається, що позиція Z вже вказана у програмі у попередній точці)

G01 G42 Z0.0; F0.2;

G01 обирає рух з лінійною швидкістю подачі, G42 включає компенсацію радіусу вершини інструменту, Z переміщає інструмент до передньої частини деталі (припускаємо, що вихідна точка або нульова точка знаходиться на передній поверхні завдання) і, нарешті, надається швидкість подачі 0,2 мм за оберт.

X20.0 Z-0.5;

Z-20.0;

X40.0 Z-30.0;

Z-65.0, R5.0;

X60.0;

Ці блоки G-коду повідомляють машині форму профілю, яку варто вирізати.

N200 G40 X70.0 Z5.0 F200;

Закінчується блок, присвоюючи номер N, який обирається для позначення кінцевої точки підпрограми. G40 відключає компенсацію радіусу вершини інструменту, Z5.0 переміщує інструмент на 5 мм передньої поверхні деталі. Ця лінія може бути запрограмована за допомогою швидкого переміщення G00.

Можна не тільки виконати чорнову обробку осі Z, використовуючи цикл чорнової обробки G71, але також можна виконати чорнову обробку осі X, використовуючи цикл торцювання G72.

G72 працює багато в чому так само, як G71, але ріже у напрямку до центральної лінії деталі [9,10].

У цьому циклі інструмент різатиме по осі X у напрямку до центральної лінії компонента. Це використовується, коли необхідно повернути втулку передньої частини деталі або видалити матеріал у цьому напрямку. Цикл буде наслідувати контур профілю за допомогою підпрограми, яку розміщують між числами «N», а потім викликають цю підпрограму за допомогою команди G72. Припуски на чистову обробку додаються символами «U» і «W».

Цикл G72 використовує два рядки G-коду, щоб повідомити верстат, як ми хочемо, щоб цикл виконувався. Деякі машини можуть використовувати однорядкову версію [14].

Приклад програмування циклу G72 представлений на рис. 1.2.

Приклад G коду:

G72 W0.8 R2.0;

G72 P200 Q300 U1.0 W0.5 F0.2;

N200 G00 X19.0;

G01 G41 Z0.0;

X20.0 Z-0.5;

Z-20.0;

X40.0 Z-30.0;

N300 G40 X70.0 Z5.0 F200;

Розглянемо цей код.

G72 W0.8 R2.0;

Цей перший рядок повідомляє, що приймаємо глибину різання 0,8 мм, а інструмент відводиться на 2,0 мм від матеріалу, перш ніж повернутись до наступної початкової точки.

G72 P200 Q300 U1.0 W0.5 F0.2;

Значення P відповідає номеру N на початку підпрограми, яку необхідно вирізати, а Q відповідає номеру N в кінці підпрограми.

U1.0 залишить 1,0 мм на діаметрі деталі для чистового інструменту, який буде видалений у пізнішій операції.

W0.5 залишить 0,5 мм на лицьовій стороні деталі для чистової операції.

F визначає швидкість подачі. F0.2 подаватиме зі швидкістю 0,2 мм за оборот шпинделя / деталі.

N100 G00 X19.0;

N визначає перший рядок підпрограми, наступний код – це профіль деталі, яку необхідно вирізати. G00 X19.0 переміщує інструмент у вихідне положення для обробки фаски під 45 градусів на передній частині деталі. (Припускається, що позиція Z вже вказана у програмі у попередній точці).

G01 G41 Z0.0;

G01 обирає рух з лінійною подачею, G41 включає компенсацію радіусу вершини інструменту, Z переміщує інструмент до передньої частини деталі і, нарешті, задається швидкість подачі 0,2 мм на оборот.

X20.0 Z-0.5;

Z-20.0;

X40.0 Z-30.0;

Ці блоки G-коду повідомляють машині форму профілю, який необхідно вирізати.

N300 G40 X70.0 Z5.0 F200;

Далі завершується підпрограма профілю, присвоюючи номер N, який обрали для визначення кінцевої точки підпрограми. G40 використовується для скасування компенсації радіусу вершини інструменту, Z5.0 переміщує інструмент на 5 мм від передньої поверхні деталі. Ця лінія може бути запрограмована за допомогою швидкого переміщення G00.

Деякі системи ЧПУ, такі як Fanuc 10T, використовують однорядкову версію цього циклу.

Приклад [14]:

G72 P200 Q300 U0.0 W0.0 D2.0 F.02;

Основна відмінність цього стилю програмування полягає в тому, що тепер переміщене значення глибини різання, яке у дворядковій версії було W. Тепер він називається "D" і знаходиться в тому ж рядку, що й інша інформація.

G72 – це цикл обробки, значення P і Q, як і раніше, є початковою і кінцевою точкою підпрограми.

Значення U та W визначають припуск на чистову обробку або кількість, яку залишають для чистового пропилю.

"D" тепер є нашим значенням відведення, що передає контролеру, як далеко відійти від матеріалу між різаннями.

Цикл G72 використовується для торцювання, а цикл повторення шаблону G73 використовується, коли обробляється профіль, який вже вирізаний.

Далі розглянемо цикл G73 та те, як він працює.

G73 повідомляє машині, що необхідно використати цикл шаблону [15-18].

"U" визначає глибину різання кожного чорнового проходу по осі X. "W" – це кількість, яку необхідно скоротити по осі Z. R – це необхідна кількість проходів.

«P» і «Q» дозволяють елементу керування знати розташування підпрограми профілю, який використовується. Ці значення можуть бути будь-якими, якщо вони збігаються з числами N підпрограми. Це буде виглядати так, як показано нижче.

N150;

ПІДПРОГРАМА ПРОФІЛЮ;

N250;

У цьому прикладі "P" – P150, а "Q" - Q250.

«U» у другому рядку G73 – це кількість матеріалу, яку необхідно залишити для чистового проходу по осі X, а «W» – це припуск на чистову обробку по осі Z.

'F' – це команда, яка використовується для визначення швидкості подачі.

Приклад коду G73:

G73 U1.0 W1.0 R3;

G73 P150 Q250 U0.2 W.05 F0.25;

N150 G00 X22.0;

G01 G42 Z0.0 F0.2;

X23.0 Z-0.5;

Z-23.0;

X44.0 Z-34.0;

Z-70.0, R5.0;

X70.0;

N250 G40 X80.0 Z6.0 F250;

Приклад програми представлений на рис. 1.3.

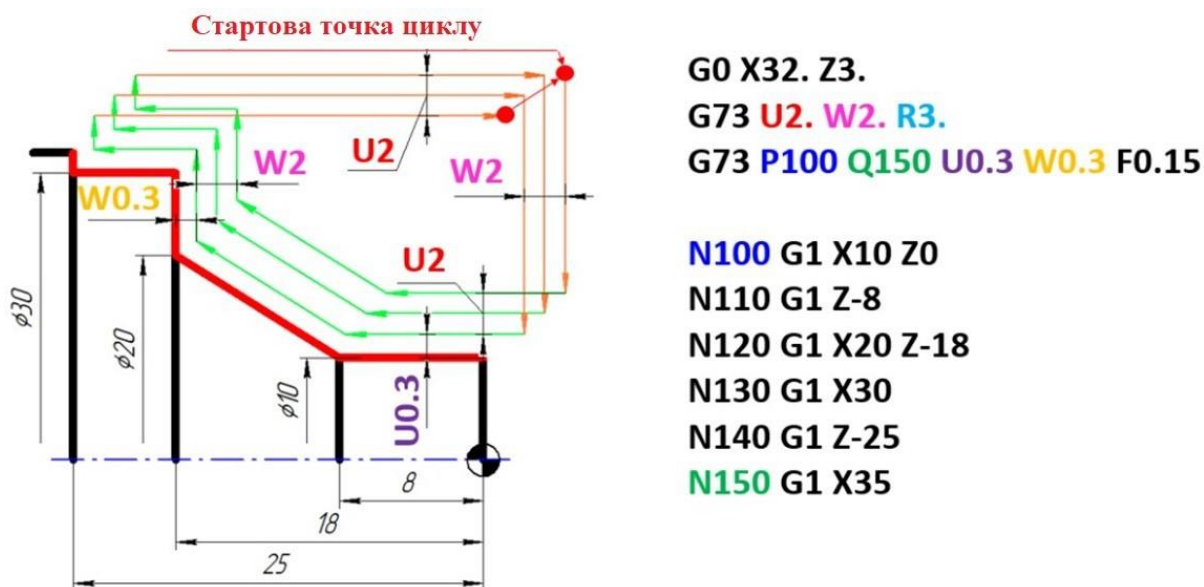


Рисунок 1.3 – Програмування циклу G73

G73 U1.0 W1.0 R3

У першому рядку вказується, що верстат повинен робити розрізи на 1,0 мм осі X (U) і видаляти 1,0 мм осі Z на кожному проході. R визначає кількість проходів, які необхідно зробити.

G73 P150 Q250 U0.2 W.05 F0.25;

Значення P повинно відповідати номеру N на початку підпрограми (N150), яку необхідно вирізати, а Q збігатися з номером N (N250) в кінці підпрограми.

U0.2 – це чистовий припуск X, а W0.05 – чистовий припуск Z. Це визначає, скільки матеріалу залишається для чистового інструменту, який потрібно видалити в пізнішій операції.

F визначає швидкість подачі. F0.2 подаватиме зі швидкістю 0,2 мм за оборот шпинделя / деталі.

N150 G00 X22.0;

N показує перший рядок підпрограми, G00 - G-код швидкого переміщення, а значення X переміщає інструмент на початок профілю.

```
G01 G42 Z0.0; F0.2;
```

G01 – це G-код переміщення з лінійною швидкістю подачі, G42 включає компенсацію радіуса вершини інструменту, Z переміщає інструмент до передньої частини деталі (припущено, що вихідна точка або нульова точка знаходиться на передній поверхні завдання) і, нарешті, задається швидкість подачі 0, 2 мм на оборот.

Швидкість подачі тут ігноруватиметься циклом G73, але вона використовуватиметься для циклу чистової обробки, для якого використовували б ту ж підпрограму.

```
X23.0 Z-0.5;
```

```
Z-23.0;
```

```
X44.0 Z-34.0;
```

```
Z-70.0, R5.0;
```

```
X70.0;
```

Це підпрограма, вона слідує профілю деталі.

```
N250 G40 X80.0 Z6.0 F250;
```

Цей блок коду завершується визначенням числа N, потім G40 відключає корекцію на ріжучий інструмент, рухи по осях X і Z переміщують інструмент від компонента, використовуючи високу швидкість подачі.

Окрім цього, варто розглянути G-код G90, який використовується визначення системи абсолютного позиціонування. Коли G90 активний, верстат зчитує всі розміри та переміщення з робочої вихідної позиції.

Якби подали команду руху, наприклад, G00 X100.0 Y100.0; тоді верстат переміститься на 100 мм у позитивному напрямку від нульової точки о осях X та Y.

Кожна команда переміщення, яка виконується, переміщатиме інструмент щодо позиції бази, яку встановлено раніше.

Наприклад, щоб перемістити фрезу в положення А від бази в нижньому лівому куті деталі, повинні задати розмір X, рівний +80. Щоб продовжити рух у позицію В, виставляється розмір X +100.

Приклад програмування представлений на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Приклад програмування G90

Таким чином, у абсолютному режимі кожен вимір береться з бази даних.

1.3 Застосування ЧПУ FANUC та огляд основних функцій

FANUC – це машинобудівний бренд світового класу, що пропонує провідні в галузі рішення з автоматизації та верстати, включаючи роботів, електроерозійну обробку RoboCut та передові вертикальні обробні центри RoboDrill.

Враховуючи, що ЧПУ FANUC в нинішній час широко застосовуються, в межах роботи буде розглянуто саме дану модель.

Призначення клавіш показано на рис. 1.5.

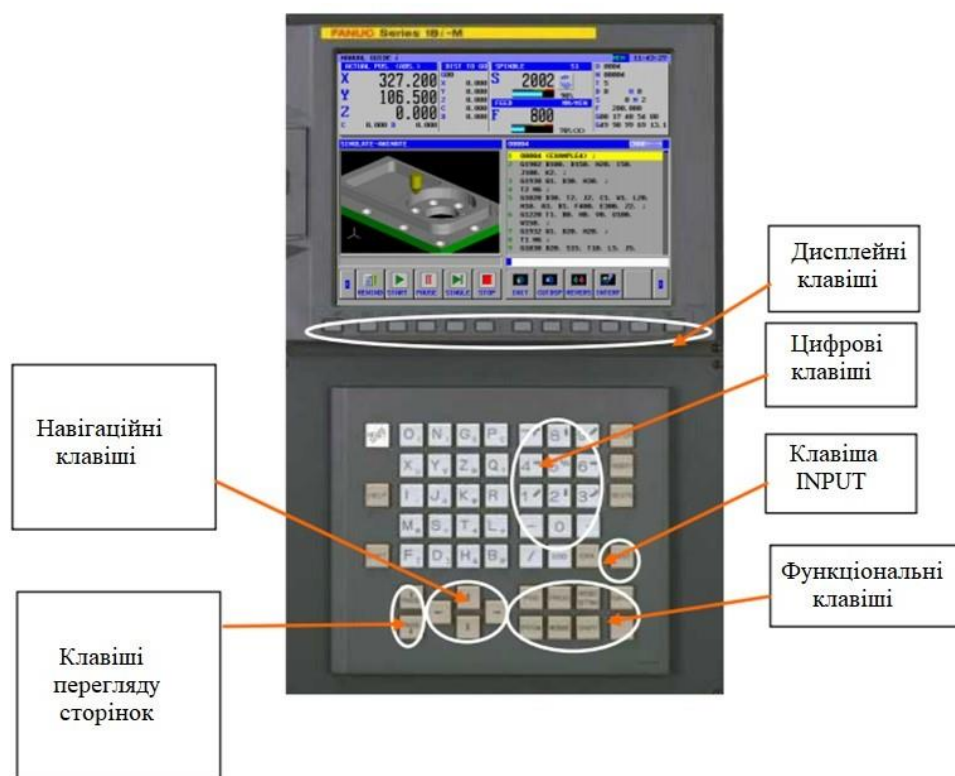


Рисунок 1.5 – Позначення клавіш

Далі наводиться послідовність операцій програмування (рис. 1.6) циклу обробки під час використання MANUAL GUIDE.

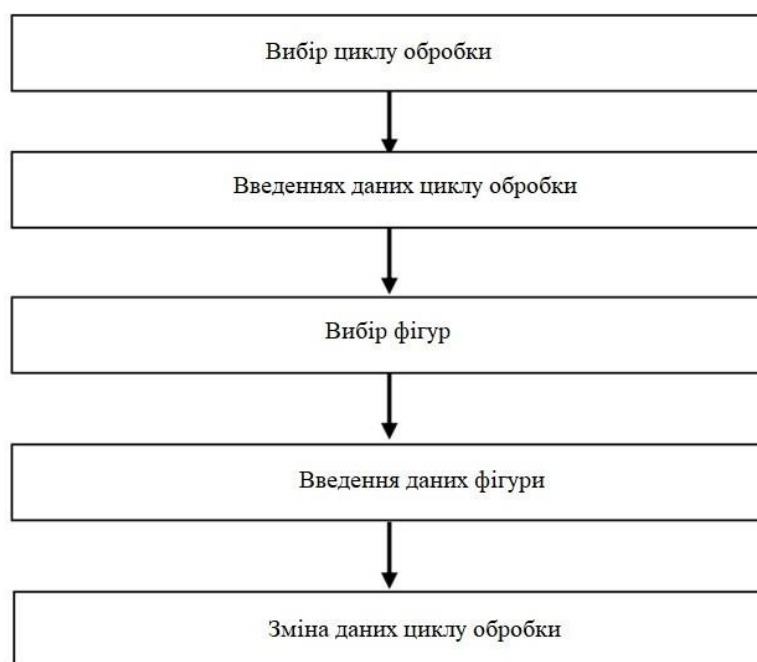


Рисунок 1.6 – Послідовність операцій програмування циклу обробки

Розглянемо дані функції.

Вибір циклу обробки. Необхідно натиснути кілька разів крайню ліворуч дисплейну клавішу, щоб відобразити показане далі меню дисплейних клавіш циклу обробки. Є два типи дисплейних клавіш: дисплейні клавіші для фрезерування та дисплейні клавіші для обточування.

Далі треба натиснути [ЦИКЛ], щоб відобразити меню циклу обробки.

Далі обираємо цикл обробки за допомогою кнопок переміщення курсору. (Можливий вибір групи циклів обробки за допомогою кнопок переміщення курсору, а потім обирається тип циклу обробки з групи циклів обробки за допомогою кнопок переміщення курсора.)

При натисканні дисплея [ОБР.] з'явиться вікно введення даних для вибраного типу циклу обробки. (Після введення номера меню можна вибрати цикл обробки, натиснувши клавішу ENTER)

Лінійка прокручування, що відображається на правій межі вікна меню циклу обробки, показує приблизне положення курсору в меню циклу обробки.

Якщо позначка лінійки прокручування знаходиться в середині лінійки прокручування, швидше за все, частина меню циклу обробки прихована за вікном. Якщо це так, то при натисканні клавіші переміщення курсору прихована частина стає видимою.

Вікно введення даних циклу обробки складається із двох розділів, один розділ для умов різання, а інший для докладних даних.

При натисканні клавіші переміщення курсору або відбувається перемикання розділів і зміна вкладки, що відображається.

Символ на вибраній вкладці відображається у синьому кольорі.

Вибір елемента введення Якщо натиснути клавішу переміщення курсора, або можна помістити курсор на потрібний елемент введення даних.

Приклад вікна введення даних циклу обробки:

ГЛИБИНА РІЗАННЯ - J=3.

ВЕЛИЧИНА ЧИСТОВОЇ ОБРОБКИ H=0.2

ШВИДКІСТЬ ПОДАЧІ $F=100$

Введення даних. Існує два типи елементів введення даних. Перший тип включає елементи, що вводяться у вигляді номерів, а інший тип складається з елементів, що вибираються з меню, що відображається за допомогою дисплейної клавіші.

Необхідні дані можна ввести при зверненні до коментаря елемента введення даних та напрямої схеми, що відображаються у вікні.

У елементі даних, що відображається у вікні режимів різання, існують дані, які можуть бути небезпечними, якщо вони встановлюються автоматично, наприклад, величина різання або швидкість подачі. Ці дані завжди повинні вводитись оператором. Інші дані встановлюються автоматично.

Елементи даних, що відображаються у вікні деталі, зазвичай встановлюються автоматично, продублюючи значення, введене минулого разу. Тому варто перевірити ці автоматично встановлювані значення та за потреби змінити їх.

Для виконання циклу обробки потрібен блок циклу обробки та фігурний блок, далі для них наведено пояснення. Після введення блоку циклу обробки слід обов'язково ввести фігурний блок.

Вихідні значення автоматично встановлюються у вікні введення даних. У вікні введення даних для фігурного блоку заготовки або блоку визначення інструментів, раніше введені дані встановлюються як вихідні значення. Тому оператор має ввести дані лише один раз на початку; у другій та наступних операціях введені дані встановлюються вже як вихідні значення. Так як дані фігури залежать від даних креслення, вихідні значення автоматично не встановлюються у вікні введення даних фігури.

Якщо не використовується функція бази даних інструментів, необхідно встановити блок визначення інструменту в меню визначення креслення до того, як задавати цикл фрезерування або обточування.

Дані блоку визначення інструмента потім можна скопіювати і автоматично встановити їх як вихідні значення даних умов інструменту для кожного циклу.

Все вищенаведене показує, що застосування ЧПУ FANUC є ефективним та може підвищити продуктивність праці.

1.4 Висновки до першого розділу

Обробка з ЧПУ здійснила революцію у способах виробництва в різних галузях промисловості. Верстати з ЧПУ мають ряд переваг у порівнянні з традиційними методами обробки, включаючи велику точність, послідовність, повторюваність і можливість створювати складні деталі та форми. Обробка з ЧПУ використовується у різних галузях промисловості та має важливе значення у виробничих роботах.

2 АВТОМАТИЗАЦІЯ НАЛАШТУВАНЬ ВЕРСТАТІВ З ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ОСНАЩЕННЯ ВЕРСТАТІВ. УПРАВЛІННЯ РЕСУРСОМ ІНСТРУМЕНТУ І ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ

2.1 Вибір вимірювальної системи

В роботі розглядається оптимізація керуючих програм для верстатів з ЧПУ на прикладі обробки ступиці диску з застосуванням ЧПУ FANUC та з застосуванням технологічного комплексу обробки.

Для виконання поставленого завдання необхідно виконати вибір вимірювальної системи, розглянути особливості підключення і обміну інформацією, виконати опис датчику, розглянути управління ресурсом інструменту та методи оптимізації керуючої програми.

В якості вимірювальної системи прийнято рішення зупинитися на системі з відкидним важелем НРРА фірми-виробника Renishaw [19].

Рука НРРА є вимірювальною системою з неавтоматичним відкидним важелем, на який встановлений контактний вимірювальний датчик.

Ця система постійно закріплена на токарному верстаті і може бути будь-якої миті використана для налагодження інструменту з високою точністю.

Запатентований поворотний пристрій забезпечує фіксацію руки з високою повторюваністю позиціонування. При цьому жодних додаткових пристроїв регулювання або фіксації не потрібно.

На додаток до своїх високих характеристик, рука НРРА займає дуже мало місця на верстаті завдяки компактній конструкції [19].

Основні характеристики та переваги:

- поворотний пристрій із тривалим терміном служби;

- утримувач із спеціальної сталі з низьким коефіцієнтом теплового розширення;
- використання на верстаті мінімального простору в неробочому режимі;
- постійна сигналізація про стан системи за допомогою світлодіодного індикатора;
- налагодження інструменту виконується за час, який може досягати значень на 90% менше часу, що витрачається при використанні традиційних методів;
- захист датчика у разі виходу за межі перебігу за допомогою ламкого запобіжника щупа;
- щупи мають конфігурації, що дозволяють працювати з інструментом таких розмірів: 16, 20, 25, 32, 40 та 50 мм [19].

Розміри (вид спереду) представлені на рис. 2.1.

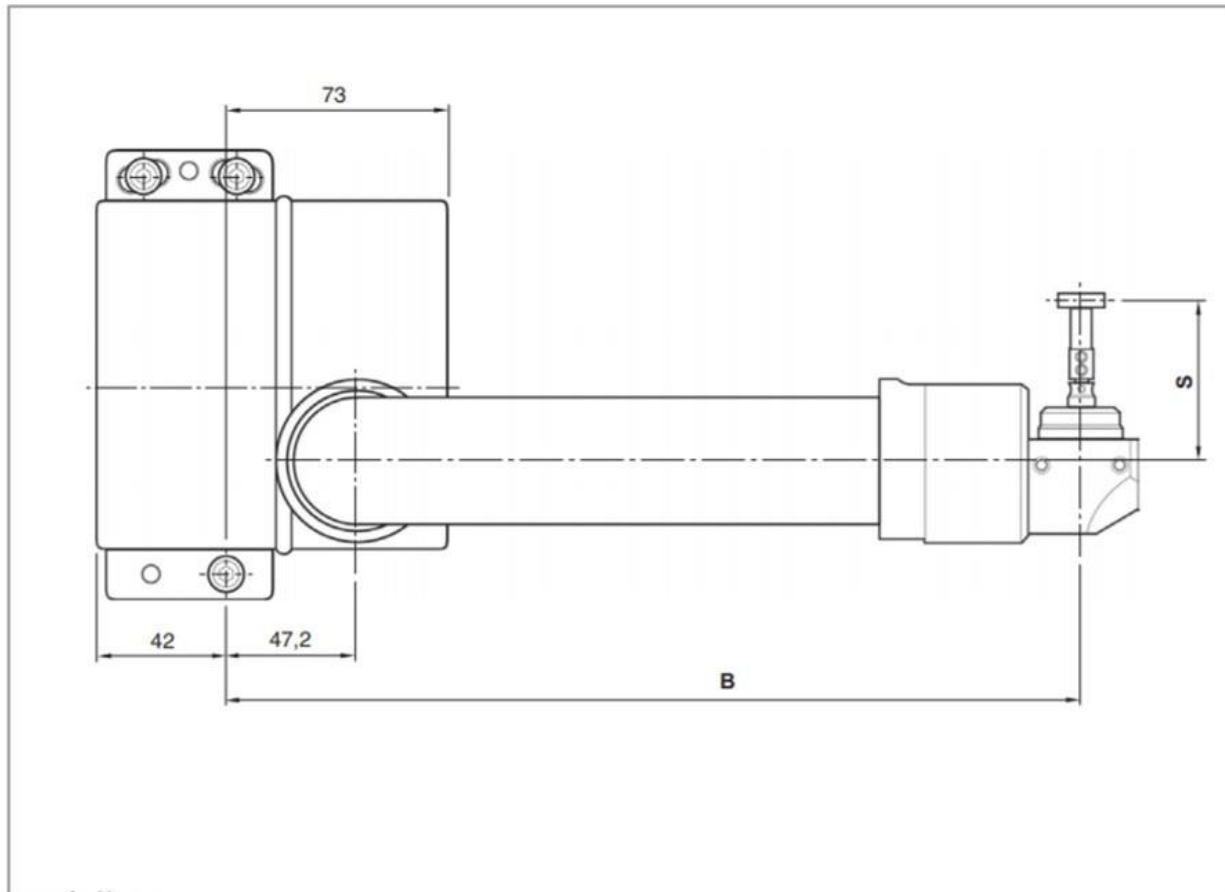


Рисунок 2.1 – Розміри (вигляд спереду) вимірювальної системи НРРА

Розміри (вид збоку) представлені на рис. 2.2.

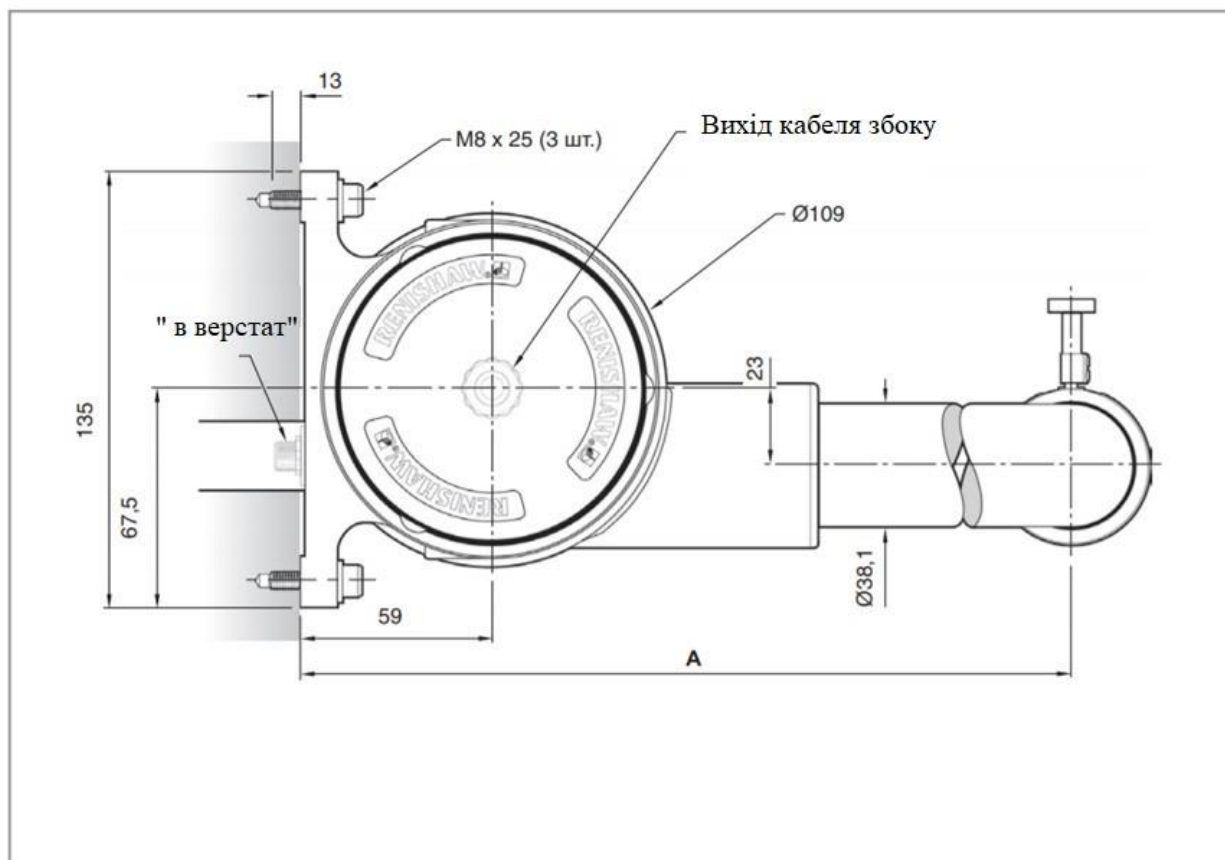


Рисунок 2.2 – Параметри вимірювальної системи (вид збоку)

Зовнішній вигляд представлений на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд НРРА

2.2 Принцип підключення та обміну інформацією

Обмін інформацією запропоновано виконувати за допомогою інтерфейсу TSI 2.

Інтерфейси TSI 2 та TSI 2-C обробляють сигнали, якими обмінюються маніпулятори HPRA та HPPA системи налагодження інструменту із системою управління верстатів з ЧПУ. TSI 2 сумісний із будь-якою стандартною системою ЧПУ з напругою живлення +24В постійного струму. Для систем ЧПУ, які працюють від іншої напруги, слід використовувати TSI 2-C. На виході цього інтерфейсу є сухі контакти твердотільного реле (SSR), що налаштовуються, які легко підключаються до будь-якої системи ЧПУ з напругою, відмінною від +24В.

Особливості та переваги:

- монтаж на DIN-рейку усередині шафи керування верстата;
- зручний механізм кріплення;
- зручне налаштування за допомогою виходу реле SSR (тільки TSI 2-C).

Зовнішній вигляд модуля представлено на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд модуля TSI 2-C

Принцип підключення представлений на рис. 2.5.

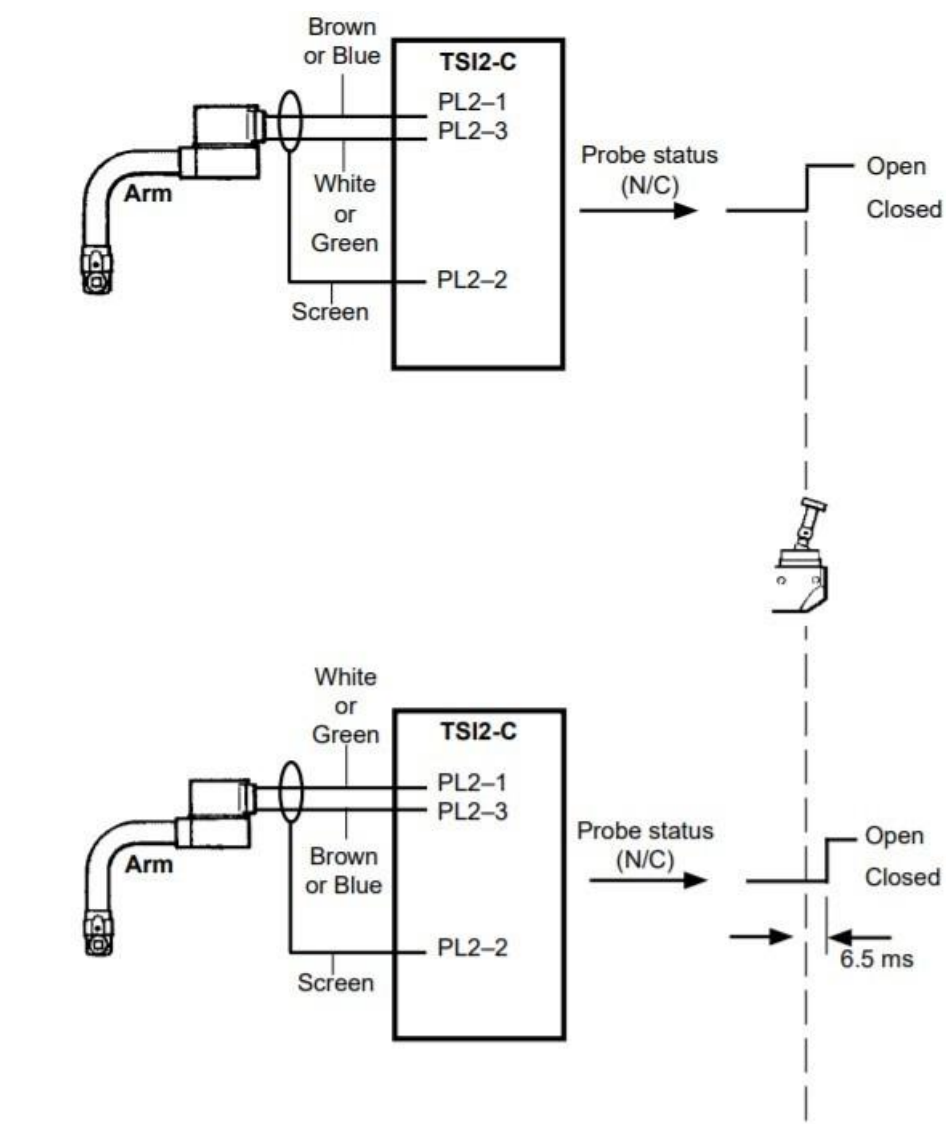


Рисунок 2.5 – Схема підключення до руки датчика

2.3 Опис датчика

Для представленої вимірювальної системи в якості прийнято рішення зупинитися на тому ж виробнику і здійснити вибір на користь RP 3 [20].

Схема установки датчика представлена на рис. 2.6.

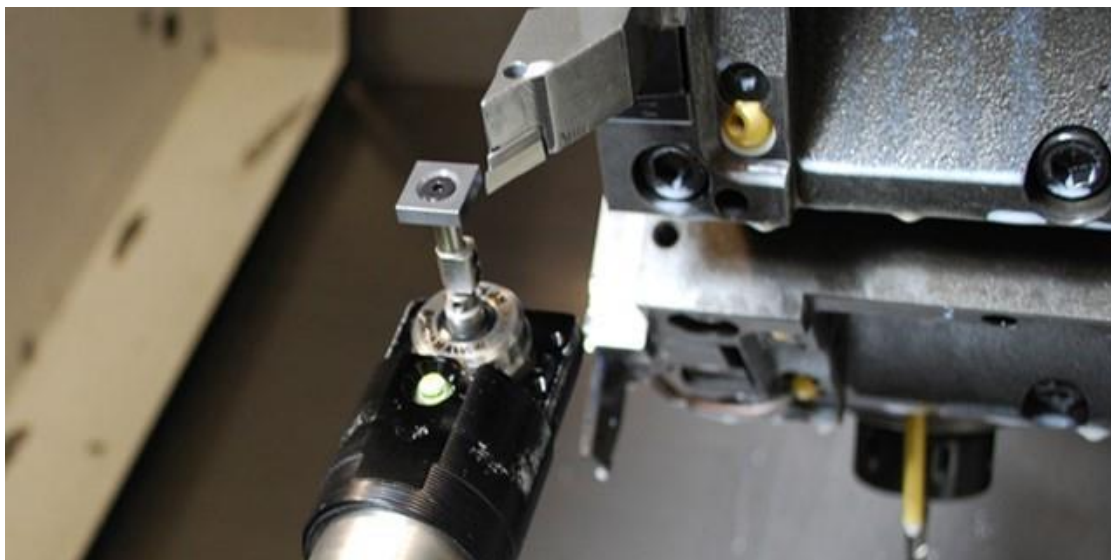


Рисунок 2.6 – Приклад встановлення датчика RP3

Даний датчик з точним базуванням для налагодження інструменту на токарних верстатах, який також можна використовувати для встановлення заготовки. Може встановлюватись у спеціальні тримачі (рис. 2.7), що виготовляються сторонніми виробниками.



Рисунок 2.7 – Приклад кріплення до руки

Він має різьбове з'єднання M4 для приєднання будь-якого контактної щупа Renishaw. Просте приєднання інтерфейсного кабелю до клем датчика за допомогою OEM-комплекту. Короткий корпус забезпечує суттєвий вигравш при налагодженні інструменту, зберігаючи при цьому всі переваги традиційних контактних тригерних датчиків Renishaw.

Особливості та переваги:

- сумісність з усіма щупами M4 виробництва Renishaw;
 - стандартне виконання: застосування на прецизійних руках для налагодження інструменту серії HP (HPRA, HPPA, HPMA);
 - універсальність: комплект може використовуватись в установках виробників комплектного обладнання;
 - підвищена надійність датчика: великий допустимий перебіг 9° [10].
- Дані йдуть у таблицю коректорів. Таким чином налаштовується верстат.

2.4 Управління ресурсом інструмента

Розглянемо особливості управління ресурсом інструменту відповідно до інформації, поданої в [5].

Для керування ресурсом інструменту використовується наступна команда: T▼▼▼▼ задає номер групи інструментів.

Функція керування ресурсом інструмента обирає із заданої групи інструмент і виводить його T-код. У ▼▼▼▼ задається номер, підрахований шляхом додавання номера скасування керування ресурсом інструменту, заданого у параметрі 6810, до номера групи. Наприклад, щоб задати групу інструменту 1, коли номер скасування керування ресурсом інструмента дорівнює 100, задається T101.

Варто зауважити, що якщо ▼▼▼▼ менший за номер скасування керування ресурсом інструмента, T-код розглядається як звичайний T-код.

M06. Завершує управління ресурсом для інструментів, що використовувалися до цього, і починає підрахунок ресурсу нових

інструментів, вибраних T-кодом.

H99. Встановлює H-код даних керування ресурсом інструменту для інструмента, який використовується зараз.

H00. Скасує корекцію на довжину інструменту.

D99. Встановлює D-код даних керування ресурсом інструменту, який використовується зараз.

D00. Скасовує корекцію на різець.

H99 або D99 мають бути задані після команди M06. Якщо код, відмінний від H99 або D99, задаються після команди M06, H-код і D-код даних управління ресурсом інструменту не встановлюються.

Для керування ресурсом інструмента є чотири типи заміни інструменту, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Типи заміни інструменту

Тип заміни інструменту	A	B	C	D
Номер групи інструменту, заданий у тому ж блоці, що команда заміни інструменту (M06)	Раніше використані інструменти	Інструменти для використання надалі		
Розрахунок часу підрахунку ресурсу інструменту	Підрахунок ресурсу виконується для інструмента у заданій групі інструментів, якщо за цим задається M06.			Підрахунок ресурсу виконується для інструменту в групі інструментів, заданої в тому ж блоці після того, як задано M06.

Продовження табл. 2.1

Тип заміни інструменту	A	B	C	D
Коментарі		Зазвичай, якщо номер групи інструментів заданий окремо, використовується тип В. Однак сигнал тривоги не виникає, навіть якщо номер групи заданий окремо.		Коли встановлено лише M06, видається сигнал тривоги P/S ном. 153.
Параметр	Ном. 6800 # 7 (M6T) = 0 ном. 6801 # 7 (M6E) = 0	ном. 6800 # 7 (M6T) = 1 ном. 6801 # 7 (M6E) = 0		ном. 6801 # 7 (M6E) = 1

Програма пишеться в параметричному вигляді або в систему ЧПУ можна ввести граничне зношування інструменту і при досягненні цього значення вона видасть сигнал.

Також можна коригувати інструмент автоматично, наприклад, виміривши знос датчиком положення.

Коли загальне зношування досягне закладеного максимуму в таблиці на стійці ЧПУ система видасть повідомлення.

Ресурс інструмента задано частотою використання (числом) або часом використання (у хвиликах). Число використання зростає на 1 для кожного інструмента у програмі.

Іншими словами, кількість використань зростає на 1, тільки якщо номер першої групи інструменту та команда заміни інструменту задаються після того, як пристрій ЧПУ входить у робочий стан після стану перезавантаження.

Якщо встановлено заміну інструмента (M06), керування ресурсом інструменту запускається для інструментів, заданих номером групи інструментів.

При керуванні ресурсом інструменту час, протягом якого

використовується інструмент у режимі різання, підраховується в інкрементах, рівних 4-м секундам.

Якщо група інструментів змінюється до закінчення інкрементного часу, що дорівнює 4-м секундам, час не підраховується. Час, коли інструмент використовується для зупинки одиночного блоку, зупинки подачі, форсованої поздовжньої подачі, затримки, блокування верстата і взаємоблокування, не підраховується.

Варто також зазначити наступне.

1. Якщо інструмент вибраний з доступних, пошук інструментів відбувається, починаючи з поточного інструменту до останнього, щоб знайти той, ресурс якого не минув.

Після досягнення останнього інструмента під час цього пошуку пошук поновлюється з першого інструменту.

Якщо встановлено, що немає інструментів, ресурс яких не минув, вибирається останній інструмент.

Якщо інструмент, який використовується зараз, замінюється за сигналом пропуску інструменту, наступний новий інструмент вибирається описаним тут способом.

2. Якщо ресурс інструменту підраховується часом, підрахунок ресурсу інструмента може бути скоригований за допомогою сигналу ручної корекції числа ресурсу інструмента.

Може застосовуватись ручна корекція від 0 до 99,9. Якщо встановлено 0, час не підраховується. До того, як можна використовувати можливість ручної корекції, повинен бути встановлений біт LFV ном. 6801.

3. Якщо підрахунок ресурсу інструмента показує, що ресурс останнього інструменту в групі минув, виводиться сигнал заміни інструменту.

Якщо ресурс інструменту керується часом, сигнал виводиться після закінчення ресурсу останнього інструмента групи.

Якщо ресурс інструменту керується частотою використання (числом), сигнал виводиться, коли пристрій ЧПУ перезавантажується або коли

задається M-код перезавантаження підрахунку ресурсу інструменту.

Алгоритм роботи програми з використанням датчика положення:

1. Налаштування інструмента;
2. Проведення обробки;
3. Вимірювання зносу;
4. Коригування положення на величину зносу.

Варто зазначити, що програма працює в автоматичному режимі.

2.5 Методи оптимізації керуючої програми

Наявність і реалізація правильного коду керуючої програми має вирішальне значення для плавного і надійного оброблення деталей. Це пов'язано з тим, що ефективність і якість обробки в кінцевому підсумку залежать від послідовності рухів у програмі ЧПУ. Спеціально для цієї мети розроблюються методи оптимізації керуючих програм [21-23].

Розуміння істинного значення оптимізації допоможе виробникам оптимізувати швидкість подачі своїх програм ЧПУ, заощадивши гроші та водночас даючи змогу більш ефективно обробляти деталі, покращувати якість деталей, збільшувати термін служби фрез і знижувати знос верстатів.

Деякі постачальники САМ називають оптимізованим програмним забезпеченням програмне забезпечення, яке найкраще підходить для типів програмованих машин, процесів або деталей. З одного боку, інтеграцію САМ із програмою САД можна вважати найефективнішим і найоптимальнішим способом роботи. І навпаки, програмістам САМ може бути краще, якщо вони виберуть спеціалізоване програмне забезпечення для конкретного типу завдання, замість того, щоб покладатися на рішення, інтегроване з САД. Часто обидва аргументи використовуються одним і тим самим постачальником САД/САМ залежно від ситуації.

Однак оптимізоване програмне забезпечення не слід плутати з програмним забезпеченням для оптимізації. Але навіть якщо звузати сферу

до програмного забезпечення для оптимізації програм ЧПУ, сенс залишається неясним. Деякі постачальники САМ називають оптимізацію програми ЧПУ здатністю автоматично визначати, який обсяг заготовки може обробляти кожен фрезер без стругання деталі. Інші називають оптимізацію поліпшенням траєкторії ріжучого руху за рахунок використання безперервного дотичного руху, а не різких, переривчастих рухів. Деякі визначають оптимізацію дуже широко, як візуалізацію процесу обробки і уявлення про те, як його поліпшити. Крім того, існує програмне забезпечення для аналізу процесів, яке об'єднує властивості матеріалу заготовки та динаміку верстата для прогнозування сил, температур тощо, які спричиняються заданою траєкторією інструменту. Прогнозовані результати потім можна проаналізувати, щоб визначити можливості ручного коригування частин траєкторії інструменту.

Автоматична оптимізація. Усе це відповідає словниковому визначенню "оптимізації". Однак один із найшвидших способів для виробника прес-форм домогтися значного підвищення ефективності та скорочення часу циклу програми ЧПУ – це автоматична оптимізація швидкості подачі програми ЧПУ. Просто оптимізуючи швидкість подачі програми ЧПУ, виробники прес-форм можуть скоротити час обробки на 15-50 відсотків, збільшити термін служби інструменту і поліпшити якість поверхні. Дивно, але багато виробників прес-форм не використовують цю технологію [24-27].

Технологія адаптивного керування. На перший погляд, технологія адаптивного керування (АС) здається життєздатним рішенням для оптимізації швидкості подачі. Зрештою, система АС динамічно визначає сили різання на верстаті та регулює швидкість подачі в реальному часі, щоб підтримувати силу на заданій межі, але під час використання технології змінного струму необхідно враховувати низку проблем. Найочевиднішою є вартість встановлення та обслуговування обладнання. Кожен верстат з ЧПУ повинен бути оснащений власним змінним струмом, вартість якого може становити тисячі доларів за верстат. Кожен з них має бути встановлений і

налаштований індивідуально. Після того, як верстат налаштований і, нарешті, працює правильно, як і у випадку з будь-якою електромеханічною системою, необхідно також зважати на питання налаштування, надійності та технічного обслуговування.

Більше того, технологія АС є реактивною системою. АС регулюють швидкість подачі на основі зворотного зв'язку, який вони отримують від двигуна приводу шпинделя, тобто вони регулюють швидкість подачі для підтримання постійного навантаження на привід шпинделя. Цей тип оптимізації підходить для певних типів дуже жорстких фрез, які можуть сприймати велике бічне навантаження, як-от торцеві фрези або великі кінцеві фрези. Однак оптимізація навантаження шпинделя не завжди може забезпечити оптимальні швидкості подачі для різних інструментів, матеріалів заготовок і умов різання. Наприклад, різання з нахилом не завжди істотно збільшує навантаження на шпиндель. Це збільшує осьове навантаження на осьові двигуни, коли машина проштовхує фрезу через матеріал, але не може збільшити навантаження на шпиндель, доки не стане занадто пізно.

Програмне забезпечення для автоматичної автономної оптимізації швидкості подачі.

Найкращим підходом є використання програмного забезпечення для автоматичної автономної оптимізації швидкості подачі, яке працює шляхом аналізу програми ЧПУ (G-коди або власні вихідні дані САМ) і контакту фрези з постійно мінливою заготовкою. Потім ділиться рух на більш дрібні сегменти, щоб визначити, в яких умовах збільшення швидкості подачі принесе користь, а де швидкість подачі необхідно зменшити, щоб захистити фрезу. Оскільки програмне забезпечення точно знає, скільки матеріалу знімається на кожному сегменті, воно може визначити ідеальну швидкість подачі. Траєкторія траєкторії інструмента ніколи не змінюється. А один автономний пакет програмного забезпечення можна застосувати до всіх машин у магазині.

Ключем до ефективної автоматичної оптимізації швидкості подачі є точна інформація про контакт фрези із заготовлею та стан програми ЧПУ. Точна модель контакту фрези в поєднанні з ідеальною швидкістю подачі під час різання для заданих умов контакту є основою автоматичної оптимізації швидкості подачі. Програмісту ЧПУ зазвичай необхідно знати ідеальну швидкість подачі для даного набору різів, перш ніж створювати хорошу програму ЧПУ. Якщо програміст ЧПУ не знає цієї інформації з досвіду, то, незалежно від інструментів оптимізації апаратного або програмного забезпечення, створення хорошої програми ЧПУ може виявитися скрутним.

Під час створення траєкторії САМ-системи не мають змоги точно визначити покроковий контакт фрези та об'єм матеріалу, що видаляється під час кожного різу. Без методу оптимізації програмного забезпечення, який точно моделює контакт фрези з матеріалом, програміст ЧПУ стикається зі складним завданням візуалізації матеріалу, що видаляється під час кожного різу, щоб отримати уявлення про матеріал, який перебуває в процесі обробки. Після цього їм необхідно інтуїтивно зробити оптимальну оцінку швидкості подачі, ґрунтуючись на своїх хороших знаннях в області обробки і припущеннях про умови різання. Це надзвичайно трудомісткий і схильний до помилок процес, тому програмісти ЧПУ змушені обирати тільки кілька (або одну) безпечних швидкостей подачі для всієї операції різання [27].

Програмне забезпечення для автоматичної автономної оптимізації швидкості подачі може позбавити від більшої частини здогадок. Програміст ЧПУ і верстатник можуть дозволити програмному забезпеченню налаштовувати себе самостійно або покладатися на свій власний досвід. Найчастіше найкраще працює поєднання цих двох методів. Програмне забезпечення включає функцію режиму навчання, в якому налаштування швидкості подачі зчитуються з програми ЧПУ, яка, як відомо, працює добре. Записані налаштування зберігаються в бібліотеці і можуть застосовуватися в інших програмах ЧПУ для різання аналогічних матеріалів аналогічними інструментами. Користувачі вважають цей метод чудовим способом

отримати хорошу відправну точку для ключових налаштувань оптимізації, таких як швидкість видалення об'єму, товщина стружки і швидкість різання. Звичайно, якщо програміст ЧПУ вже знає хороші методи різання, він може застосувати свій досвід і безпосередньо ввести налаштування.

Нарешті, після того, як програмне забезпечення вивчило хороші умови різання або з існуючих хороших програм ЧПУ, або від постійного експерта, інтерактивний режим спрощує процес налаштування наступного завдання. У цьому режимі попереднє налаштування відсутнє.

Меню пропонують користувачеві вибрати налаштування для кожного інструменту під час моделювання програми ЧПУ, і нова, оптимізована програма ЧПУ створюється автоматично за лічені секунди. Потім програмне забезпечення зберігає налаштування для подальшого використання [28].

Окрім цього, для оптимізації параметрів та налаштувань ЧПУ застосовуються нейронні мережі.

Інтерполяція контролера з числовим програмним керуванням, яка враховує планування прискорення/сповільнення траєкторії обробки, чинить значний вплив на готовий виріб.

Таким чином, налаштування планування прискорення/гальмування не тільки підвищує точність контурного оброблення і пригнічує вібрацію верстата, покращуючи якість поверхні, але також може знизити загальний МТ.

Був розроблений спеціальний інструмент для вимірювання відносного динамічного зсуву між інструментом і заготівлею в центральній точці інструменту (ТСР), так що межі прискорення осі і ривка можна було регулювати для підвищення точності контуру [29].

Результати роботи [26] показали, що вібрації в основному викликані прискоренням і ривками кожної осі, особливо в кутах. Інтегрований динамічний метод Асс/Дес було запропоновано для визначення кутової швидкості відповідно до максимальної помилки динамічного контуру; метод передбачає врахування динамічних помилок команд і сервоприводів.

Супутні дослідження з прогнозування помилок контуру зазвичай використовують аналітичне формулювання, яке зазвичай засноване на припущенні про тверде тіло. Було запропоновано інший підхід до мінімізації помилок відстеження і небажаних вібрацій - інтерполяція з використанням лінійної комбінації базисних функцій В-сплайна, що використовують прямий фільтр [27]. Інші методи включали використання віртуальної кіберфізичної системи (CPS) для розробки параметрів прискорення/гальмування для придушення небажаних вібрацій. Однак для визначення параметрів системи CPS необхідні великі експерименти, що ускладнює її реалізацію.

Іншими методами розроблення моделей CPS є підходи, засновані на даних, які збирають дані за допомогою експериментів, у яких використовуються різні параметри контролера ЧПУ.

Штучна нейронна мережа (ШНМ) [28] та ШНМ, інтегрована з генетичним алгоритмом, застосовувалися для розрахунку показників продуктивності, таких як мінімальна шорсткість поверхні і помилки відстеження та контуру.

У методах багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимальних параметрів були прийняті підходи зваженої суми. Було застосовано такі методології пошуку, як генетичний алгоритм [28] або оптимізація рою частинок [29].

Адаптивна система нейро-нечіткого виводу застосовувалася для прогнозування помилки контуру і помилки відстеження [32]; однак дані про вібрацію в ТСП не були включені в підхід, заснований на даних.

Щоб скоротити час збирання даних, було запропоновано різні експериментальні плани, такі як метод планування експерименту Тагучі (TED) і повний факторний план (FFD). Розробники заявили, що FFD може надати більш точну модель із меншою кількістю даних. Таким чином, процес збору даних є не тільки трудомістким, але й трудомістким.

Також в роботі [33] запропоновано введення інтерполятора.

Інтерполятор використовується для генерації профілю швидкості та команд положення шляхом інтерпретації програми обробки деталі для кожної осі.

Для лінійної інтерполяції (G01) на рисунку 2.8 показано S-подібні профілі швидкості та прискорення/гальмування для одного блоку, що складається з періодів постійної швидкості (A), постійного нахилу для періодів прискорення/гальмування (B) та постійного періоду розгону/сповільнення (C). .

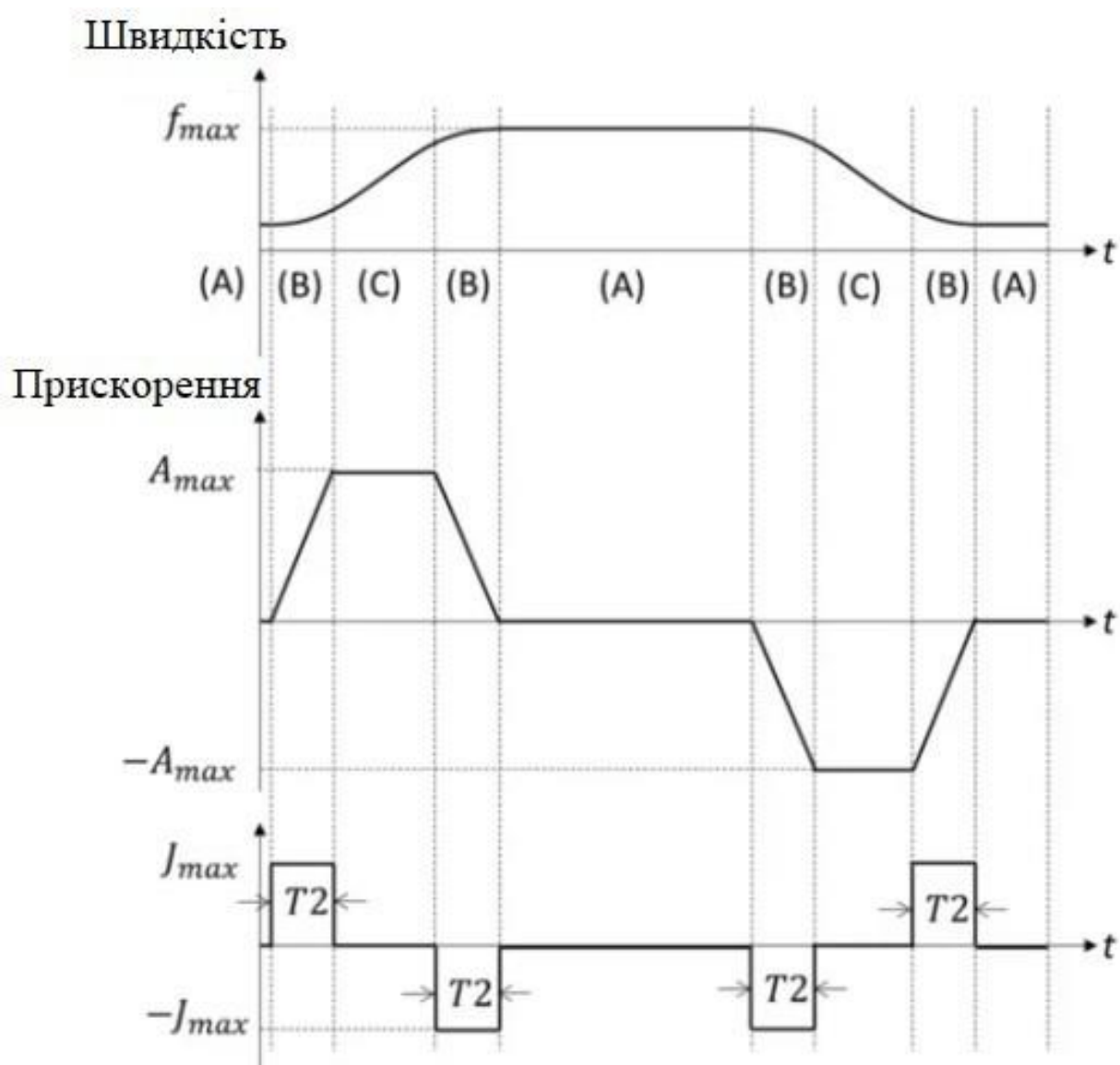


Рисунок 2.8 – S-подібне керування

Як правило, кожна вісь має допустиме значення прискорення, яке визначається залежно від потужності її серводвигуна. Порівняно з одним блоком, кілька блоків кодів числового керування (NC) вимагають ще одного параметра, який задається як кутова швидкість.

В роботі [33] також зазначається, що частота вібрації під час обробки може бути визначена за допомогою аналізу з використанням датчиків прискорення.

2.6 Висновки до другого розділу

У разі повторюваної обробки масового виробництва, наприклад, під час виготовлення тіл обертання, складно отримати дані ЧПУ, які могли б гарантувати якість за оптимального часу виробництва. Хоча програмне забезпечення для автоматизованого проектування (CAD) та автоматизованого виробництва (CAM) розвивається, коди ЧПУ генеруються на основі прогнозів. Однак підтримувати оптимізовані умови виробництва складно, оскільки вібрація та умови зносу інструменту різні залежно від характеристик обладнання та інструментів. Саме тому оптимально застосовувати методи оптимізації керуючих програм.

3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ОБРОБКИ ТІЛА ОБЕРТАННЯ НА ПРИКЛАДІ СТУПИЦІ ДИСКУ З ЗАСТОСУВАННЯ ЧПУ FANUC ТА ОПТИМІЗОВАНОЇ КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ

3.1 Склад комплексу

В якості технологічного обладнання для обробки ступиці диска використовується обладнання ЧПУ FANUC.

Спроектована автоматизована технологічна система призначена для автоматичного завантаження, обробки та вивантаження ступиці диска. До його складу входять (рисунок 3.1):

- верстат – 1;
- палета - 2;
- вібраційний завантажувальний пристрій-накопичувач – 3;
- тельферний робот – 4;
- стружкозбірник - 5;
- електрошафа - 6;
- контролер з пультом управління та світловою сигналізацією – 7;
- гідростанція – 8;
- лоток – 9;
- патрон пневматичний цанговий затискний – 10;
- робот-маніпулятор – 11;
- транспортер – 12.

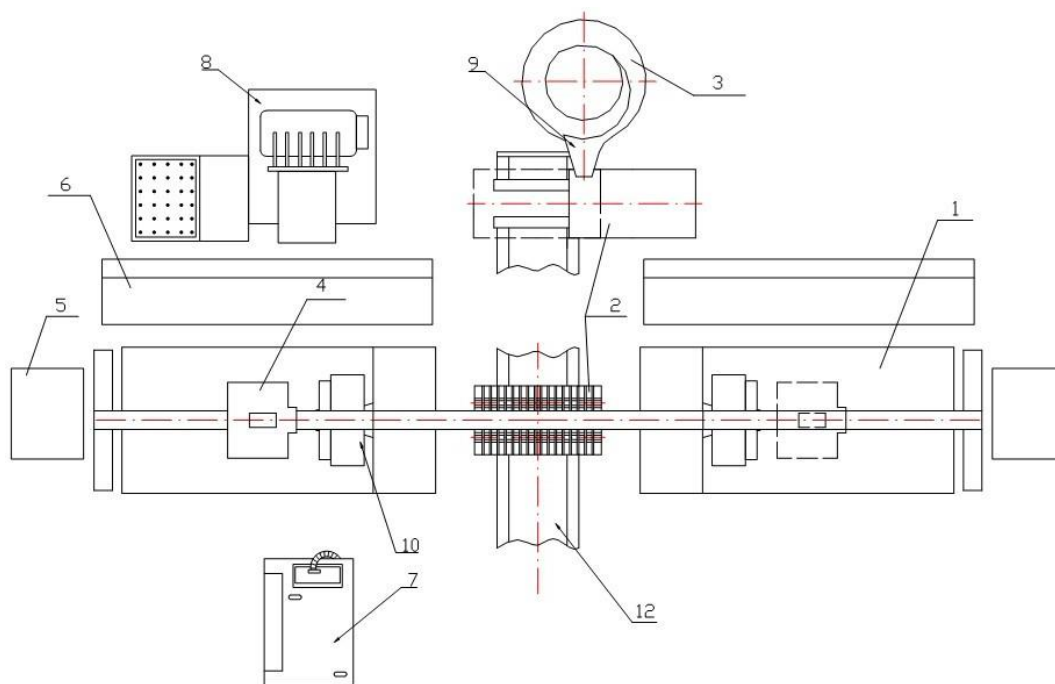


Рисунок 3.1 – Схема розташування обладнання проектного РТК обробки ступиці диска

Зупинимося призначення основних вузлів РТК.

Верстат, на якому застосовується ЧПУ FANUC.

Основні технічні характеристики верстата:

- сумарна потужність приводів, що використовуюються – 20,1 кВт.;
- вага – 4000 кг.;
- габаритні розміри верстата (без шафи УЧПУ) - 1520x2550x1700 мм.;
- найбільший діаметр виробу, що обробляється над станиною, не менше – 630 мм.;
- найбільша довжина виробу з закріпленням вільного кінця при установці 12-позиційної головки – 850 мм.;
- число позицій інструментальної головки - 12 гнізд;
- мінімальна поздовжня подача – 10 мм/хв.;
- мінімальна поперечна подача – 5 мм/хв.;
- максимальна поздовжня подача – 2000 мм/хв.;
- максимальна поперечна подача – 1000 мм/хв.;
- найбільше зусилля поздовжньої подачі – 10 000 Н;

- межі частот обертання шпинделя - 1 ... 3500 об / хв;
- максимальний крутний момент на шпинделі - 1200 Н/м.

Накопичувач являє собою торсіонний вібраційний завантажувальний пристрій з роздільними коливаннями, виконаний з бункером циліндричного типу, в ємність якого завантажується партія заготовок. Призначений для завантаження заготовок та поштучної видачі в орієнтованому положенні для захоплення рукою робота.

Основні характеристики:

- продуктивність – 1 подіт/хв;
- вага (приблизно) – 360 кг;
- місткість - 140 дет.;
- швидкість руху заготовок по лотку – 4,71 мм/с;
- габаритні розміри - 1400x1600 мм.;
- висота заповнення бункера деталями – 192 мм.;
- ефективне значення струму в електромагнітах (з випрямлячем) 2 А.

Основні характеристики робота:

- вантажопідйомність – 30÷50 кг;
- габаритні розміри – 570×850×610;
- число ступенів рухливості – 2;
- число рук - 2;
- число захватних пристроїв однією руки – 1;
- привід основних рухів – електричний, гідравлічний;
- система управління – позиційна;
- похибка позиціонування - 0,1 мм.;
- найбільший виліт руки – 450 мм;
- лінійні переміщення – 7000 мм;
- швидкість переміщення – 0,5 м/с;
- довжина монорейки – до 10 м;
- маса – 180 кг;
- напрацювання на відмову – 21000 год;

- час безперервної роботи – 90 год;
- середній термін служби – 5 років.

Захват робота призначений для утримання заготовок та готових деталей під час перенесення, встановлення та видалення.

Лотковий пристрій призначений для передачі деталі з бункерного вібраційного завантажувального пристрою в палету. Є звареною сферичною конструкцією зі сталі і кріпиться до вібробункера. Передбачений для орієнтації заготовок та жорсткого спрямування їх у ложементи палети.

Палета являє собою суцільнометалеву тару прямокутного типу, зручну для транспортування ступиць диска.

Використовується від 2-х до 8 палет залежно від обсягу випуску виробів. У вихідному положенні палета встановлюється до вібробункера, де заповнюється заготовками. Заповнення відбувається покроково, рух вперед здійснюється за допомогою гідроциліндра; ліворуч та праворуч – за допомогою крокового двигуна до повного заповнення. Далі другим гідроциліндром палета стикається на транспортер, після чого подається в робочу позицію до роботи.

Знизу до палети прикріплені 4 рейки (за кількістю рядів ложементів) для здійснення через передачу шестерні-рейки реверсивного руху вправо та вліво, і дві напрямні по довжині – для переміщення вперед та встановлення на транспортері. З метою зменшення ходу штока гідроциліндра для переміщення вперед розроблено спеціальний упор-собачка.

Гідростанція. Гідростанція призначена для подачі робочої рідини під необхідним тиском гідросистеми РТК.

Гідробак служить резервуаром та основою для розміщення насосної установки. Зварний корпус гідробака розділений перегородкою на два відсіки – всмоктування та зливу. Насосна установка виконана у вигляді автономного вузла, який входить насос і електродвигун. Електродвигун з'єднаний із насосом за допомогою пружної муфти. На кришці бака встановлена панель з контрольно-регулюючою та розподільчою апаратурою.

Гідростанція обладнана фільтром, який здійснює очищення масла, що подається в гідросистему, і фільтром-сапуном.

Для контролю рівня олії в гідробаку встановлено реле контролю рівня, а для контролю тиску встановлено манометр.

Електрошафа призначена для монтажу в ній електричної частини та системи управління РТК. Системою управління комплексом є програмований контролер.

Патрон призначений для жорсткого фіксування та утримання за допомогою сил стиснення заготовки при обробці. Набір змінних цанг дозволяє затискати деталі різних діаметрів, а пневматичний затискач забезпечує достатні зусилля утримання.

Передавальний транспортер, призначений для передачі палети з заготовками з однієї операції в іншу, є частиною гнучкої виробничої ділянки обробки ступиці диску.

РТК може працювати у двох режимах:

- налагоджувальний;
- автоматичний.

Режим налагодження необхідний для покрокового виконання дій всіх пристроїв, що входять до складу РТК, а також при їх регулюванні, налаштуванні та обкатуванні РТК.

Автоматичний режим роботи призначений для багаторазового відпрацювання заданої програми.

Робочий здійснює завантаження бункерного пристрою вручну, після чого включає верстат. Програмний пристрій видає сигнал на увімкнення вібробункера. По заповненню палети та за наявності сигналу відзначається готовність порожньої палети. Перша завантажена палета переміщається в позицію переміщення на транспортер, а потім у позицію робоча до роботи. У вихідній позиції руки робота знаходяться у верхньому положенні. Коли палета в позиції робоча, перша рука робота починає опускатися вниз, доки

з'явиться сигнал від контактного датчика вкрай нижнього положення, у якому рука зупиняється і відбувається захоплення деталі.

Потім рука робота разом з деталлю піднімається вгору і при появі сигналу від датчика крайнього верхнього положення зупиняється. Після цього робот переміщається вліво в положення над 1-м верстатом (робот вліво) для виконання першого переходу, зупиняється і опускає першу руку з заготівлею вниз до появи сигналу від датчика вихідної позиції завантаження.

Далі відбувається зупинка руки робота і водночас іде опитування датчика наявності деталі в цанг патрона. При появі даного сигналу робот опускає другу руку до патрона і схоплення руки затискає оброблену деталь, одночасно відбувається розтискання захоплення цанги. Оброблена деталь після першого переходу виявляється затиснутою у другій руці. У цьому перевіряється сигнал наявності деталі-2. Після звільнення цанги робот першою рукою встановлює заготівлю цангу. Якщо патрон попередньо порожній, відразу відбувається встановлення заготовки.

Робот переміщається із зони різання верстата в позицію робот у центрі, після цього закривається захисне огородження верстата, і після отримання сигналу з датчика про завершення закриття починається обробка деталі на 1-му переході (чорнова обробка).

У цей час робот встановлює оброблену деталь, затиснуту в другій руці, у палету і при отриманні відповідних сигналів, піднімаючи та опускаючи руку, перехоплюється за інший діаметр – відбувається перевстановлення деталі. Далі робот піднімає руку в верхнє положення і переміщається в позицію над другим верстатом (робот вправо), де відбувається аналогічно першому переходу вивантаження і установка деталі, після чого в першій руці виявляється затиснута готова деталь. Перевіряється сигнал про наявність деталі-1.

3.2 Розробка оптимізованої керуючої програми для обробки тіл обертання

Оптимізацією програми називають такі перетворення, які дозволяють зробити її більш ефективною, тобто зробити її більш економною по пам'яті або більш швидшою за виконанням тих функцій, що і до оптимізаційного перетворення.

На сьогодні на підприємствах приладобудування помічено збільшення продукції підвищеної складності. Ускладнюється і металообробне обладнання, верстати набувають все більшу універсальність, стійки ЧПУ оснащуються новими функціями, внаслідок чого технологія обробки на обладнанні ускладнюється. В сучасному виробництві значення помилки може призвести до важких наслідків для виробництва: псування заготовок, вихід з ладу вузлів і всього обладнання в цілому, несправність ріжучого інструменту, простоем обладнання на тривалий період. Для запобігання даних факторів, при програмуванні верстатів з ЧПУ необхідно використати програмні засоби, основна задача яких – симулювати процеси, що відбуваються з системою (обладнанням, інструментом, заготівлею). Разом з цим, важливу роль в ефективності підприємства продовжує грати фактор часу, котрий відображується не тільки в скороченні часу, який витрачається на розробку виробу, але і в постійному скороченні його часу життя. Необхідно мати на увазі, що, постійний зріст впливу інформаційних технологій в технічній підготовці виробництва, постійно зростаюче значення дооперації підприємств і тенденцій в області розвитку віртуальних підприємств. Даний фактор вносе свої зміни в існуючі методики розробки технології підприємства виробів. В цій ситуації єдиним можливим шляхом забезпечення високих темпів, гнучкості і якості виробництва є використання віртуальних виробничих комплексів. За допомогою цих програмних систем можна реалізувати процеси верифікації і оптимізації керуючої програми для різних

видів обладнання з ЧПУ, виробляти контроль стану обробляючого інструменту і заготовки, збільшити продуктивність верстатів.

Підприємства, які мають на меті знизити витрати та підняти ефективність свого виробництва, часто вкладають солідні кошти на придбання сучасних верстатів з числовим програмним управлінням. Але, як показує практика, неефективно розвивати в одному напрямку засоби виробництва (верстати), необхідність постійного розвитку програмного забезпечення, що використовується в технологічному бюро, є такою ж невід'ємною частиною досягнення необхідного ефекту. Існує велика кількість прикладів, коли невеликий час, витрачений на перевірку КП до її запуску на устаткуванні, дозволяв зберегти дороге обладнання, оснащення та інструмент. Одним з таких програмних інструментів, створених безпосередньо для цих цілей, є ПЗ контролю NC-програм (верифікатори КП).

Сучасні стратегії обробки зі складними траєкторіями руху інструменту дозволяють досягти високої продуктивності, але вони абсолютно не враховують той факт, як обладнання зі складною кінематикою відреагує на складну тривимірну траєкторію переміщення інструменту. Наприклад, кожен тип обладнання має свої власні обмеження за швидкістю та прискоренням переміщення робочих органів, а також різні швидкості виконання команд та мінімальний час реакції керуючої стійки верстата з ЧПУ.

Раніше процес тестування та оптимізації КП застосовувався тільки при великосерійному виробництві, при якому вартість і час, витрачені на доведення програм, що управляють, окупалися на випуску багатотисячної партії деталей. Але такий підхід не підходить для дослідного чи дрібносерійного виробництва, оскільки витрачає дуже велику кількість виробничих ресурсів. Через це часто ці підприємства жертвували продуктивністю верстатів і використовували особливі, перевірені на практиці параметри, що забезпечують стабільну якість і відносно прийнятну якість обробки.

Переважає більшість технологів, що беруть участь у створенні програм для верстатів з ЧПУ, відчують постійну нестачу часу і змушені розробляти КП у максимально стислий термін, не акцентуючи належної уваги на їхній ефективності для конкретного обладнання шляхом ручного вибору оптимальних параметрів. Таке доопрацювання ЧПУ-програм вимагає виготовлення серії тестових деталей.

При традиційному підході на нових верстатах зазвичай використовуються такі ж керуючі програми, які вже працюють на верстатах з ЧПУ. КП рідко листуються, виходячи з можливостей нового обладнання. Іноді причиною стає незнання технологами характеристик нового обладнання та відсутності належних навичок під час робіт з ними. Зазвичай, нове обладнання дає можливість зробити збільшення швидкості подачі, але це лише один із шляхів підвищення продуктивності.

Розглянемо 3 методи оптимізації, останній з яких і був використаний в рамках цієї роботи.

Метод оптимізації із застосування розрахунку напружено деформованого стану (НДС). Метод оптимізації, із застосуванням даних, отриманих при розрахунку напружено деформованого стану, є сукупністю інженерного аналізу, розробки керуючої програми з використанням САМ-систем та методу ручної оптимізації. Даний метод дозволяє провести більш поглиблену оптимізацію, здійснюючи коригування траєкторій руху ріжучого інструменту та режимів обробки з урахуванням розрахунку напружено деформованого стану деталі, у момент утворення зарізів та дроблення.

Принцип роботи даного методу розглянемо на наявній деталі. За вихідні дані в даному методі береться перша готова деталь, її 3D-модель, дані про ріжучий інструмент і програма, що управляє.

Найбільш помітним та більш критичним ушкодженням є "затягування" фрези в тіло деталі. Цей процес негативно впливає на всі елементи технологічної системи і має бути усунений насамперед.

Встановивши природу та момент виникнення дефекту (обробка на чистовому проході зі зніманням 0.05 мм.), проводиться коригування значень параметрів обробки (величина матеріалу, що знімається, режими обробки, зміна траєкторії обробки) та проводиться повторний розрахунок НДС.

Для отримання оптимальних значень напруги, що не перевищують межу плинності для даного матеріалу, необхідно зробити зміни величин подачі на зуб, оборотів шпинделя і величини шару, що знімається.

Для першого перерахунок приймемо значення $F=100$ мм/хв, $S=5500$ об/хв та $t=0,01$ мм. Використовуючи дані значення, отримуємо величину $P=21,5$ Н і $M=215$ Н·мм. Застосувавши ці дані до розрахунку напружено деформованого стану, отримуємо епюру напруг рисунку 3.2.

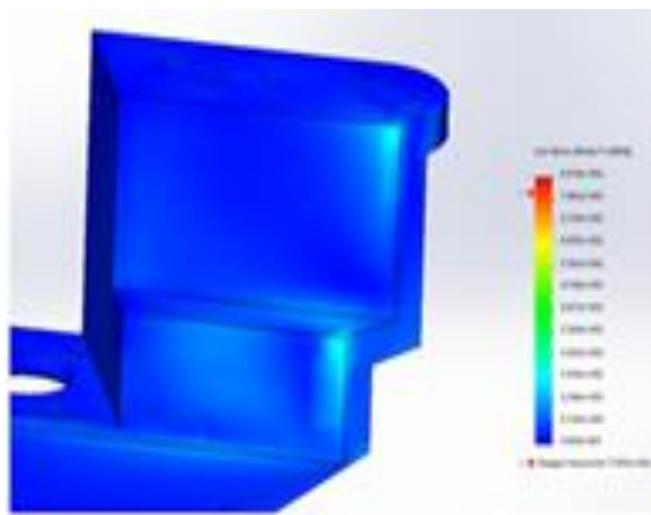


Рисунок 3.2 – Епюра напруг

Як очевидно з цієї епюри, значення прийнятих вихідних даних виявилися занадто малі. В результаті цього дослідження можна виділити як сильні, так і слабкі сторони. До позитивної сторони відноситься те, що при даних режимах і величині знімання матеріалу гарантовано виключена можливість пошкодження деталі і виникнення зарізу в цьому місці обробки. До недоліків можна віднести те, що зменшення значення подачі та величини матеріалу, що знімається, призводить до збільшення часу відпрацювання кадру керуючої програми, що при загальному використанні може значно збільшити час всієї програми в цілому.

Тому слід підібрати такі значення параметрів обробки, які забезпечуватимуть одночасно і якість деталі та відносно короткий час програми.

Провівши серію розрахунків НДС, були підібрані оптимальні значення величин режимів обробки та кількість матеріалу, що знімається. При значеннях $F=200$ мм/хв, $S=5000$ об/хв і $t=0.03$ мм, була отримана епюра, що максимально відповідає вимогам оптимізації.

Оптимізація з використанням програмного забезпечення. Оптимізація з використанням програмного забезпечення набуває все більшої популярності серед великих підприємств, що використовують дороге механообробне обладнання. Більшість виробників САМ-систем створюють програми для оптимізації траєкторій, рухів і режимів обробки. Дані програми можуть поставлятися як окремі продукти, так і як вбудовані модулі у саму САМ-систему. Найпоширенішими прикладами таких програм є: Vericut (CGTech), NX (Siemens), PTC CreoParaMetric (колишні Pro/ENGINEER) (PTC). Для розгляду питання оптимізації скористаємося даними за програмою Vericut та його модулем OptiPath.

Дане програмне забезпечення дозволяє проводити коригування керуючих програм за великим спектром показників. До таких особливостей відноситься поділ оптимізація чорнової та чистової обробки окремо один від одного.

Мета чорнової обробки – видалення якнайбільшої кількості матеріалу за менший час. OptiPath забезпечує підтримку максимально безпечних режимів роботи інструменту за різних умов різання. Наприклад, при площинній чорновій обробці деталі з алюмінієвого сплаву, видалення матеріалу можна здійснювати з постійною глибиною різання, а ширину різання при цьому від проходу до проходу варіювати в широкому діапазоні значень. OptiPath робить зміну швидкостей подачі, для підтримки постійного обсягу матеріалу, що знімається.

При чистовій обробці товщина стружки зазвичай залежить від геометрії, що залишилася після чорнової обробки. OptiPath уможливорює оптимізацію швидкості подачі таким чином, щоб забезпечити незмінне значення товщини стружки. Результатом цього є підвищення стійкості різального інструменту та покращення якості поверхні при обробці. Ці моменти особливо важливі при обробці фрезами сферичними або при контурній обробці з малим значенням ширини різання.

Перевагою програмної оптимізації є можливість роботи з КП для обробки складних поверхонь сплайну. Дані продукти дозволяють оптимізувати подачу ріжучого інструменту протягом траєкторії його руху. Докладніше цей процес зображено малюнку.

Також до особливостей цього виду оптимізації варто віднести те, що програма дозволяє коригувати керуючу програму, створену для високопродуктивної високошвидкісної обробки. Модуль OptiPath відстежує величину матеріалу, що знімається, і робить коригування режимів обробки, зберігаючи постійну товщину стружки. Це дає можливість не тільки забезпечити ефективніший процес механічної обробки, але й захистити обладнання та різальний інструмент від поломки.

Використання даного методу дозволяє досягти максимального ефекту для виробництва за рахунок наступних показників:

- покращення якості обробки – фіксоване зусилля різання сприяє меншому віджиму інструменту або повністю виключає це явище. Завдяки цьому забезпечується якість обробки в кутах, на ребрах та на ділянках сполучення, при чистовому переході;

- збільшується життєвий ресурс металорізального інструменту.



Рисунок 3.3 – Високошвидкісна обробка

Зважаючи на всі особливості даного методу оптимізації, хочеться відзначити, що на даний момент він є оптимальним і надає максимальну ефективність оптимізації. Але також, не можна не сказати про те, що подібний спосіб покращення керуючої програми є дорогим, ліцензії на програмне забезпечення обчислюються тисячами доларів, і не всі підприємства можуть дозволити собі їх використання, відкриваючи цим можливості для пошуку інших шляхів оптимізації.

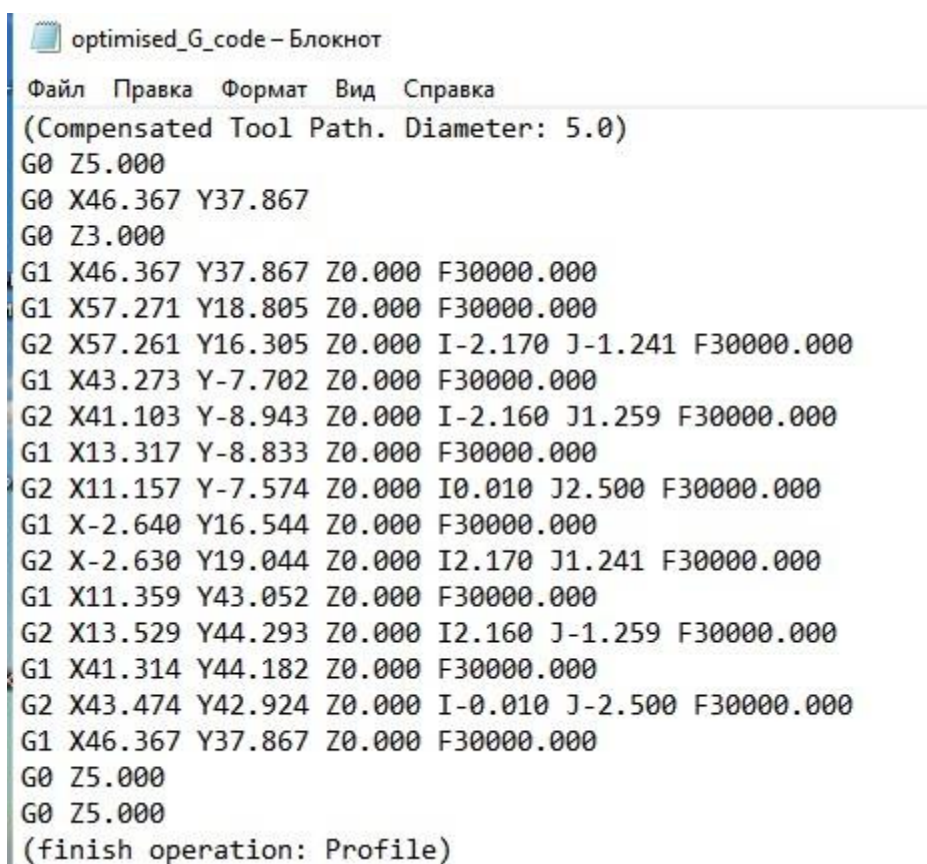
Для оптимізації керуючої програми для обробки деталі для розробленого комплексу в межах виконання магістерської роботи пропонується застосувати метод ручної оптимізації. У свою основу даний принцип закладає перехідну перевірку керуючої програми технологом-програмістом, на предмет виявлення зайвих траєкторій руху інструменту, некоректно заданий режим обробки для певних переходів, скорочення кількості холостих переміщень і т.п. Дана робота потребує досвіду в ручному написанні керуючих програм і, знання основних G і M кодів, кінематики верстата і певного рівня уважності від інженера.

При наявності керуючої програми і певної деталі проводиться аналіз обробки. За отриманими результатами і даними наданими налагодчиком/оператором станка з ЧПУ, визначаючи зони (фрагменти)

керуючої програми, які можна оптимізувати. Даний аналіз є необхідним елементом в процесі ручної оптимізації, так як повна перевірка (від початку до кінця) керуючої програми може зайняти тривалий час при використанні даного метода.

Можна виділити два способи ручної оптимізації. Обидва способи використовують спільні принципи і алгоритми, але відрізняються засобами, які використовуються для досягнення кінцевого результату.

Перший спосіб, він є найважчим і одним з перших з'явившихся в світовій практиці, має на увазі використання простого текстового редактора, для зміни кода керуючої програми. Одним з таких текстових редакторів є стандартний додаток інтегрований в операційну систему Windows – «Блокнот».



```
optimised_G_code – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
(Compensated Tool Path. Diameter: 5.0)
G0 Z5.000
G0 X46.367 Y37.867
G0 Z3.000
G1 X46.367 Y37.867 Z0.000 F30000.000
G1 X57.271 Y18.805 Z0.000 F30000.000
G2 X57.261 Y16.305 Z0.000 I-2.170 J-1.241 F30000.000
G1 X43.273 Y-7.702 Z0.000 F30000.000
G2 X41.103 Y-8.943 Z0.000 I-2.160 J1.259 F30000.000
G1 X13.317 Y-8.833 Z0.000 F30000.000
G2 X11.157 Y-7.574 Z0.000 I0.010 J2.500 F30000.000
G1 X-2.640 Y16.544 Z0.000 F30000.000
G2 X-2.630 Y19.044 Z0.000 I2.170 J1.241 F30000.000
G1 X11.359 Y43.052 Z0.000 F30000.000
G2 X13.529 Y44.293 Z0.000 I2.160 J-1.259 F30000.000
G1 X41.314 Y44.182 Z0.000 F30000.000
G2 X43.474 Y42.924 Z0.000 I-0.010 J-2.500 F30000.000
G1 X46.367 Y37.867 Z0.000 F30000.000
G0 Z5.000
G0 Z5.000
(finish operation: Profile)
```

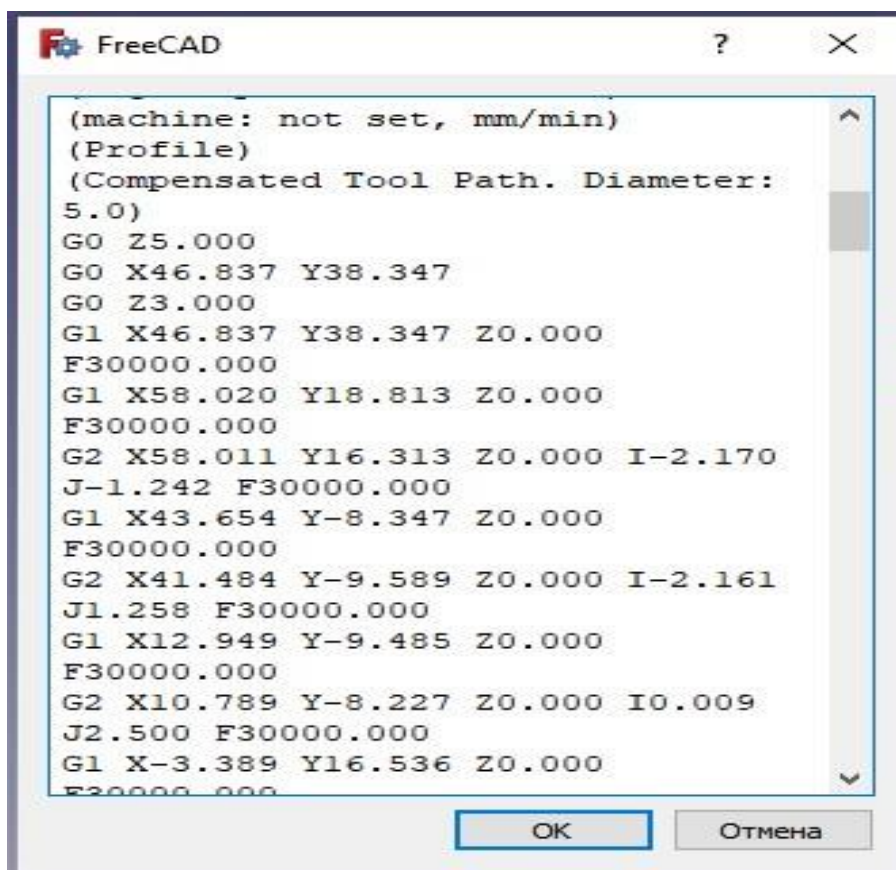
Рисунок 3.4 – Фрагмент керуючої програми в «Блокнот»

Очевидно, що при даному способі важко швидко та ефективно виробляти дії по оптимізації. Це зумовлено тим що на сьогоднішній день для верстатів з важкою кінематикою підбирається номенклатура деталей з складною формою і керуючі програми для таких деталей мають велику кількість переходів, що приводить до збільшення кількості кадрів керуючої програми.

Але недивлячись на те, що спосіб простого редагування не надає для програміста нічого окрім тексту керуючої програми. Даний метод и по сей день використовується на невеликих підприємствах, котрі не мають можливості отримати спеціальне програмне забезпечення в силу обмеженості бюджету. Потрібно відмітити, що при редагуванні через текстовий редактор технолог не має можливості побачити результати своїх дій до повторного запуску керуючої програми на верстаті.

Для вирішення даної проблеми є спосіб оптимізації з використанням програмного забезпечення, що має більш обширний функціонал порівняно з звичайним текстовим редактором.

В даній роботі був використаний редактор керуючих програм FreeCAD (рисунок 3.5). Функціонал даної програми дозволяє вести ручне коригування, з миттєвим відображенням змін траєкторії руху ріжучого інструменту. Також в даному редакторі існує кольорове розділення для різних елементів керуючої програми, що покращує сприйняття кода програми (наприклад, червоним та зеленим кольором відмічені траєкторії руху фрези).



```
(machine: not set, mm/min)
(Profile)
(Compensated Tool Path. Diameter:
5.0)
G0 Z5.000
G0 X46.837 Y38.347
G0 Z3.000
G1 X46.837 Y38.347 Z0.000
F30000.000
G1 X58.020 Y18.813 Z0.000
F30000.000
G2 X58.011 Y16.313 Z0.000 I-2.170
J-1.242 F30000.000
G1 X43.654 Y-8.347 Z0.000
F30000.000
G2 X41.484 Y-9.589 Z0.000 I-2.161
J1.258 F30000.000
G1 X12.949 Y-9.485 Z0.000
F30000.000
G2 X10.789 Y-8.227 Z0.000 I0.009
J2.500 F30000.000
G1 X-3.389 Y16.536 Z0.000
F30000.000
```

Рисунок 3.5 – Фрагмент керуючої програми в FreeCAD

Обидва вище описаних метода за своєю методикою не відрізняються один від одного і в силу зручності використання другого способу, дії по оптимізації будуть вироблятися з використанням розширеного ПЗ.

Використовуючи спеціальний режим «Part Design» (рисунок 3.6) редактора керуючої програми можна спроектувати будь-яку деталь траєкторії, по яким буде рухатись фреза верстата ЧПУ.

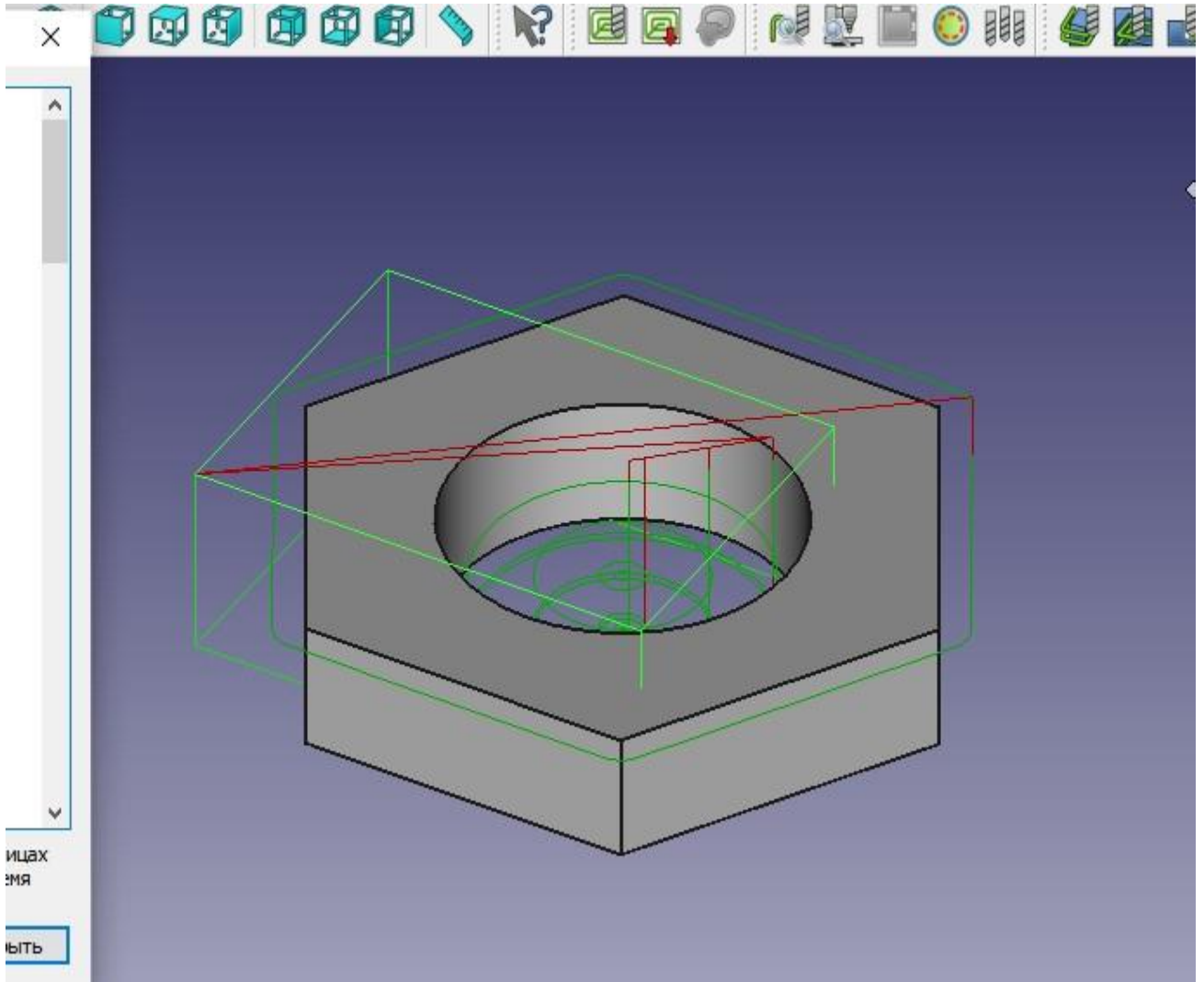


Рисунок 3.6 – Модель гайки в системі FreeCAD в режимі PartDesign

За допомогою режима «Patch» (рисунок 3.7) можна сгенерувати G-код керуючої програми, оптимізувати його та при необхідності запускати симуляцію обробки деталі, щоб бачити яким чином вона буде вирізатись на реальному верстаті. Шляхом ручного коригування значень координат та режимів обробки виробляються дії по оптимізації обраної ділянки керуючої програми або всієї програми в цілому.

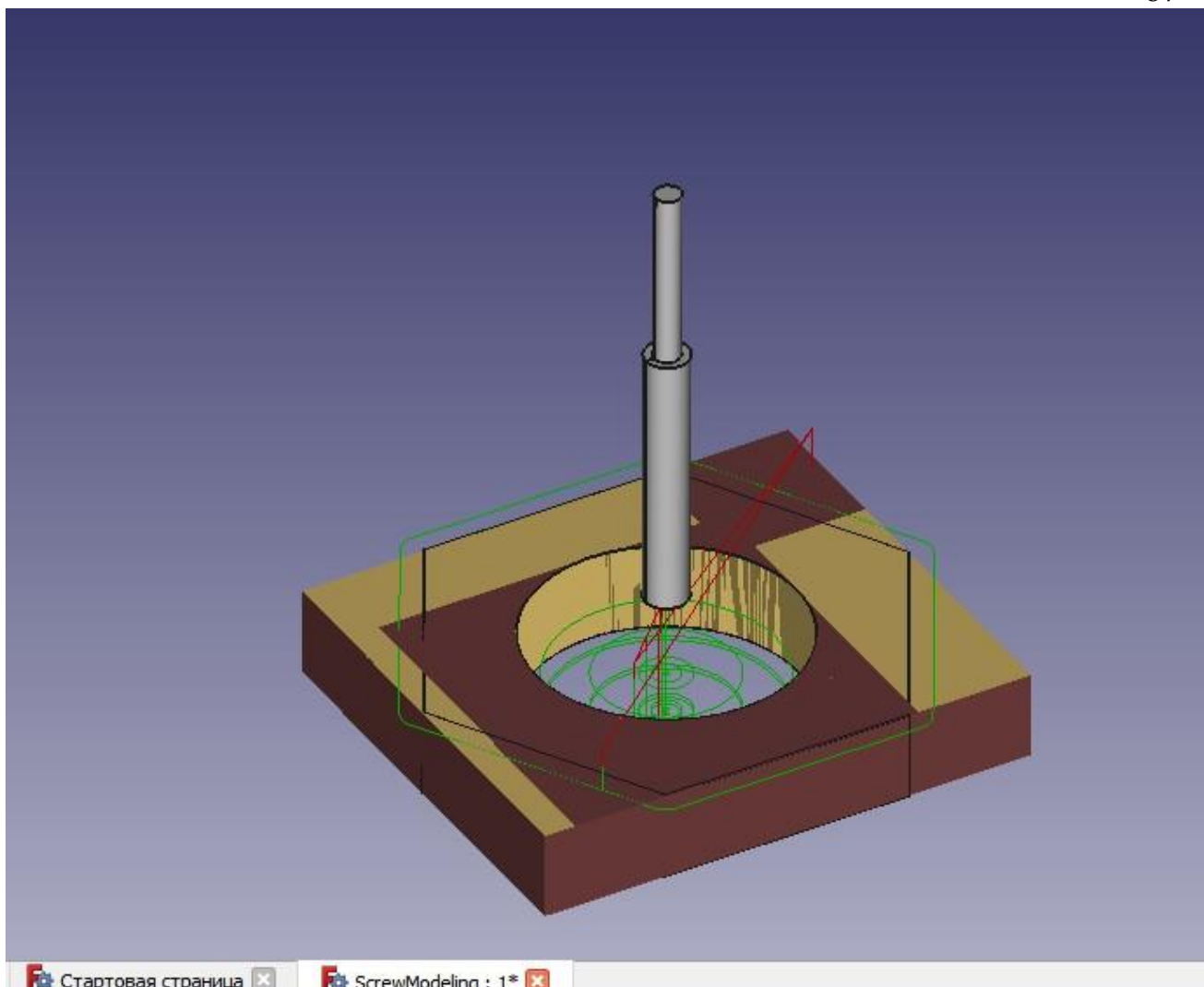


Рисунок 3.7 – Обробка гайки в системі FreeCAD в режимі Path

В процесі доведення керуючої програми були скориговані наступні параметри:

- координати переміщень інструменту по осям X , Y та Z ;
- значення режиму F (подача інструменту);

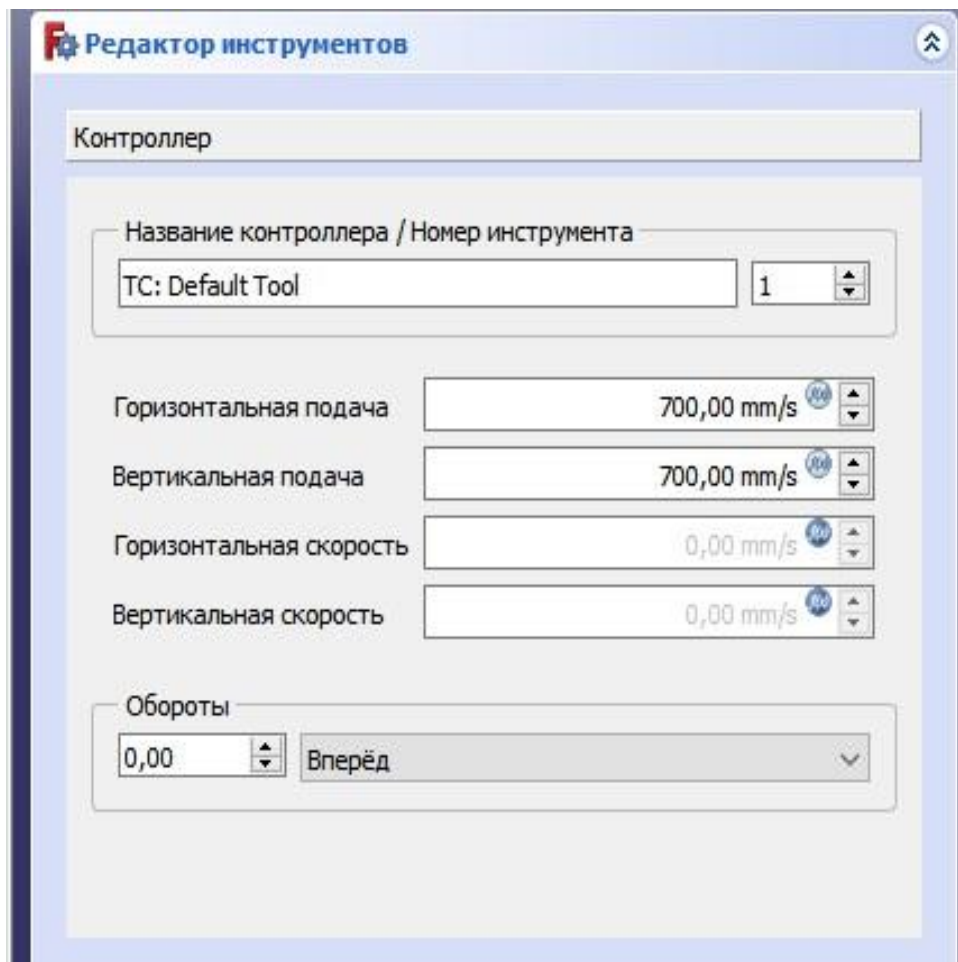


Рисунок 3.8 – Швидкість подачі на фрезу

– видалені зайві траєкторії руху фрези (G-команди) для циклів свердління гайки (рисунок 3.9).

Вартує виділити те, що не всі зміни переміщень по координатам вдалилися і викликали помилки при обробці верстатом. При коригуванні переміщень з круговою інтерполяцією G02 та G03, необхідно брати до уваги точність змінюючихся значень X, Y, I та J, щоб верстат коректно робив перерахунок значень координат і застосував значення корекції на радіус інструменту і не видав помилку «G41/G42 помилка корекції».

На реальному виробництві, коли в процесі задіяна невелика кількість обладнання з ЧПУ, деталі, що оброблюються відрізняються простотою, то

продуктивність праці досвідченого розробника може виявитися сумірної з продуктивністю праці розробника, що використовує САМ-систему. Так само, при невеликій номенклатурі деталей, що виробляються на підприємстві, застосування ручного програмування може виявитися виправданим, оскільки один раз розроблені програми без додаткового доопрацювання можуть використовуватися тривалий час.

```

Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
G3 F500.000000 I-1.995878 J-1.995878 K0.000000 X26.914001 Y20.468726 Z-10.000000
G3 F500.000000 I0.401698 J-2.793868 K0.000000 X27.717397 Y14.880990 Z-10.000000
G3 F500.000000 I-0.401698 J2.793868 K0.000000 X29.311577 Y19.670736 Z-10.000000
G0 Z5.000000
G0 X28.427130 Y18.786289 Z5.000000
G0 X28.427130 Y18.786289 Z3.000000
G1 F500.000000 X28.427130 Y18.786289 Z-10.000000
G3 F500.000000 I-1.111431 J-1.111431 K0.000000 X27.092008 Y19.230661 Z-10.000000
G3 F500.000000 I0.223691 J-1.555803 K0.000000 X27.539390 Y16.119055 Z-10.000000
G3 F500.000000 I-0.223691 J1.555803 K0.000000 X28.427130 Y18.786289 Z-10.000000
G0 Z5.000000
G0 X27.542683 Y17.901842 Z5.000000
G0 X27.542683 Y17.901842 Z3.000000
G1 F500.000000 X27.542683 Y17.901842 Z-10.000000
G3 F500.000000 I-0.226984 J-0.226984 K0.000000 X27.270015 Y17.992595 Z-10.000000
G3 F500.000000 I0.045684 J-0.317737 K0.000000 X27.361383 Y17.357121 Z-10.000000
G3 F500.000000 I-0.045684 J0.317737 K0.000000 X27.542683 Y17.901842 Z-10.000000
G0 F0.000000 Z5.000000
G0 Z5.000000

```

Стр 1. стлб 1 100%

Рисунок 3.9 – Зайві траєкторії руху фрези

3.3 Питання з охорони праці

За ступенем небезпеки ураження електричним струмом згідно приміщення, в якому відбувається розробка автоматизованого модуля контролю якості поверхонь на основі технологій машинного навчання, належить до класу приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. Умови, які створюють підвищену і особливу небезпеку (підвищена вологість, струмопровідний пил, струмопровідні підлоги, можливість одночасного дотику до заземлених металоконструкцій будівлі і металевих поверхонь електроприладів), відсутні.

З метою зниження небезпеки ураження людини електричним струмом проектом передбачається використання таких технічних засобів захисту:

- необхідно проводити контроль ізоляції відповідно до вимог. Контроль проводити між нульовим і фазним провідниками і між фазами. Опір ізоляції не менше 500 кОм на фазу. Контроль проводити не рідше 1 разу на рік при відключеному електроживленні;

- в приміщенні використовується система живлючих провідників, трифазна, чотирипровідна з глухо заземленою нейтраллю напругою до 1000 В, тому, використовується система заземлення TN-C-S типу. Всі корпуси ПК з'єднані з глухо заземленою нейтраллю джерела живлення за допомогою нульового захисного провідника.

Автомат захисту вибирається за струмом короткого замикання, час відключення 0,2 с. Додатково застосовується повторне заземлення нульового проводу з метою зниження потенціалу корпусів і напруги дотику у випадках обриву нульового проводу.

Роботи в лабораторії відносяться до робіт категорії 1а – легка фізична робота, яка виконується сидячи.

3.4 Висновки до третього розділу

В результаті написання третього розділу виконано побудову технологічного комплексу обробки тіла обертання з застосування ЧПУ FANUC та оптимізованої керуючої програми. На основі проведеного аналізу в якості засобу оптимізації керуючих програм прийнято рішення застосувати метод ручної оптимізації.

ВИСНОВКИ

В результаті написання кваліфікаційної роботи виконано дослідження методів оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ та використано власну керуючу програму.

Встановлено, що як основне обладнання для обробки з ЧПУ верстати з ЧПУ широко використовуються в різних галузях виробництва. У роботі розглянуто особливості написання керуючої програми за рахунок можливості ЧПУ, розглянуті основні цикли. Крім цього, розглянуто питання обробки інформації, яка стосується розміру деталі і зносу інструменту.

Також визначено, що неоптимізовані та неефективні програми ЧПУ можуть призвести до невиправдано тривалого часу циклу, надмірного зносу ріжучих інструментів і погіршення якості поверхні оброблюваних деталей. Для будь-якого процесу обробки з ЧПУ для управління ним необхідні програми ЧПУ, що складаються із серії закодованих інструкцій.

В роботі запропоновано автоматизований комплекс для виготовлення деталей, а також запропоновано застосування ЧПУ FANUC для обробки тіла. Також запропоновано різні методи оптимізації керуючих програм та встановлено.

В результаті написання магістерської роботи було виконано наступні задачі:

- розглянуто сфери застосування верстатів з ЧПУ та актуальність оптимізації керуючих програм;
- наведено методи автоматизації налаштувань верстатів з застосуванням засобів оснащення верстатів. Розглянуто питання управління ресурсом інструменту і оптимізації керуючої програми;
- виконано розробку технологічного комплексу обробки тіла обертання з застосуванням ЧПУ FANUC та розробка оптимізованої керуючої програми.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К.: Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.
3. Дульський В.І. Методи оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ. «Автоматизація та приладобудування» АДЕД-2023, Випуск 2. с. 264-268.
4. Plaza, M.; Zebala, W. A decision model for investment analysis in CNC centers and CAM technology. Comput. Ind. Eng. 2019. – pp. 565-577.
5. Системи ЧПУ FANUC [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://www.fanuc.eu/ua/uk/%D1%87%D0%BF%D0%BA>.
6. Федік Л. Ю. Виробничі процеси і обладнання об'єктів автоматизації: навч. посіб. / Л. Ю. Федік, Л. О. Гуменюк, П. О. Гуменюк. – Луцьк: Вежа-Друк, 2020. – 286 с.: іл.
7. Пальчевський Б.О. Інформаційні технології проектування технологічного устаткування [Текст]: Монографія / Б.О. Пальчевський. – Луцьк : Луцький НТУ. – 572 с.
8. Шалугін В.С. Процеси та апарати промислових технологій [Текст] : навчальний посібник / В. С. Шалугін, В. М. Шмандій. – Київ : Центр учбової літератури, 2018. – 392 с.

9. Черевко О.І., Кіптела Л.В., В.М. Михайлов. Автоматизація виробничих процесів. Харків, 2014. – 186 с.
10. Гончаренко Б.М., Осадчий С.І., Віхрова Л.Г., Каліч В.М., Дідик О.К. Автоматизація виробничих процесів. – Кіровоград: Видавець – Лисенко В.Ф., 2016. – 352 с.
11. G71 roughingcycle on a CNC Lathe[Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://gcodetutor.com/cnc-machine-training/g71-roughing-cycle.html>.
12. Tseng, H.-C.; Tsai, M.-S.; Cheng, C.-C.; Li, C.-J. Optimization of Computer Numerical Control Interpolation Parameters Using a Backpropagation Neural Network and Genetic Algorithm with Consideration of Corner Vibrations. *Appl. Sci*, 2021. – 25 p.
13. G72 facingcycle on a CNC Lathe[Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://gcodetutor.com/cnc-machine-training/g72-facing-cycle.html>.
14. Sencer, B.; Ishizaki, K.; Shamoto, E. High speed cornering strategy with confined contour error and vibration suppression for CNC machine tools. *CIRP Ann.* 2015. – pp. 369-372.
15. Mi, L.; Yin, G.F.; Sun, M.N.; Wang, X.H. Effects of preloads on joints on dynamic stiffness of a whole machine tool structure. *J. Mech. Sci. Technol.* – pp. 495-508.
16. İzol, P.; Brindza, J.; Vrabel, M.; Demko, M.; Basilio, S. Effect of Optimization Software on Part Shape Accuracy and Production Times during Rough Milling of Aluminum Alloy. *Machines*, 2022. – 20 p.
17. Zoghi pour, N.; Yaratan, A.F.; Kaynak, Y. Multi objective optimization of rough pocket milling strategies during machining of lead-free brass alloys using Desirability function and Genetic algorithms-based analysis. *Procedia CIRP* 2021. – pp. 145-150.
18. G73 patternrepeatingcycle on a CNC Lathe[Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://gcodetutor.com/cnc-machine-training/g73-pattern-repeating-cycle.html>.
19. Система з відкидним важелем [Електронний ресурс]: Режим

доступу: www.renishaw.com.

20. Датчик RP3[Электронный ресурс]: Режим доступа:<https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/RP3>.

21. Zhang, X.; Pan, T.; Ma, A.; Zhao, W. High efficiency orientated milling parameter optimization with tool wear monitoring in roughing operation. *Mech. Syst. Signal Process.* 2022. – 16 p.

22. Rattunde, L.; Laptev, I.; Klenske, E.D.; Möhring, H.-C. Safe optimization for feedrate scheduling of power-constrained milling processes by using Gaussian processes. *Procedia CIRP* 2021, 99. – pp.127-132.

23. Park, H.-S.; Qi, B.; Dang, D.-V.; Park, D.Y. Development of smart machining system for optimizing feedrates to minimize machining time. *J. Comp. Des. Eng.* 2018, 5. – pp. 299-304.

24. Tseng, H.-C.; Tsai, M.-S.; Cheng, C.-C.; Li, C.-J. Optimization of Computer Numerical Control Interpolation Parameters Using a Backpropagation Neural Network and Genetic Algorithm with Consideration of Corner Vibrations. *Appl. Sci.* 2021. – 21 p.

25. Zhang, J.Z.; Chen, J.C.; Kirby, E.D. Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. *J. Mater. Process. Technol.* 184. – pp. 233-239.

26. Chiu, H.W.; Lee, C.H. Prediction of machining accuracy and surface quality for CNC machine tools using data driven approach. *Adv. Eng. Softw.* 2017, 114. – pp. 246-257.

27. Urbikain, G.; Campa, F.J.; Zulaika, J.J.; De Lacalle, L.N.L.; Alonso, M.A.; Collado, V. Preventing chatter vibrations in heavy-duty turning operations in large horizontal lathes. *J. Sound Vib.* 2015. – pp. 340, 317-330.

28. Heo, E.; Yoo, N. Numerical Control Machine Optimization Technologies through Analysis of Machining History Data Using Digital Twin. *Appl. Sci.* 2021, 11. – 33 p.

29. Zhang, X.; Yu, T.; Wang, W. Chatter Stability of Micro end Milling by Considering Process, Nonlinearities and Process Damping. *Int. J. Adv. Manuf.*

Technol. 2016, 87. – pp. 2785-2796.

30. Gao, L.; Yang, Y.; Li, X. Research and Development of Optimization of NC Machining Parameters. *Aeronaut. Manuf. Technol.* 2010, 22. – pp. 48-51.

31. Tao, F.; Zhang, M. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm towards Smart Manufacturing. *IEEE Access* 2017, 5. – pp. 218-242.

32. Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. *IFAC-Pap.* 2018. – pp. 1016–1022.

33. Ižol, P.; Brindza, J.; Vrabel, M.; Demko, M.; Babilio, S. Effect of Optimization Software on Part Shape Accuracy and Production Times during Rough Milling of Aluminum Alloy. *Machines* 2022. – 28 p.

34. Федік Л. Ю. Виробничі процеси і обладнання об'єктів автоматизації: навч. посіб. / Л. Ю. Федік, Л. О. Гуменюк, П. О. Гуменюк. – Луцьк: Вежа-Друк, 2020. – 286 с.: іл.

35. Шалугін В.С. Процеси та апарати промислових технологій [Текст] : навчальний посібник / В. С. Шалугін, В. М. Шмандій. – Київ : Центр учбової літератури, 2008. – 392 с.

36. Hyper MILL VIRTUAL MachiningOptimizer[Електронний ресурс]: Режим доступу:<https://www.openmind-tech.com/en/cam/hypermill-virtual-machining/optimizer/>.