Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)
Кафедра _Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____перший (бакалаврський)_____
Розроблення системи управління точністю обробки на верстатах з ЧПК
(тема)

Виконав:
здобувач _____3____ року навчання,
групи _____АКТСІу-23-1_____
_____Олексій ЛУКІРІН_____
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність ___174 Автоматизація,_____
___комп'ютерно-інтегровані технології та___
_____робототехніка_____
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми __ __освітньо-професійна_____
Освітня програма Системна інженерія___
(повна назва освітньої програми)

Керівник ____ст. викл. Сергій ТЕСЛЮК____
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри _____ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Лукірін Олексій Сергійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"20" червня 2026 р.  Олексій ЛУКІРІН

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет АКІТС

Кафедра КІТАРБІ

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«20» травня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Лукіріну Олексію Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи управління точністю обробки на верстатах з ЧПК

затверджена наказом університету від 20.05.2026 р. № 410Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 25.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Похибка вимінювань не більше 2 мкм;

3.2 Координатна система трьохосьова;

3.3 Інтерфейс підключення TSI2- TSI3;

3.4 Кількість вихідних сигналів 11;

3.5 Виконання команд керуючої програми включення руки та її фіксацію в робочому положенні до 10 секунд;

3.6 Можливість заміни щупу без повного демонтажу конструкції;

3.7 Вага конструкції не більше 10 кг.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Аналіз технічного завдання та аналогічних систем керування за темою;

4.2 Аналіз контактно-вимірювальних систем для верстатів з ЧПК;

4.3 Вибір середовища моделювання та розробки програмного забезпечення;

4.4 Розробка структурної схеми керування;

4.5 Конструкторсько-технологічні розрахунки;

4.6 Перевірка стійкості системи управління;

4.7 Питання з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал у вигляді презентації PowerPoint (*.pptx) – 12 с.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (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	23.05.2026	Виконано
2	Аналіз аналогічних систем	26.05.2026	Виконано
3	Розробка структурної схеми	30.05.2026	Виконано
4	Розробка системи управління	02.06.2026	Виконано
5	Конструкторсько-технологічні розрахунки	04.06.2026	Виконано
6	Перевірка працездатності системи	09.06.2026	Виконано
7	Охорона праці	10.06.2026	Виконано
8	Подання роботи на нормоконтроль	12.06.2026	Виконано
9	Подання роботи для перевірки на академічну доброчесність	15.06.2026	Виконано
10	Подання роботи на рецензію	17.06.2026	Виконано
11	Подання роботи на підпис зав. кафедри	19.06.2026	Виконано
12	Подання кваліфікаційної роботи до ЕК	25.06.2026	

Дата видачі завдання 20.05.2026 р.

Здобувач _____ Олексій ЛУКІРІН
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ ст. викл. Сергій ТЕСЛЮК
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 63 с., 2 табл., 16 рис., 2 дод., 23 джерела.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ДАТЧИК, КОНТАКТНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ОБРОБКА, ТОЧНІСТЬ, ЧПК

У роботі розглянуто актуальну задачу впровадження сучасних систем керування точністю на верстатах з ЧПК, яка обумовлена необхідністю мінімізації браку, зменшення зносу інструменту та контролю якості у реальному режимі часу, що дозволить розширити технологічні можливості обладнання під час виробництва високоточних деталей.

Об’єкт розробки – процеси автоматизованого керування обладнанням на верстатах з ЧПК у роботизованому виробництві.

Предмет розробки – системи контролю точності обробки деталей.

Мета роботи – підвищення точності обробки деталей на верстатах з ЧПК, за рахунок впровадження додаткової контактно-вимірювальної системи Renishaw.

Практичне значення – отримані результати можуть бути використані в подальшому прогнозуванні точності розмірів та форми заготовок за умов чистової обробки на верстатах з ЧПК та виявлення в реальному часі помилок обробки.

Отриманий результат кваліфікаційної роботи, відноситься цілей сталого розвитку № 9, а саме 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньо-високотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво».

THE ABSTRACT

The explanatory note contains: 63 p., 2 tab., 16 fig., 2 app., 23 sources.

AUTOMATION, SENSOR, CONTACT MEASURING SYSTEM, MACHINING, ACCURACY, CNC

The paper considers the urgent task of implementing modern precision control systems on CNC machine tools, which is due to the need to minimize scrap, reduce tool wear and quality control in real time, which will allow expanding the technological capabilities of the equipment during the production of high-precision parts.

The object of development is the processes of automated control of equipment on CNC machine tools in robotic production.

The subject of development is the control system for the accuracy of part processing.

The purpose of the work is to increase the accuracy of part processing on CNC machine tools by introducing an additional Renishaw contact measuring system.

Practical significance - the results obtained can be used in further forecasting the accuracy of the dimensions and shape of workpieces under the conditions of finishing on CNC machine tools and detecting processing errors in real time.

The obtained result of the qualification work refers to sustainable development goals No. 9, namely 9.4 “Promote the accelerated development of high- and medium-high-tech sectors of the processing industry, which are formed on the basis of the use of the “education - science - production” chains.”

ЗМІСТ

Перелік скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз систем управління верстатів з чпк 12
1.1 Аналіз можливостей сучасних верстатів з ЧПК 12
1.2 Аналіз допоміжних пристроїв для верстатів з ЧПК 18
1.3 Аналіз контактно-вимірювальних систем 23
2 Вибір системи автоматизованого проєктування та програмного забезпечення 29
2.1 Системи автоматизованого проєктування 29
2.2 2 Вибір середовища моделювання 30
2.3 Моделювання деталі для перевірки роботи розробленої системи 34
2.4 Моделювання прив’язки інструмента з використанням системи Renishaw 35
2.5 Розробка структурної та блок схем керування 36
3 Розробка системи управління точністю обробки 40
3.1 Вимоги при розробці керуючої програми прив’язки інструмента 40
3.2 Розробка керуючої програми прив’язки інструмента 43
3.3 Проведення розрахунків похибок системи автоматичної прив’язки інструмента 48
3.4 Впровадження системи та перевірка працездатності 50
3.5 Перевірка стійкості системи управління за критерієм Гурвіца 55
3.6 Питання охорони праці 56
Висновки 59

Перелік джерел посилання 61

Додаток А Лістинг G-коду програми 64

Додаток Б Демонстраційний матеріал 75

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ОМР – охолоджувально-мастильні рідини;

САПР – система автоматизованого проектування;

ЧПК – числове програмне керування;

ATC (Automatic Tool Changer) – автоматична зміна інструмента;

CAD (Computer-Aided Design) – система автоматизованого проектування;

CAE (Computer-Aided Engineering) – система інженерного аналізу;

CAM (Computer-Aided Manufacturing) – система автоматизації виробництва;

RTOS (Real-Time Operating System) – операційна система реального часу.

ВСТУП

Верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) є невід'ємною частиною сучасного автоматизованого виробництва. Їх використання дозволяє значно підвищити точність обробки деталей, зменшити вплив людського фактору та забезпечити стабільність якості продукції. У контексті глобалізації промисловості та зростання конкуренції між виробниками, впровадження високотехнологічного обладнання, зокрема верстатів ЧПК, стає ключовим чинником ефективного функціонування підприємств.

Актуальність впровадження сучасних систем керування точністю на верстатах з ЧПК обумовлена необхідністю мінімізації браку, зменшення зносу інструменту та контролю якості у реальному режимі часу, що дозволить розширити технологічні можливості обладнання під час виробництва високоточних деталей.

Особливе місце серед основних виробників металообробного обладнання займає компанія Doosan Machine Tools, яка зарекомендувала себе як один із лідерів у сфері розробки та виробництва високоточних верстатів, що використовуються в Україні. Верстати даного виробника поєднують у собі високу надійність та продуктивність, мають широкі функціональні можливості. Вони активно застосовуються у різних галузях промисловості, зокрема в та приладобудуванні, авіаційній галузі, енергетиці та інші.

Мета верстата з ЧПК полягає у виконанні технологічних операцій відповідно до заздалегідь створеної програми, яка містить набір команд для керування рухами інструмента та заготовки. Основою функціонування таких систем є принцип дискретного управління, де всі операції виконуються відповідно до цифрових кодів. Це дозволяє забезпечити високу повторюваність процесів і значно скоротити час на виготовлення складних деталей.

Крім того, значну роль у сучасному виробництві відіграє автоматизація процесів. Верстати ЧПК можуть інтегруватися в автоматизовані виробничі лінії, включаючи роботизовані комплекси, системи подачі заготовок та контролю якості. Це сприяє підвищенню продуктивності, зниженню витрат та оптимізації виробничих процесів.

Одним із найбільш перспективних шляхів підвищення точності верстатів є оснащення їх особливими системами автоматичного контролю точності, тому розроблення сучасних систем управління точністю обробки на верстатах з ЧПК є актуальним напрямом розвитку сучасного приладобудування.

Об’єкт розробки – процеси автоматизованого керування обладнанням на верстатах з ЧПК у роботизованому виробництві.

Предмет розробки – системи контролю точності обробки деталей.

Мета роботи – підвищення точності обробки деталей на верстатах з ЧПК, за рахунок впровадження додаткової контактно-вимірювальної системи Renishaw.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

– провести аналіз технічного завдання та технічних вимог до розроблюваної системи;

– провести аналіз допоміжних пристроїв та контактно-вимірювальних систем для верстатів з ЧПК;

– розробити структурну схему системи керування;

– розробити систему керування;

– виконати збірку системи керування;

– провести конструкторсько-технологічні розрахунки;

– перевірка стійкості системи управління за критерієм Гурвіца;

– перевірити працездатність системи;

– розглянути питання пов’язані з охороною праці на підприємстві;

– оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з використанням навчально-методичних матеріалів [2-5] та згідно положень [6-11].

1 АНАЛІЗ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

1.1 Аналіз можливостей сучасних верстатів з ЧПК

Системи автоматичної прив’язки інструмента є важливою складовою сучасних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), оскільки забезпечують високу точність позиціонування інструмента відносно заготовки та координатної системи верстата. Їх використання дозволяє значно скоротити час налаштування обладнання, мінімізувати похибки, пов’язані з людським фактором, і підвищити загальну ефективність виробничого процесу.

Під автоматичною прив’язкою інструмента розуміють процес визначення фактичного положення ріжучого інструмента в робочому просторі верстата та встановлення відповідних корекцій у системі ЧПК. Основною метою цього процесу є узгодження координат інструмента з програмною системою координат деталі, що дозволяє забезпечити точне виконання технологічних операцій.

Існує декілька основних способів автоматичної прив’язки інструмента. Найбільш поширеним є використання контактних та безконтактних датчиків. Контактні системи базуються на фізичному дотику інструмента до спеціального вимірювального щупа або пластини. У момент контакту формується сигнал, який фіксується системою ЧПК, після чого визначається точне положення інструмента. Безконтактні системи, у свою чергу, застосовують лазерні або оптичні датчики, що дозволяють визначати геометричні параметри інструмента без прямого контакту, що особливо важливо для крихких або високоточних інструментів.

Ключовим елементом таких систем є вимірювальний щуп – спеціальний пристрій, який встановлюється в робочій зоні верстата або у шпинделі. Він дозволяє виконувати вимірювання довжини інструмента, його радіусу, а також виявляти знос або пошкодження ріжучої кромки. Отримані дані автоматично

передаються в систему ЧПК, де формуються відповідні корекції (offsets), що враховуються під час виконання програми.

Важливим поняттям у системах прив’язки є нульова точка (базова система координат). Це умовна точка, відносно якої визначається положення як заготовки, так і інструмента. Автоматична прив’язка дозволяє точно встановити зміщення інструмента відносно цієї точки, що є критично важливим для забезпечення точності обробки.

Ще одним важливим аспектом є поняття інструментальних корекцій. Вони включають параметри довжини інструмента, радіусної компенсації та інших геометричних характеристик. Система ЧПК використовує ці дані для автоматичного коригування траєкторії руху інструмента під час обробки, що дозволяє досягти високої точності виготовлення деталей навіть при зміні інструментів.

У сучасних верстатах, зокрема виробництва Doosan Machine Tools, (рис.1.1) системи автоматичної прив’язки інтегруються з програмним забезпеченням і можуть працювати в повністю автоматичному режимі.



Рисунок 1.1– Верстат з ЧПК Doosan [12]

Це дозволяє виконувати вимірювання інструментів без участі оператора, а також здійснювати періодичний контроль їх стану в процесі роботи.

Іншим аналогом верстату з ЧПК з можливістю прив’язки інструменту можна обрати автомат поздовжнього точіння Sowin моделі Sowin SZ-255E2 (рис. 1.2), який призначений для серійного та масового виготовлення складних деталей із пруткового матеріалу малого та середнього діаметра.



Рисунок 1.2– Верстат з Sowin SZ-255E2 [13]

Верстат належить до класу автоматів поздовжнього точіння (Sliding Headstock CNC Lathe), основні його характеристики наведені в таблиці 1.1. Його конструкція побудована таким чином, що прутковий матеріал проходить через напрямну втулку, а обробка виконується максимально близько до точки виходу заготовки. Завдяки цьому забезпечується висока жорсткість системи «інструмент-деталь», мінімізуються вібрації та прогин матеріалу, що особливо важливо під час виготовлення довгих і тонких деталей із високими вимогами до точності.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики верстату з Sowin SZ-255E2

Виробник	Fanuc
Країна виробник	Китай
Кількість шпинделів	2 шт.
Потужність допоміжного шпинделя	1.5/2.2 кВт
Діаметр отвору головного шпинделя	27 мм
Токарний інструмент	6x12
Поперечні приводні інструменти	4×ER16, 4000 об/хв
Інструмент для обробки торцевій поверхні (головний шпиндель)	4×ER16
Швидка швидкість подачі (м/хв)	30(Z1/Z2/X2/Y), 24(X1)
Потужність двигуна подачі (кВт)	0.75(Z1/Z2/X1/X2/Y)
Відстань від центру шпинделя до нижньої частини корпусу	1050 мм
Габаритні розміри (мм)	2180×1280×1775
Потужність основного шпинделя	2.2/3.7 кВт
Діаметр отвору допоміжного шпинделя	20 мм, 26 мм
Хід головного шпинделя	З направляючою втулкою 240 мм, Без направляючої втулки 355
Інструмент для обробки заднього торця (допоміжний шпиндель)	4×ER16, 4000 об/хв

Основу роботи верстата складає багатокоординатна система керування. Вісь Z відповідає за поздовжнє переміщення прутка, осі X та Y забезпечують точне позиціонування інструментів, а вісь C використовується для синхронізації та позиціонування шпинделя під час фрезерних операцій. Така конфігурація дозволяє виконувати комплексну токарно-фрезерну обробку за один технологічний цикл без повторного встановлення деталі.

Sowin SZ-255E2 підтримує виконання широкого спектра технологічних операцій: точіння, свердління, підрізання торців, розточування, нарізання різьби, фрезерування пазів та шліців, торцеву обробку, а також обробку зворотної сторони деталі за допомогою контршпинделя. Наявність декількох інструментальних позицій дозволяє одночасно використовувати кілька різальних

інструментів, що значно скорочує тривалість виробничого циклу та підвищує загальну продуктивність обладнання.

Верстат адаптований до роботи з автоматичними подавачами прутка, що забезпечує можливість безперервного автоматизованого виробництва у декілька змін. Для контролю технологічного процесу можуть використовуватись датчики контролю інструмента та системи перевірки відрізки деталі (Cut Off Sensor). Такі датчики дозволяють автоматично контролювати завершення операції відрізання, наявність заготовки та цілісність різального інструмента. У разі виникнення несправності система ЧПК формує аварійний сигнал і зупиняє роботу обладнання, що підвищує надійність та безпечність виробництва.

Таким чином, системи автоматичної прив’язки інструмента є невід’ємною частиною сучасного високоточного виробництва. Вони забезпечують підвищення точності, надійності та продуктивності обробки, а також сприяють автоматизації технологічних процесів і зниженню витрат часу на підготовчо-заключні операції.

Фрезерні верстати з числовим програмним керуванням є складними технічними системами, що поєднують механічні, електронні та програмні компоненти для забезпечення високоточної обробки деталей.

Основою конструкції фрезерного верстата з ЧПК є станина, яка виконує роль несучого елемента і забезпечує жорсткість усієї системи. Вона виготовляється з високоміцного чавуну або композитних матеріалів, що дозволяє зменшити вібрації під час обробки. На станині розташовуються напрямні, по яких переміщуються основні вузли верстата – стіл, каретка та шпиндельна бабка.

Координатна система фрезерного верстата зазвичай включає три основні осі – X, Y та Z. Вісь X відповідає за поздовжнє переміщення столу, вісь Y – за поперечне переміщення, а вісь Z – за вертикальний рух шпинделя. Така конфігурація забезпечує можливість обробки деталей у трьох площинах, що є основою для реалізації складних траєкторій руху інструмента.

Одним із ключових вузлів є шпиндель, який забезпечує обертання різального інструмента з високою швидкістю. Шпинделі сучасних фрезерних верстатів оснащуються прецизійними підшипниками та системами охолодження, що дозволяє працювати на високих обертах без втрати точності. Привід шпинделя здійснюється за допомогою електродвигуна, керованого системою ЧПК.

Для переміщення вузлів верстата використовуються серводвигуни, які забезпечують високу точність позиціонування та плавність руху. Управління цими двигунами здійснюється системою числового програмного керування, найчастіше від Fanuc або Siemens. Дані системи дозволяють реалізувати складні алгоритми керування, включаючи інтерполяцію рухів по декількох осях одночасно.

Важливим елементом фрезерного верстата є система автоматичної зміни інструмента (ATC – Automatic Tool Changer), що використовуються на верстаті з ЧПК Doosan Lynx 2100A (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Верстат з ЧПК Doosan Lynx 2100A [14]

Вона включає інструментальний магазин і механізм зміни інструмента, що дозволяє виконувати різні операції без зупинки верстата. Це значно підвищує продуктивність і зменшує час допоміжних операцій.

1.2 Аналіз допоміжних пристроїв для верстатів з ЧПК

До допоміжних пристроїв належать системи подачі охолоджувально-мастильної рідини (ЗМР), які забезпечують зниження температури в зоні різання та збільшують ресурс інструмента. Також застосовуються системи видалення стружки, що автоматично очищають робочу зону і запобігають накопиченню відходів обробки.

У контактних датчиках, що застосовуються на верстатах з ЧПК, всередині конструкції розташований механічний щуп із мікроперемикачем або тензочутливим елементом. Під час дотику до поверхні деталі вимірювальний наконечник зміщується на незначну величину, у результаті чого формується електричний сигнал спрацювання. Цей сигнал миттєво передається до системи числового програмного керування, яка фіксує момент контакту та визначає координати положення інструмента або деталі.

В індуктивних датчиках принцип роботи базується на використанні котушки та генератора високочастотного електромагнітного поля. Під час наближення металевої поверхні параметри електромагнітного поля змінюються, а електронна схема датчика реєструє ці зміни та формує відповідний сигнал для системи ЧПК. Такий спосіб контролю дозволяє виконувати безконтактне визначення положення деталі або елементів механізму з високою точністю та швидкістю.

Інформація, отримана від датчиків, передається до системи керування у вигляді сигналів про наявність або відсутність деталі, координат спрацювання, повідомлень про завершення операції відрізки, а також сигналів помилки чи аварійної ситуації. Крім того, система може визначати можливу поломку

інструмента або залишення невідрізаної перемички після завершення технологічної операції.

На основі отриманих даних система ЧПК аналізує стан процесу обробки та автоматично приймає відповідні рішення. Залежно від результатів контролю верстат може продовжити виконання циклу, скоригувати положення інструмента або повністю зупинити роботу обладнання у разі виникнення помилки чи небезпечної ситуації. Завдяки цьому датчики виконують функцію автоматичного контролю якості обробки та забезпечують постійний зворотний зв’язок між зоною різання і комп’ютерною системою керування верстата (рис. 1.4).

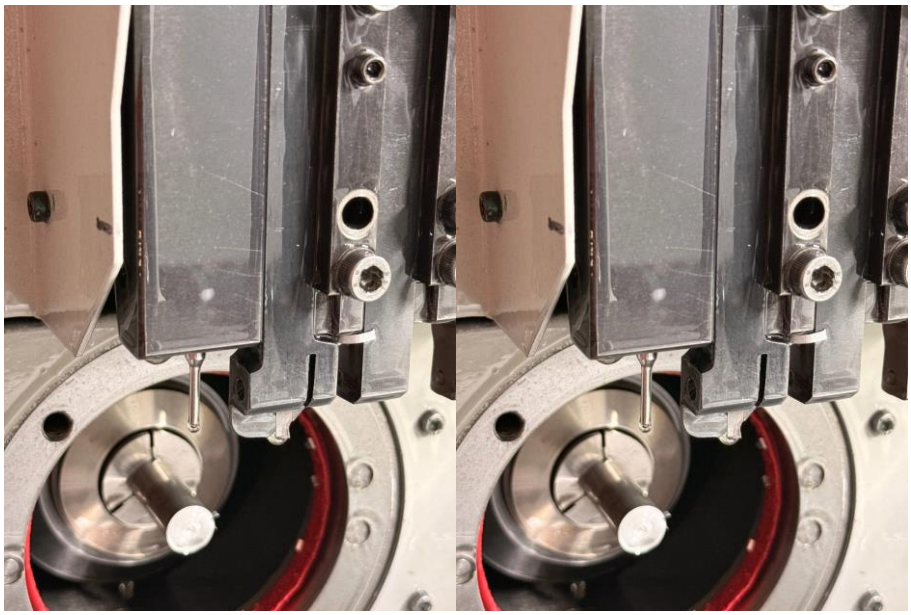


Рисунок 1.4 – Вигляд датчика контролю відрізки

Датчик контролю відрізки (Cut Off Sensor), який встановлюється на токарних автоматах поздовжнього точіння Sowin SZ-255E2, призначений для автоматичного контролю правильності виконання операції відрізання готової деталі. Використання такого датчика дозволяє підвищити точність обробки, зменшити кількість браку та забезпечити безпечну роботу обладнання.

Принцип роботи датчика полягає у перевірці факту повного відділення деталі після завершення операції відрізки. Після закінчення процесу різання система числового програмного керування виконує автоматичний цикл контролю. У цей момент супорт із встановленим датчиком переміщується в контрольну позицію поблизу зони відрізання.

У токарному автоматі осі координат організовані таким чином, що вісь Z відповідає за поздовжнє переміщення вздовж прутка, а вісь X – за радіальне переміщення інструмента до центра деталі. Саме тому під час контролю датчик спочатку підводиться до необхідної позиції по осі Z, після чого здійснюється подача по осі X у напрямку деталі. Таке переміщення візуально нагадує опускання датчика до поверхні заготовки.

Під час контакту датчика з деталлю система ЧПК фіксує координату спрацювання. Якщо після операції відрізки деталь повністю відділена, датчик не виявляє перешкоди у контрольній зоні, і верстат переходить до наступного технологічного циклу. Якщо ж між деталлю та прутком залишилась перемичка або сталася поломка відрізного інструмента, датчик фіксує наявність матеріалу в зоні контролю. У такому випадку система керування формує сигнал помилки та зупиняє обладнання для запобігання пошкодженню механізмів і появі браку.

Конструктивно Cut Off Sensor може бути виконаний у вигляді контактного щупа, індуктивного або оптичного датчика. Найчастіше в автоматах даного типу використовується контактний принцип контролю, оскільки він забезпечує високу точність та надійність у складних умовах металообробки.

Застосування датчика контролю відрізки у верстатах з ЧПК дозволяє автоматизувати контроль якості деталей без участі оператора, знизити ризик аварійних ситуацій та підвищити ефективність виробничого процесу.

У датчику контролю відрізки (Cut Off Sensor), який використовується на Sowin SZ-255E2, найчастіше встановлюється контактний або індуктивний сенсор,

що визначає наявність чи відсутність металу в контрольній зоні після операції відрізки.

Принцип роботи полягає в тому, що після завершення відрізання система ЧПК переміщує датчик у контрольну точку. Усередині датчика знаходиться чутливий елемент, який реагує на контакт із деталлю або на зміну електромагнітного поля при наближенні металу.

У випадку контактного датчика всередині розташований механічний щуп із мікроперемикачем або тензочутливим елементом. Під час дотику до поверхні деталі щуп зміщується на невелику величину, після чого формується електричний сигнал спрацювання.

В індуктивному датчику використовується котушка та генератор високочастотного електромагнітного поля. При наближенні металевої поверхні параметри поля змінюються, що фіксується електронною схемою датчика.

Системи автоматичної прив’язки інструмента та контролю зносу дозволяють підтримувати стабільні параметри обробки протягом усього виробничого циклу за рахунок інформації отриманих з датчиків.

Отримана від датчиків інформація передається до системи числового програмного керування у вигляді сигналів про наявність або відсутність деталі, координат спрацювання датчика, повідомлень про помилку або аварійну ситуацію, інформації про завершення операції відрізки, а також сигналів про можливу поломку інструмента чи залишення перемички після відрізання.

Система керування аналізує отримані дані та залежно від результатів контролю приймає рішення про подальше виконання технологічного циклу. У разі нормальної роботи обробка продовжується автоматично, при необхідності система може виконати коригування положення інструмента, а при виявленні помилки або аварійної ситуації верстат автоматично зупиняється. Таким чином, датчики виконують функцію автоматичного контролю якості обробки та забезпечують постійний зворотний зв’язок між зоною різання і системою ЧПК.

Системи контролю із використанням датчиків може застосовуватись не лише для перевірки завершення операції відрізання деталі, але й для контролю правильності виконання попередніх технологічних операцій, зокрема свердління та фрезерування отворів. Такий підхід дозволяє автоматично контролювати якість виготовлення деталей без участі оператора та своєчасно виявляти несправності різального інструмента.

Після завершення основних операцій система ЧПК автоматично запускає контрольний цикл перевірки. У цей момент вимірювальний щуп або датчик переміщується в зону обробленого отвору по координатах X та Z за допомогою сервоприводів верстата відповідно до координат, заданих у програмі. Під час перевірки датчик опускається до контрольної точки та виконує дотик до поверхні або внутрішньої частини отвору. Система ЧПК фіксує координати моменту спрацювання та порівнює отримані значення із запрограмованими параметрами. У результаті виконується контроль наявності отвору, правильності його розташування, глибини свердління, геометричних параметрів і факту завершення обробки.

Якщо свердлильний або фрезерний інструмент виконав операцію правильно, координати спрацювання датчика відповідають допустимим значенням. У такому випадку система визначає деталь як придатну та переходить до наступного етапу – операції відрізання готової деталі від прутка. Після успішного завершення відрізки цикл обробки автоматично повторюється для наступної заготовки, що забезпечує безперервність серійного виробництва.

У разі виникнення несправності, наприклад поломки свердла, невиконання операції свердління або фрезерування, неправильного розташування отвору чи отримання недостатньої глибини обробки, датчик не отримує очікуваного сигналу у заданій точці або фіксує неправильні координати.

Система ЧПК розпізнає відхилення від допустимих параметрів, формує аварійний сигнал та автоматично зупиняє виконання програми. Одночасно

блокується операція відрізання та виводиться повідомлення оператору про виявлену помилку.

Такий принцип автоматичного контролю дозволяє уникнути виготовлення бракованих деталей, зменшити ризик пошкодження обладнання та забезпечити стабільність технологічного процесу. Системи контролю інструмента і готової деталі є важливою складовою сучасних верстатів з ЧПК, особливо у високоточному виробництві дрібногабаритних деталей, де навіть незначні відхилення можуть призвести до браку або виходу обладнання з ладу.

1.3 Аналіз контактно-вимірювальних систем

Сучасні контактні виміри є загальновизнаним методом, застосування якого забезпечує досягнення максимальних показників ефективності роботи, якості, точності та інших характеристик верстатів. Стандартні програми, вбудовані в сучасні системи ЧПК, спрощують інтеграцію вимірювальних циклів в операції з обробки та засоби, що працюють в автономному режимі. Такі стандартні програми у поєднанні з інтерфейсом CAD-систем роблять дуже зручним процес моделювання вимірювальних функцій.

Використання різних типів датчиків забезпечують значну економію витрат та дають підвищення якості при вирішенні будь-яких завдань на верстатах.

Вимірювальні системи дають переваги при роботі на верстатах будь-яких розмірів та конфігурацій, включаючи наступне:

– обробні центри з ЧПК, вертикальні, горизонтальні та портальні;

– токарні верстати з ЧПК та токарно-фрезерні центри з ЧПК;

– шліфувальні верстати з ЧПК;

– верстати для свердління та фрезерування друкованих плат і навіть ручні верстати.

Незалежно від типу обладнання, сфери застосування або існуючої проблеми завжди необхідно впроваджувати сучасні вимірювальні системи, що дозволить перетворити технологічний процес та підвищити прибутковість.

Одним із ключових пристроїв є інструментальний датчик, який у виробничому середовищі часто називають «лапою». Даний пристрій призначений для визначення фактичного положення ріжучого інструмента шляхом фіксації моменту контакту інструмента з вимірювальною поверхнею. Під час дотику формується електричний сигнал, який обробляється системою ЧПК, що дозволяє з високою точністю (до мікронного рівня) визначити координати інструмента.

Прив’язка інструмента є критично важливою процедурою, яка полягає у визначенні положення робочої точки інструмента відносно системи координат верстата. Без виконання цієї операції неможливо забезпечити точну відповідність між керуючою програмою та реальним положенням інструмента, що призводить до похибок обробки та можливого браку продукції.

Процес прив’язки інструмента може здійснюватися у різних режимах. Найпростішим є ручний режим, при якому оператор самостійно підводить інструмент до датчика до моменту контакту та фіксує координати. Однак цей метод значною мірою залежить від кваліфікації оператора та може супроводжуватися похибками.

Більш ефективним є напівавтоматичний режим, при якому використовується спеціальний цикл або макропрограма системи ЧПК (наприклад, на базі контролерів Fanuc). У цьому випадку інструмент автоматично підводиться до датчика, а система самостійно визначає та записує необхідні значення у таблицю корекцій.

Найбільш сучасним і точним підходом є повністю автоматична прив’язка із застосуванням спеціалізованих вимірювальних циклів, таких як програмні пакети типу Inspection Plus від Renishaw. У цьому випадку процес відбувається без участі оператора: верстат викликає інструмент, підводить його до датчика, виконує один

або кілька контрольних дотиків, після чого обчислює значення координат і автоматично записує їх у систему корекцій. Часто застосовується подвійне вимірювання (грубе та точне), що дозволяє підвищити достовірність результатів.

Типовий алгоритм прив’язки включає виклик інструмента, переміщення у безпечну позицію, підхід до датчика з малою швидкістю, фіксацію координати при спрацюванні датчика, запис отриманого значення у таблицю інструментів (offset) та відхід інструмента у вихідне положення. У результаті кожен інструмент отримує індивідуальні корекційні параметри, які враховуються під час виконання керуючої програми.

Особливості прив’язки залежать від типу верстата. На токарних верстатах визначаються координати по осях X і Z з урахуванням геометрії різальної пластини. На фрезерних верстатах основним параметром є довжина інструмента по осі Z, а в окремих випадках також вимірюється діаметр інструмента.

Важливим аспектом експлуатації є дотримання технічних вимог. Вимірювальний датчик повинен бути чистим, оскільки наявність стружки або забруднень може призвести до похибок. Швидкість підведення інструмента повинна бути мінімальною для забезпечення коректного спрацювання датчика. Крім того, необхідно регулярно виконувати калібрування системи для підтримання її точності.

Окрему роль відіграють вимірювальні системи, зокрема датчики для автоматичної прив’язки інструмента та вимірювання деталей, розроблені компанією Renishaw. Вони дозволяють виконувати налаштування та контроль безпосередньо в робочій зоні верстата, що підвищує точність і знижує вплив людського фактору.

Високоточний моторизований маніпулятор Renishaw HPMA (рис. 1.6) – це маніпулятор для налаштування інструменту, розроблений для токарних верстатів з ЧПК. Він забезпечує швидке та точне налаштування інструменту та виявлення поломок, що може значно підвищити продуктивність та скоротити час простою.

HPMA має компактну, герметичну конструкцію з різноманітними розмірами, що підходять для більшості верстатів[15].

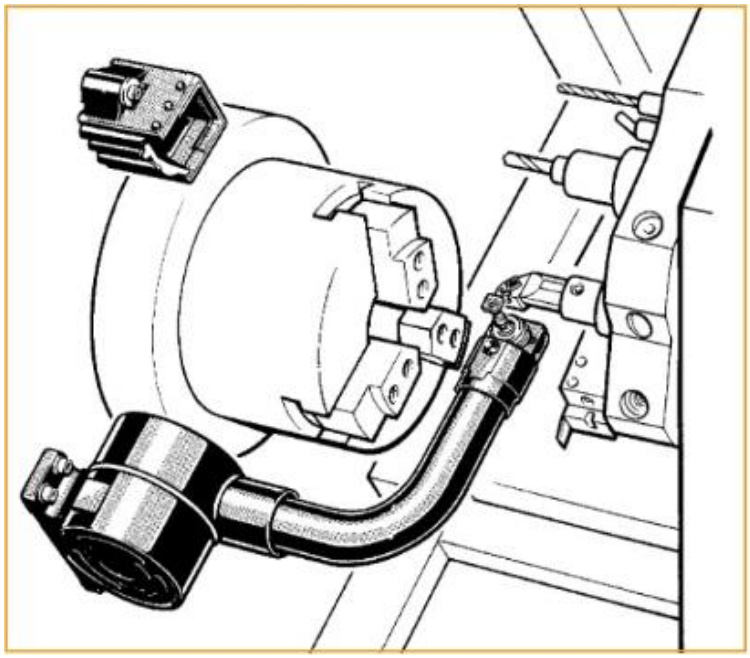


Рисунок 1.5 – Моторизована рука Renishaw

Для контролю розмірів отворів і глибини свердління часто використовуються вимірювальні щупи фірми Renishaw або аналогічні контактні датчики. Вони дозволяють автоматично перевіряти деталь безпосередньо в робочій зоні верстата без зняття заготовки.

Принцип роботи ґрунтується на контактному вимірюванні. Після виконання операції свердління або фрезерування верстат запускає цикл вимірювання. Щуп встановлюється у шпиндель як звичайний інструмент і підключається до системи ЧПК через радіоканал, інфрачервоний зв’язок або дротовий інтерфейс.

Під час вимірювання отвору щуп переміщується до координати отвору. Далі вимірювальний наконечник плавно опускається по вертикальній осі Z всередину отвору. При дотику до стінки отвору датчик спрацьовує і передає сигнал у систему ЧПК. Верстат фіксує координати дотику та обчислює діаметр, положення центру або відхилення отвору.

Для контролю глибини свердління щуп також опускається по осі Z до контакту з дном отвору. Після спрацювання система визначає фактичну глибину за поточною координатою. Отримане значення порівнюється із заданим у програмі.

Переміщення щупа здійснюється сервоприводами верстата через систему координат: по осі X – горизонтальне переміщення вліво/вправо; по осі Y – переміщення вперед/назад; по осі Z – вертикальне опускання та підйом.

Для підключення до системи верстату з ЧПК потрібно забезпечити підключення один із трьох типів інтерфейсів:

– блок інтерфейсу TSI2 (рис.1.6);

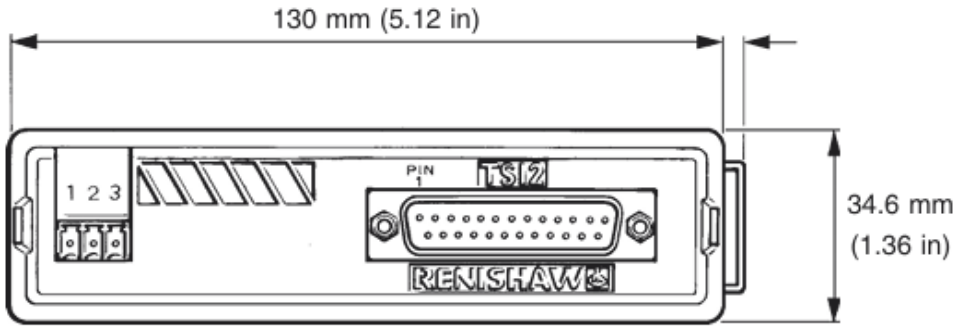


Рисунок 1.6 – Блок інтерфейсу TSI2

– блок інтерфейсу TSI3 (рис.1.7);

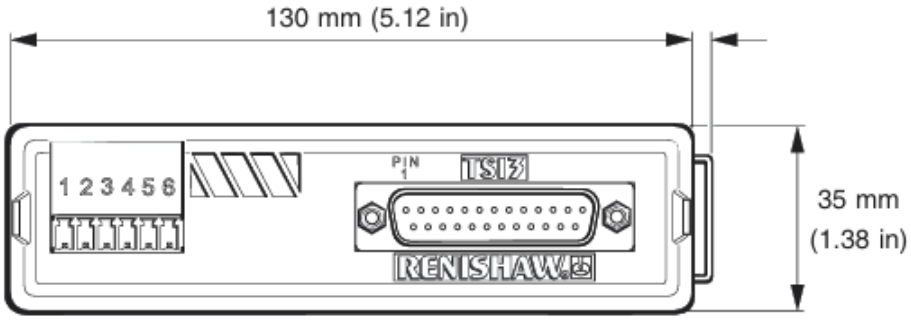


Рисунок 1.7 – Блок інтерфейсу TSI3

– блок інтерфейсу MI8-4 (рис 1.8).

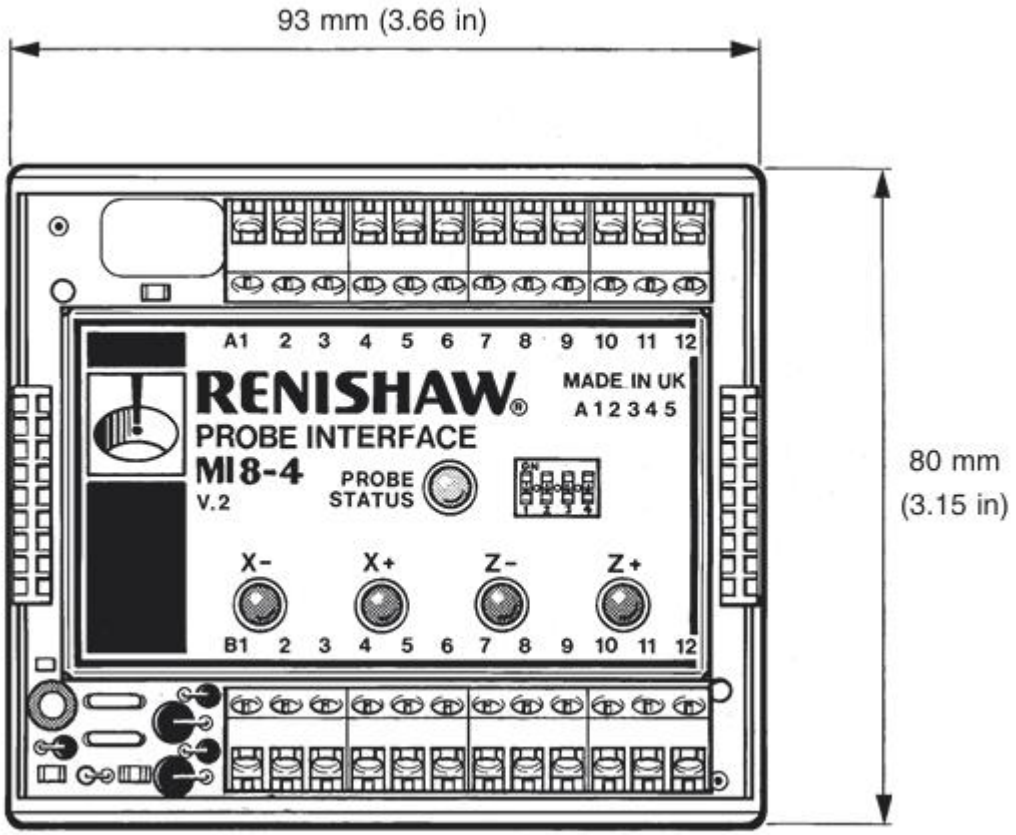


Рисунок 1.8 – Блок інтерфейсу TSI3

Таким чином, використання вимірювальних систем дозволяє автоматизувати процес прив’язки інструмента, підвищити точність і повторюваність обробки, а також зменшити вплив людського фактору. У сучасних умовах такі системи є не додатковою опцією, а необхідним елементом високоефективного та конкурентоспроможного виробництва.

2 ВИБІР СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Системи автоматизованого проєктування

На даний час важливу роль відіграють системи автоматизованого проєктування та підготовки виробництва, які забезпечують створення геометричних моделей деталей, розробку технологічних процесів і формування керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням.

При роботі з верстатами з ЧПК слід враховувати, що процес проєктування та процес безпосередньої обробки реалізуються за допомогою різних програмних середовищ, які взаємодіють між собою.

Система автоматизованого проєктування (CAD) призначена для створення цифрової моделі деталі або виробу. На цьому етапі інженер-конструктор формує геометрію, визначає розміри, допуски та інші параметри. Для виконання таких задач широко застосовуються програмні комплекси, зокрема SolidWorks, Autodesk Fusion 360 та Siemens NX. Дані системи дозволяють не лише створювати тривимірні моделі, але й проводити їх аналіз, що значно підвищує якість проєктування.

Після завершення етапу проєктування здійснюється підготовка керуючих програм за допомогою CAM-систем (Computer-Aided Manufacturing). Основним завданням CAM є розробка траєкторій руху інструмента з урахуванням параметрів обробки, а також генерація G-коду, який використовується верстатом ЧПК. Серед найбільш поширених CAM-систем слід виділити Mastercam та PowerMill. Вони забезпечують моделювання процесу обробки, що дозволяє виявити можливі помилки ще до запуску програми на верстаті.

Важливо зазначити, що не всі верстати мають власну інтегровану CAD/CAM-системи. Натомість вони можуть використовують універсальні керуючі програми, створені у зовнішніх програмних середовищах. Такий підхід забезпечує гнучкість виробництва та можливість використання різних програмних продуктів залежно від складності завдань.

Безпосереднє виконання керуючих програм здійснюється системою числового програмного керування, яка є ключовим елементом верстата. Найчастіше застосовуються системи ЧПК від провідних світових виробників, таких як Fanuc, Siemens та Mitsubishi Electric. Дані системи забезпечують обробку керуючих команд і керування всіма виконавчими механізмами верстата.

Операційна система, яка використовується у верстатах з ЧПК, відрізняється від традиційних комп'ютерних операційних систем. Вона є спеціалізованою системою реального часу (RTOS), оптимізованою для високоточного керування рухами інструмента та заготовки. Така система забезпечує миттєву реакцію на керуючі сигнали, синхронізацію роботи вузлів верстата та стабільність процесу обробки.

У деяких сучасних моделях верстатів з ЧПК додатково використовується інтерфейс оператора, який може базуватися на загальновідомих операційних системах, наприклад, Windows. Проте слід підкреслити, що дана система виконує лише функції візуалізації та взаємодії з користувачем, тоді як основні процеси керування реалізуються саме системою ЧПК.

2.2 Вибір середовища моделювання

В даний час у світовій промисловості використовується настільки велика кількість всіляких САПР, що, напевно, немає такого підприємства, заводу або конструкторського бюро, в якому не використовувалися САПР.

Настільки стала вельми поширеною, спричинило у себе створення програмних комплексів САПР, які включають можливості відразу кількох різновидів. Найчастіше у таких програмних комплексах зустрічаються різні системи об'ємного моделювання та експрес-тестів. У розробці таких програмних комплексів беруть участь кілька корпорацій, які постачають світову промисловість. Серед основних можна назвати SolidWorks, Autodesk Fusion 360 та Siemens NX..

SolidWorks-система автоматизованого проектування, інженерного аналізу та підготовки виробництва виробів будь-якої складності та призначення. Комплексні рішення SolidWorks базуються на передових технологіях гібридного параметричного моделювання та широкому спектрі спеціалізованих модулів.

Промислове впровадження SolidWorks дозволяє скоротити терміни проектування, а й знизити витрати на виробництво (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Ефективність використання САПР SolidWorks

Промислове впровадження SolidWorks		Показники ефективності	
Перелік завдань	Отримані результати	Скорочення термінів проектування	Зниження витрат на виробництво
1	2	3	4
Проектування та модифікація конструкції деталей та вузлів	Швидка асоціативна зміна деталей, технологічного оснащення та креслень	більш ніж у 10 разів	у 2-3 рази
Створення конструкторської документації, інтерактивних електронних технічних посібників	Підвищення якості документації та скорочення термінів її розробки	у 3-5 разів	

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
Робота з великими збираннями	Підвищення продуктивності роботи	у 5-10 разів	
Аналіз міцності та кінематики, моделювання складних аерогідродинамічних процесів	Скорочення кількості випробувань та зниження вартості виготовлення зразків	в 10 разів	у 2-3 рази
Оцінка динамічних зазорів, аналіз розмірних ланцюгів, оптимізація розмірів	Забезпечення 100%-ї збирання виробу	у 3-4 рази	на 70%
Виготовлення деталей складної форми на верстатах з ЧПК за єдиною твердотільною моделлю.	Оперативна передача (у наскрізному циклі) моделей для створення керуючих програм для СЧПК		на 80%
Централізоване зберігання та управління даними, електронний документообіг	Введення технології наскрізного проектування, що забезпечує оперативність перевірки та погодження КД та виключає дублювання даних	більш ніж у 3 рази	на 40%

Зазвичай CAD-системи спрямовані створення геометричних моделей виробів з геометричних примітивів, і основний час у роботі з такими системами витрачається на вибір елементів необхідних типів і, головне, на вибір оптимальної послідовності їх створення. SolidWorks дозволяє впроваджувати в систему елементи експертної системи, покликані скоротити обсяг часу роботи конструктора над CAD-системою як інструментом і мінімізувати витрати неоптимальної послідовності роботи над моделлю, типові для параметричних CAD-систем.

Програмний пакет SolidWorks багато в чому побудований з урахуванням технології SolidWorks Intelligent Feature Technology, скорочено SWIFT. Це комплекс вбудованих експертних систем, що дозволяють на ранніх етапах проектування з високим ступенем автоматизації вирішувати завдання оптимізації проекту. Це і інженерний експрес-аналіз (міцність, аеромеханіка, кінематика та динаміка механізмів), і аналіз технологічності (стосовно механічної обробки або вимог до лиття пластмас), і комплексна перевірка відповідності електронного документа вибраним стандартам, а також аналіз розмірних ланцюгів та багато іншого.

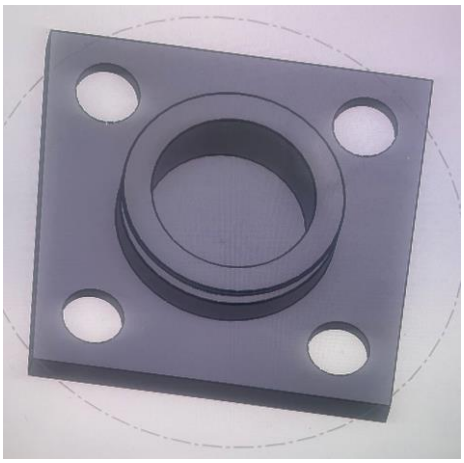
Також у SolidWorks значно підвищено швидкодію при роботі зі складними складаннями, додано нові функції аналізу працездатності збірок, покращено роботу з кресленнями, додано нові типи сполучення. Виходячи з наведених переваг для розробки та дослідження 3D моделі було обрано програмний комплекс SolidWorks.

Розробка програмного забезпечення для верстатів з ЧПК є комплексною багаторівневою системою, на базі SolidWorks, для підготовки виробництва та систему з вбудованою операційною системою реального часу для виконання керуючих програм. Така структура забезпечує високу точність обробки, гнучкість виробництва та ефективність використання обладнання, що є важливими чинниками сучасного промислового виробництва.

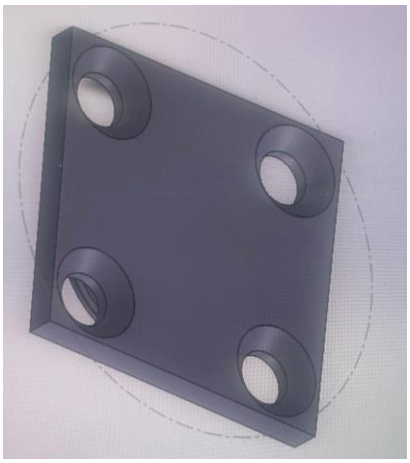
2.3 Моделювання деталі для перевірки роботи розробленої системи

Сучасні CAD/CAM – системи повинні володіти інструментами для створення як поверхневих, так і твердотільних моделей.

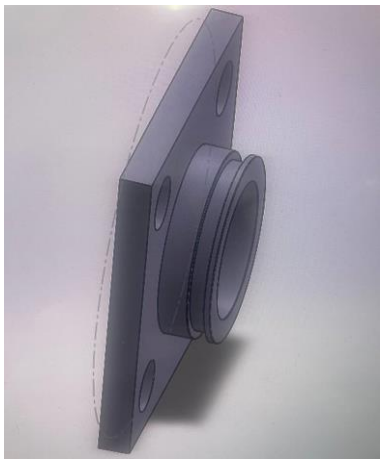
Тому на першому етапі створення керуючої програми використано твердотільний спосіб моделювання основними інструментами якого є тіла, створені на основі ескізів деталі, які найбільше виготовляються на одному з Харківських підприємств. Дана модель (рис. 2.1) на відміну від поверхневих моделей не є порожньою в середині.



а – вид зверху



б – вид знизу



в – вид збоку

Рисунок 2.1 – Модель деталі для виготовлення на верстаті з ЧПК

Для побудови твердого тіла використовуються наступні операції:

– видавлювання;

– вирізання;

– обертання ескізу.

Лістинг G-коду для обробки даної деталі наведено у Додатку А.

2.4 Моделювання прив’язки інструмента з використанням системи Renishaw

З основу контактно-вимірювальної системи було обрано серед проаналізованих моторизований маніпулятор Renishaw HPMA.

Для моделювання системи прив’язки інструмента за допомогою CAD-системи SolidWorks було використані наступні конструктивні елементи:

– колодязь (елемент, який обмежує зовнішній контур та завжди замкнений;

– вікно (елемент, який може мати як і замкнений так і незамкнений обмежуючий контур);

– площина (елемент, у якого зовнішній обмежуючий контур визначає вільну поверхню);

– уступ (елемент, у якого зовнішня границя задається двома незамкненими контурами);

– стінка (елемент, що має замкнений або незамкнений обмежуючий контур);

– отвір (елемент, який обумовлений набором геометричних елементів, що визначають положення центрів отворів);

– торець (елемент, який розташований у площині, перпендикулярній осі обертання деталі, та обумовлений трьома крапками).

Маніпулятор, який пропонується використовувати в розроблюваній системі (рис. 2.2), це кронштейн з електроприводом для високоточного автоматичного налагодження інструменту. За рахунок використання сервоприводу в цьому маніпуляторі дозволяє виконувати налагодження інструменту та

визначення його поломки безпосередньо у процесі обробки без втручання оператора.

На виконання команд керуючої програми включення руки та її фіксацію в робочому положенні. Після завершення налагодження інструменту подається команда на повернення руки з датчиком у безпечне положення за межами зони виконання обробки.

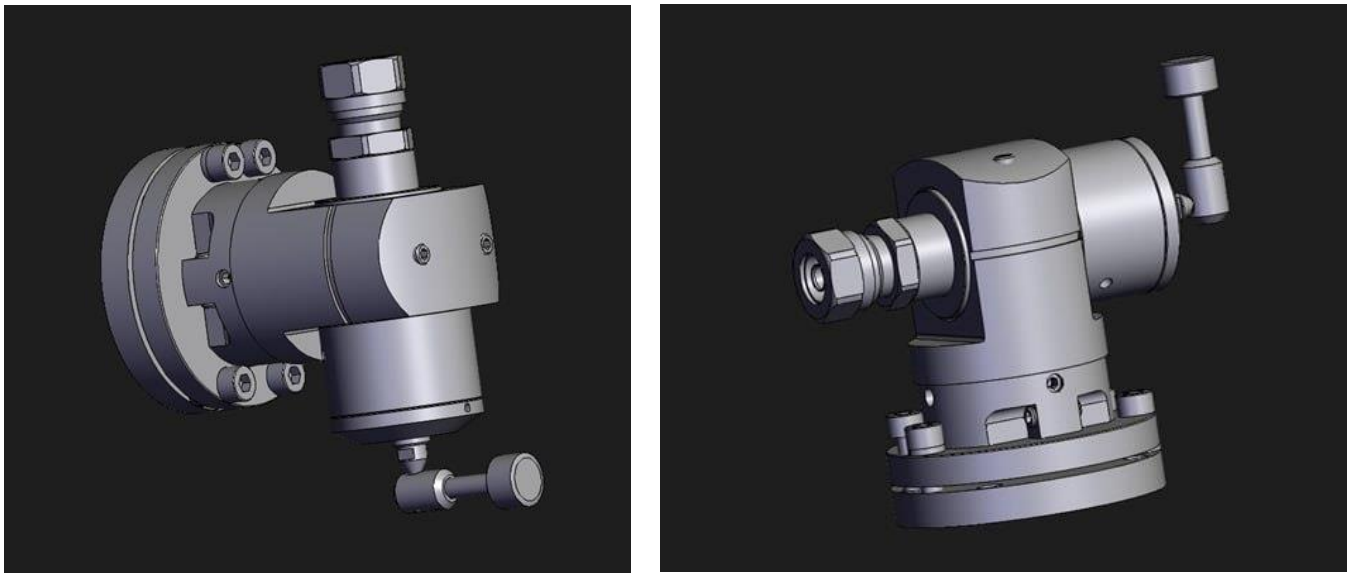


Рисунок 2.2 – Модель вимірювальної системи типу «Лапа»

2.5 Розробка структурної та блок схем керування

У процесі створення керуючої програми обробка поділяється на дві установ для дотримання правильної геометрії моделі.

У першому установ, виконується операції фрезерування поверхні заготовки. Створюється отвір для прив'язки , яке в подальшому буде використовуватися для завдання початку системи координат.

Для обробки площин і стінок створюється операції чистової обробки. Поділ операцій на чорнову і чистову дозволяє контролювати сили різання і отримати необхідні розміри. Після обробки поверхні деталі, виконується чистова обробка елемента деталі.

Блок схема керуючої програми наведена на рис. 2.3.

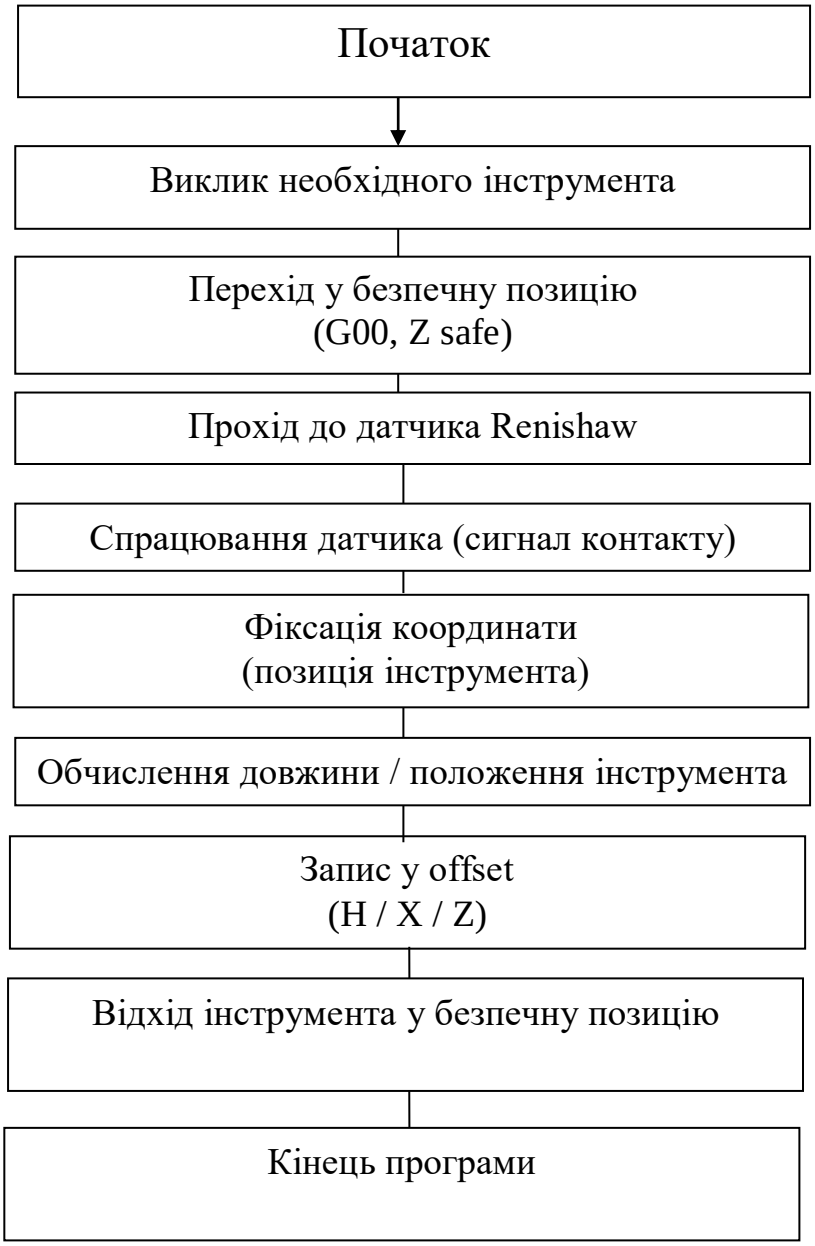


Рисунок 2.3 – Блок схема керуючої програми

Структурна схема роботи виглядає наступним чином (рис.2.4):

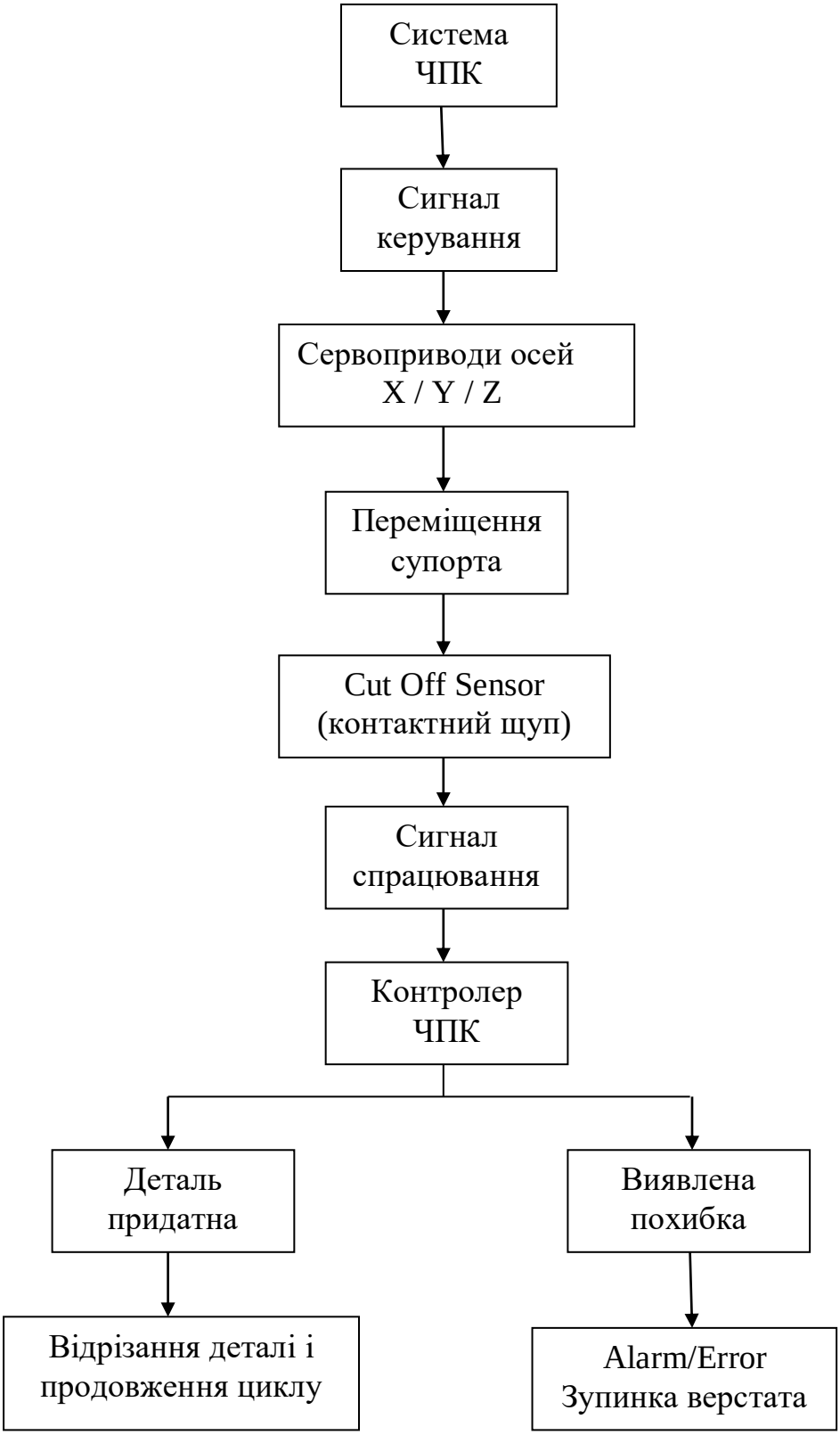


Рисунок 2.4 – Структурна схеми керування

Після завершення свердління або фрезерування система ЧПК подає команду на виклик вимірювального датчика. Супорт переміщується по осі Z до зони контролю, після чого по осі X датчик підводиться до деталі. Далі щуп опускається всередину отвору та рухається по осі Z до моменту контакту з дном або поверхнею.

У момент дотику формується електричний сигнал, який передається до контролера ЧПК. Система порівнює координату спрацювання із запрограмованими параметрами. Якщо розміри відповідають нормі, програма переходить до операції відрізання деталі. Якщо координата не відповідає заданому значенню або контакт не відбувся, система формує аварійний сигнал та зупиняє роботу верстата.

При розробці програм необхідно дотримуватися ряду вимог: забезпечення безпечних переміщень, правильний вибір швидкості подачі, контроль стану датчика та уникнення механічних перевантажень. Недотримання цих умов може призвести до пошкодження вимірювального обладнання або зниження точності обробки.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТОЧНІСТЮ ОБРОБКИ

3.1 Вимоги при розробці керуючої програми прив’язки інструмента

Створення керуючої програми прив’язки інструмента базується на використанні спеціалізованих вимірювальних циклів, які інтегруються у систему ЧПК. Ці цикли можуть бути реалізовані у вигляді мікропрограм або стандартних підпрограм, що викликаються у відповідний момент технологічного процесу.

Основою технології є взаємодія інструмента з вимірювальним датчиком (рис. 3.1). У керуючій програмі задається послідовність дій, яка забезпечує безпечний підхід інструмента до датчика, фіксацію моменту контакту та запис отриманих координат у таблицю корекцій. Програма повинна враховувати кінематичні особливості верстата, положення датчика та параметри інструмента.



Рисунок 3.1 – Датчик Renishaw RP3 [16]

Типова структура керуючої програми прив’язки включає кілька етапів. Спочатку здійснюється виклик інструмента та перехід у безпечну позицію. Далі інструмент підводиться до датчика з підвищеною швидкістю (грубий підхід), після чого відбувається повільний дотик для точного визначення координати. Після спрацювання датчика система фіксує положення та виконує запис значення у відповідний регістр корекцій. Завершальним етапом є відведення інструмента у безпечну зону.

Сучасні технології передбачають використання подвійного або багаторазового вимірювання. Спочатку виконується попередній дотик для визначення приблизного положення, після чого здійснюється точний дотик з меншою швидкістю. Отримані значення можуть усереднюватися, що дозволяє зменшити вплив випадкових похибок і підвищити точність вимірювання.

При розробці керуючої програми необхідно враховувати ряд технічних вимог. Слід забезпечити правильний вибір швидкості підходу до датчика, уникати надмірного навантаження на вимірювальний елемент та передбачити перевірку коректності отриманих даних. Також важливо враховувати положення датчика у робочому просторі верстата та можливі обмеження по переміщенню осей.

Залежно від типу верстата, технологія прив’язки має свої особливості. На фрезерних верстатах основна увага приділяється визначенню довжини інструмента по осі Z, тоді як на токарних верстатах додатково враховуються координати по осі X. У складніших випадках може виконуватися вимірювання діаметра інструмента або контроль його зносу.

Основою створення керуючих програм прив’язки інструмента є використання спеціальних макрокоманд, які викликаються за допомогою інструкції G65. Дані макроси забезпечують автоматичний підхід інструмента до вимірювального датчика, фіксацію моменту контакту та подальшу обробку отриманих координат.

Найбільш поширеним є базовий варіант прив’язки довжини інструмента для фрезерних верстатів із трьома осями. У такій програмі здійснюється виклик інструмента, його переміщення у безпечну позицію, після чого виконується вимірювальний цикл. Макрокоманда вимірювання забезпечує дотик інструмента до датчика, а наступна команда виконує запис отриманого значення у таблицю корекцій. Таким чином формується параметр довжини інструмента, який надалі використовується системою ЧПК для коригування траєкторії руху.

Для підвищення точності вимірювання застосовується метод подвійного дотику. Його сутність полягає у виконанні двох послідовних вимірювань: першого – з більшою швидкістю для попереднього визначення положення, і другого – з меншою швидкістю для уточнення координат. Такий підхід дозволяє зменшити вплив інерційних похибок і підвищити стабільність результатів, що є особливо важливим при обробці високоточних деталей.

При розробці керуючих програм необхідно враховувати ряд практичних аспектів. Зокрема, важливо забезпечити наявність безпечної висоти переміщення інструмента, правильно вибрати швидкість підходу до датчика та контролювати його технічний стан. Наявність забруднень або неправильні режими подачі можуть призвести до суттєвих похибок вимірювання.

Таким чином, використання макроциклів у керуючих програмах дозволяє реалізувати автоматизовану прив’язку інструмента, контроль його стану та адаптацію параметрів обробки в режимі реального часу. Це забезпечує підвищення точності, зниження впливу людського фактору та оптимізацію виробничого процесу, що є важливим чинником ефективної роботи сучасних верстатів з ЧПК.

3.2 Розробка керуючої програми прив’язки інструмента

Розробка керуючої програми прив’язки інструмента є важливим етапом підготовки верстата з числовим програмним керуванням (ЧПК) до виконання технологічних операцій. Основною метою даного процесу є визначення фактичного положення ріжучого інструмента відносно системи координат верстата та запис відповідних корекцій (offset), які використовуються під час обробки деталі. Процес розробки керуючої програми базується на використанні стандартних G-кодів і макрокоманд, які забезпечують автоматичну взаємодію інструмента з вимірювальним датчиком.

На першому етапі виконується виклик інструмента за допомогою команди зміни інструмента. Після цього здійснюється переміщення у безпечну позицію, що виключає можливість зіткнення з елементами верстата або датчиком. Далі у програмі задається підхід до вимірювального датчика. Спочатку використовується швидкий рух для скорочення часу, після чого здійснюється повільний підхід, необхідний для точного визначення моменту контакту.

Виробники систем управління використовують G-code як базову підмножину мови програмування, розширюючи його на власний розсуд.

Програма, написана за допомогою G-code, має жорстку структуру. Усі команди управління об'єднуються у кадри – групи, які з однієї чи більше команд. Кадр завершується символом перекладу рядка (ПС/LF) та має номер, за винятком першого кадру програми. Перший кадр містить лише один символ "%". Завершується програма командою M02 чи M30.

Кожна команда, що управляє, може мати один або кілька параметрів, які позначаються буквами латинського алфавіту:

– G – код дозволяє використовувати такі основні параметри для керуючих команд:

– X – координата точки траєкторії по осі X (наприклад, G01 X25.4 Y2.3 Z0.2);

– Y – координата точки траєкторії по осі Y (наприклад, G01 X25.4 Y2.3 Z0.2);

– Z – координата точки траєкторії по осі Z (наприклад, G01 X25.4 Y2.3 Z0.2);

– P – параметр команди G04 (наприклад, P120);

– F – швидкість робочої подачі (наприклад, G01 X10.5 F75);

– S – швидкість обертання шпинделя (наприклад, S1500 M3);

– R – параметр стандартного циклу або радіус дуги;

– H – параметр корекції вибраного інструменту;

– I, J, K – параметри дуги за кругової інтерполяції;

– * - зв'язування 2 рядків;

– T – номер інструменту;

– N – номер кадру;

– 45˚ – фаска 45˚;

– M30 – кінець програми;

– M10 кінець – реверс;

– G75 – багатопрохідний цикл нарізування циліндричних канавок;

– G33 – цикл нарізування різьблення мітчиком;

– G25 – цикл повтору;

– G31 – цикл багатопрохідного різьбонарізування.

У момент дотику інструмента до датчика формується сигнал, який обробляється системою ЧПК. Координата точки контакту фіксується та використовується для обчислення фактичної довжини інструмента або його положення. Отримане значення записується у відповідний регістр корекцій, що забезпечує правильне позиціонування інструмента під час виконання основної програми обробки.

Частина керуючої програми для прив’язки інструмента верстаті має наступний вигляд:

```
O1000
T1 M06
G90 G54 G00 X0 Y0
G43 H1 Z100
(Підхід до датчика)
G65 P9810 Z-200 F200
(Запис результату)
G65 P9811 H1
G00 Z100
M30
```

Команда G65 використовується для виклику макроциклу вимірювання, який забезпечує автоматичний дотик інструмента до датчика. Наступна макрокоманда виконує запис отриманого значення у таблицю корекцій.

Для визначення довжини інструмента, потрібно врахувати функції контролю зносу. У цьому випадку система порівнює нові значення координат із попередніми та автоматично вносить корекції.

Частина керуючої програми для прив’язки інструмента та перевірки глибин отворів на верстаті має наступний вигляд:

```
%
O1000
G21
G40 G80 G99
G28 U0 W0
(Обробка деталі)
T0101
M03 S3000
G0 X0 Z2
G1 Z-15 F0.08
G0 Z2
```

```
T0909 (Виклик датчика перевірки)
G0 X0 Y0 Z2
G31 Z-15 F50 (Перевірка глибини по осі Z)
#100 = ABS[#5063] (Зчитування фактичної координати Z)
IF [#100 LT 14.8] GOTO 900 (Порівняння результату)

IF [#100 GT 15.2] GOTO 900
(Якщо все добре, продовження роботи)
T0100
G0 X2 Z1
G1 X-1 F0.05
M30
(Аварійний режим)
N900 #3000 = 1 (Помилка глибини або поломка інструмента)
M00
```

Під час перевірки глибини отвору система ЧПК переміщує щуп у контрольну точку по осях X, Y та Z. Координати вимірювання задаються у програмі відповідно до креслення деталі.

Для перевірки роботи системи задамо задачу перевірити отвір глибиною 15 мм. Система повинна задати задає контрольне переміщення щупа по осі Z до координати Z = -15 мм.

Фактична глибина визначається за формулою:

$$H = Z_0 - Z_f,$$

де: H – фактична глибина отвору;

Z_0 – початкова координата поверхні деталі;

Z_f – координата спрацювання датчика.

Поверхня деталі знаходиться у точці Z = 0 мм, а датчик спрацював у координаті Z = -14,95 мм, тоді:

$$H = 0 - (-14,95) = 14,95\,мм,$$

Після цього система порівнює отримане значення із допустимим допуском. За поставленою задачею глибина повинна становити:

$$15 \pm 0{,}1\ мм,$$

відповідно діапазон буде:

$$14{,}9 \le H \le 15{,}1.$$

У даному випадку результат 14,95 мм входить у допустимий діапазон, тому система визначає, що отвір виконаний правильно.

Для перевірки поломки, було просвердлено отвір просвердлений лише на 10 мм, тоді координата спрацювання становитиме:

$$Z_f = -10,$$

і фактична глибина:

$$H = 10.$$

Оскільки це значення не відповідає допустимому діапазону, система ЧПК формує аварійний сигнал та переводить верстат у режим помилки.

Для контролю діаметра або ширини отвору використовується вимірювання по осі X. У такому випадку датчик виконує дотик до двох протилежних сторін отвору, після чого система обчислює діаметр:

$$D = X_2 - X_1,$$

де: D – діаметр отвору;

X_1 та X_2 – координати дотику щупа до поверхонь.

Запропонована деталь має наступні значення:

$$X_1 = -2,50\,мм,$$
$$X_2 = 2,48\,мм.$$

Тоді:

$$D = 2,48 - (-2,50) = 4,98\,мм.$$

При номінальному діаметрі 5 мм система визначає похибку:

$$\Delta D = 5,00 - 4,98 = 0,02\,мм.$$

Після виконання вимірювання система ЧПК аналізує отримані значення. Якщо всі параметри знаходяться у межах допусків, програма переходить до операції відрізання деталі. Якщо виявлено відхилення, виконується аварійна зупинка верстата.

3.3 Проведення розрахунків похибок системи автоматичної прив’язки інструмента

Під час вимірювання довжини інструмента за допомогою запропонованої системи автоматичної прив'язки загальна похибка формується під впливом кількох складових.

$$\Delta\Sigma = \sqrt{(\Delta p^2 + \Delta s^2 + \Delta t^2 + \Delta m^2)}, \quad (3.1)$$

де: Δp – похибка повторюваності щупа;

Δs – похибка позиціонування верстата;

Δt – температурна похибка;

Δm – похибка вимірювального макросу.

$$\Delta p=0{,}001 \text{ мм}; \Delta s=0{,}005 \text{ мм}; \Delta t=0{,}003 \text{ мм}; \Delta m=0{,}002 \text{ мм}.$$

$$\Delta\Sigma = \sqrt{(0{,}001^2 + 0{,}005^2 + 0{,}003^2 + 0{,}002^2)} = 0{,}0062 \text{ мм}.$$

Сумарна похибка вимірювання становить приблизно 0,006 мм (6 мкм), що задовольняє вимогам.

Також проведено розрахунок повторюваності спрацювання датчика. Отримані результати вимірювань: 125,004; 125,003; 125,004; 125,005; 125,003 мм. Потрібно визначити середнє значення:

$$\bar{X} = \Sigma Xi / n = 125{,}0038 \text{ мм}.$$

Стандартне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{(\Sigma(Xi - \bar{X})^2 / (n - 1))}$$

$$\sigma \approx 0{,}00084 \text{ мм}.$$

Отже, повторюваність датчика становить менше 1 мкм.

При розробці системи управління точністю обробки необхідно враховувати знос інструменту. Якщо значення:

– до обробки:

$$L_0 = 150{,}000 \text{ мм}.$$

– після обробки:

$$L_1 = 149{,}982 \text{ мм}.$$

$$I = L_0 - L_1 = 0{,}018 \text{ мм}.$$

Якщо допустимий знос менше I = 0,020 мм, інструмент придатний до подальшої роботи.

3.4 Впровадження системи та перевірка працездатності

Після проведеного аналізу, моделювання конструкції було встановлено на верстат з ЧПК систему управління точністю обробки.

На рисунку 3.2 наведено вигляд встановленого моторизованого маніпулятора Renishaw.

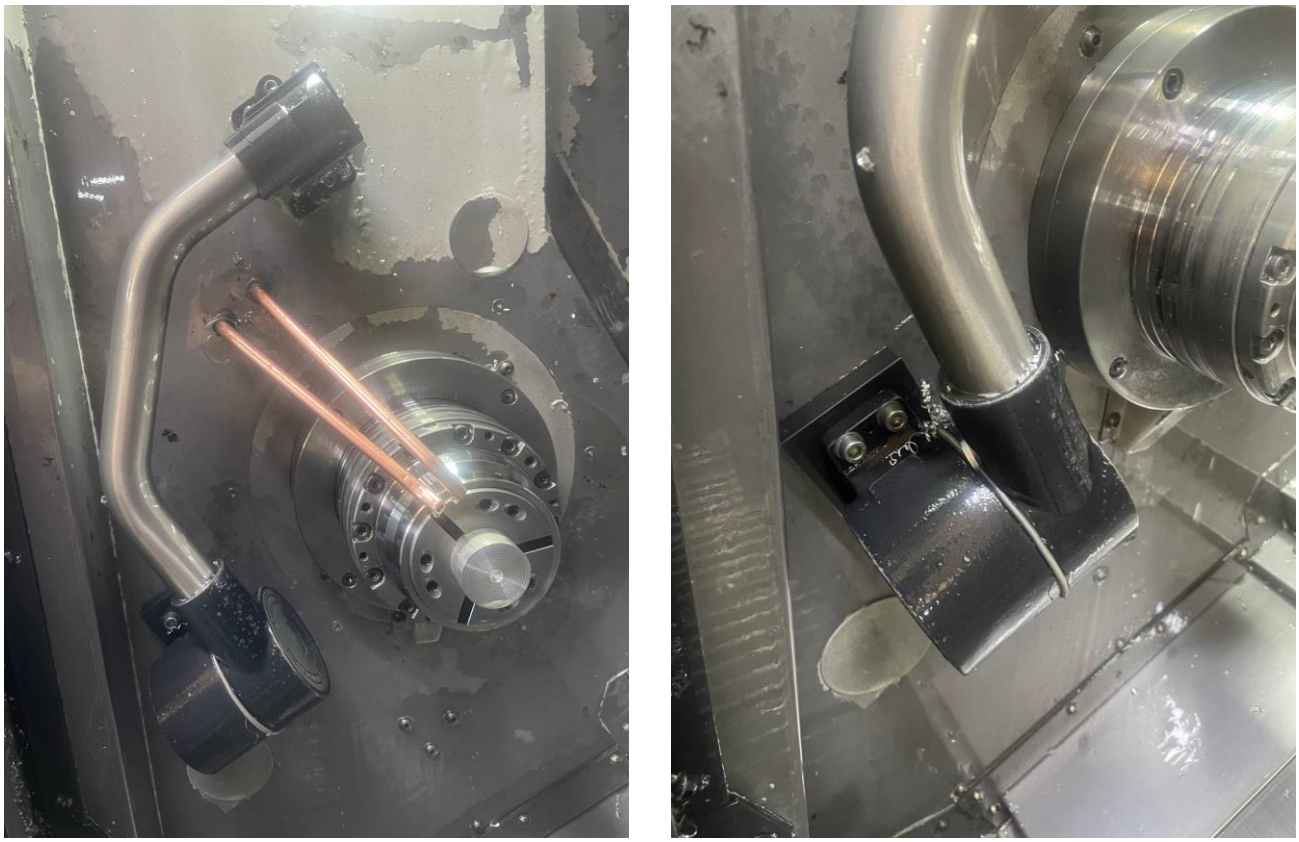


Рисунок 3.2 – Моторизована рука Renishaw

В подальшому потрібно закріпити щуп за допомогою гвинта для закріплення. Після встановлення проводимо перевірку налаштування щупу після затягування гвинтів.

На рисунку 3.3 наведено вигляд встановленого датчику Renishaw RP3.

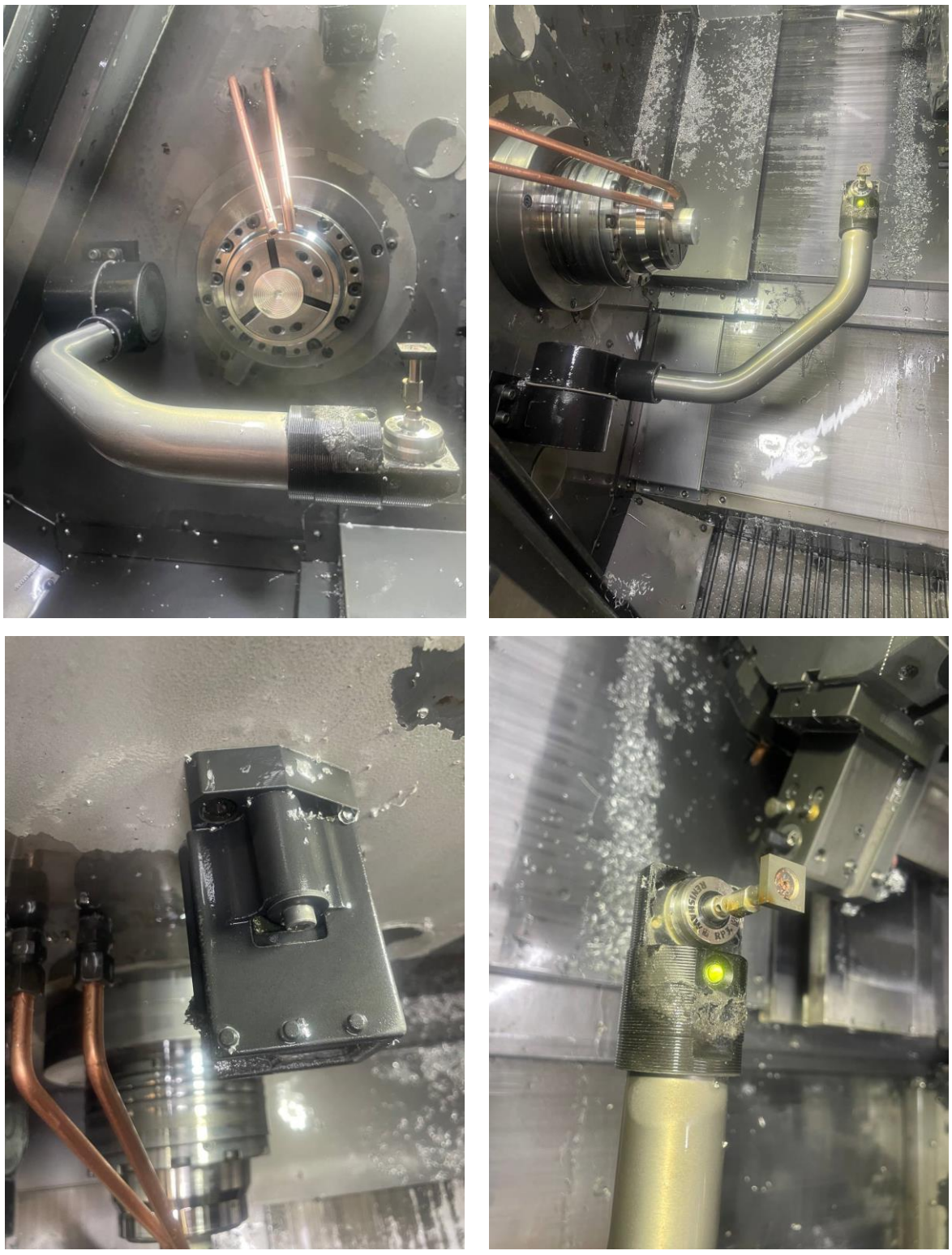


Рисунок 3.3 – Встановлений датчик Renishaw RP3

Основною метою калібрування верстата є вимірювання та компенсація помилок позиціонування. Тому перед початком проведення експерименту

потрібно провести процедуру калібруваня, що дозволить встановити взаємовідношення між положенням шпинделя станку та щупу, а також перевірити налаштування щупа для налагодження інструменту.

Під час налагодження інструменту було встановлено розмір та положення ріжучого інструменту перед використанням для обробки деталі. Перевірка не виявила несправність інструменту, тому можна переходити до перевірки працездатності запропонованої системи.

Для перевірки стану верстата часто використовується круговий інтерполяційний тест. Даний тест використовується для перевірки точності помилок верстата, оскільки вони економлять час, прості в налаштуванні та використовують принцип динамічного вимірювання. На основі виміряних даних за допомогою відповідного програмного забезпечення можна отримати інформацію про геометричні помилки, таких як перпендикулярність, помилка реверсування, люфт, помилка позиціонування, округлість, невідповідність масштабу та інше.

Помилки обробних інструментів можна визначити як відхилення ріжучого інструменту від теоретично заданого значення щодо ескізу. Діапазон помилок верстата вказує на ступінь його точності (геометричної, робочої, виробничої). Існує кілька типів факторів, що впливають на точність верстата:

– помилки, що виникають під час збирання обладнання;

– геометричні та кінематичні помилки;

– помилки, спричинені тепловими деформаціями;

– динамічні помилки;

– помилки, спричинені зусиллям різання;

– помилки, що залежать від типу пристрою.

Всі ці помилки можуть негативно впливатимуть на результуючу точність позиціонування верстата, отже і на точність деталі, що обробляється.

У ході експерименту виміру оцінювався вплив швидкості подачі та положення виміру в робочій зоні верстата на точність і повторюваність позиціонування по осі X.

Результати експерименту наведено на рисунку 3.4.

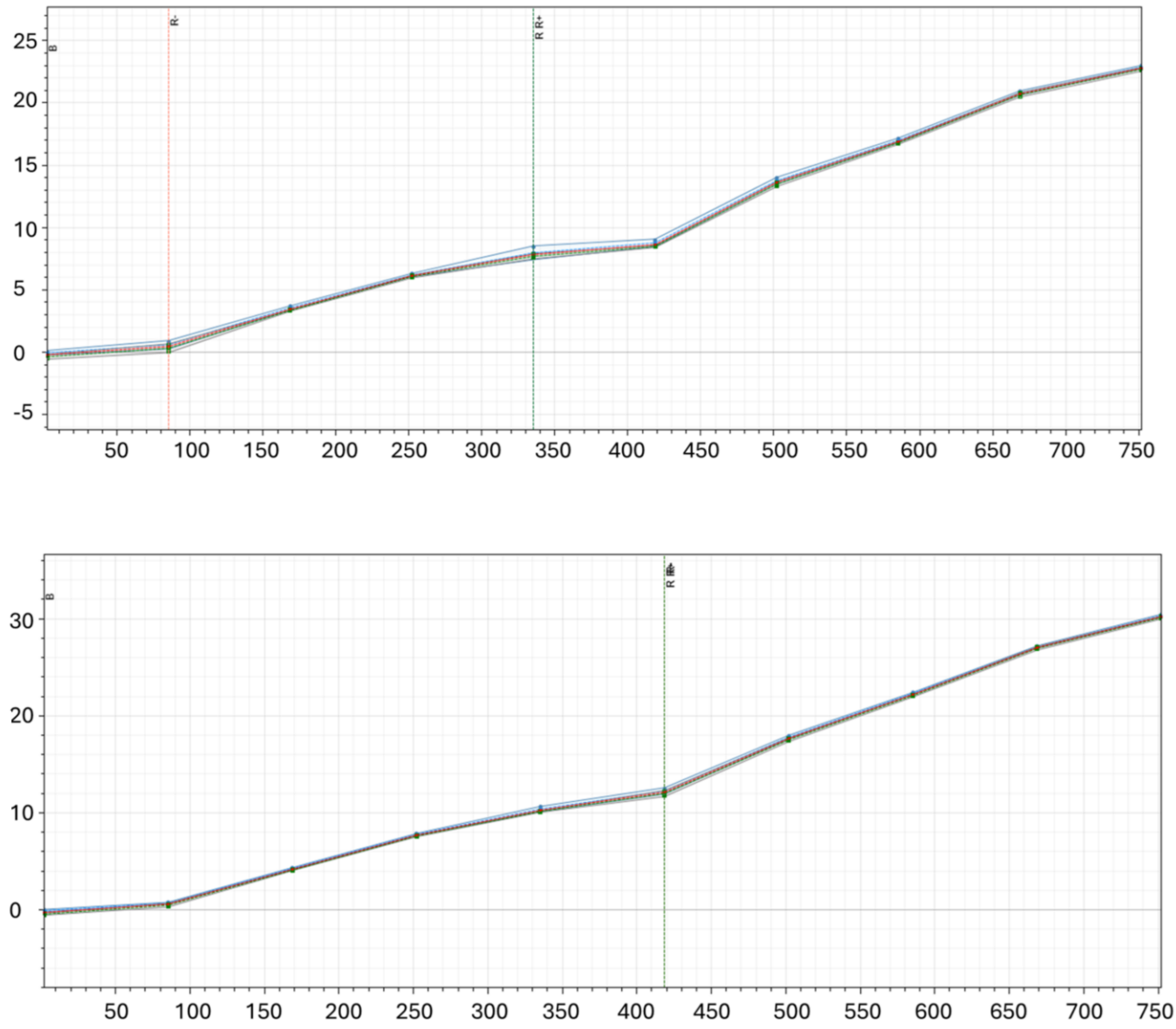


Рисунок 3.4 – Траєкторія помилки позиціонування для z_1– вгору та z_2 – вниз

На графіці вище показано тестове встановлення для положення 1 (z_1) та швидкості подачі 3000 мм/хв. Точність позиціонування у разі становить 23,6 мкм. На нижньому графіку показані результати положення 2 (z_2) при тій же швидкості подачі 3000 мм/хв. Точність позиціонування у разі становить 31,0 мкм.

Результати показують, що швидкість подачі не істотно впливає на оцінку похибки позиціонування. Результуюча похибка знаходиться в межах 1,1 мкм, що відповідає похибці вимірювання та зміни навколишнього середовища. Зміщення виміряного значення можна пояснити високою динамікою, де виникає розбіжність та не стабілізується у заданому часовому вікні.

Встановлений датчик Renishaw RP3 дозволяє оцінити похибки позиціонування та в реальному часі проводити моніторинг впливу зміни положення верстата та швидкості подачі.

У висновку можна сказати що практична частина роботи полягала у вимірі та аналізі результатів вимірювань за допомогою запропонованої контрольно-вимірювальної системи. Під час проведення вимірювань на 3 різних висотах Z з використанням різних швидкостей, було виявлено, наприклад, що швидкість подачі не так важлива, як положення, в якому проводиться вимірювання.

Однак виявлено, що використання компенсації позиціонування на висоті, відмінній від виміряної, призводить до протилежної похибки позиціонування.

Робочі умови, як швидкість подачі, положення заготівлі та налаштування верстата, впливають на кінцеву поведінку верстата з ЧПК. В подальшому можна провести перевірку впливу температури (джерел тепла), що також є важливим параметром, які можуть впливати на результат позначилося на результатах;

Отримані результати можуть бути використані в подальшому прогнозуванні точності розмірів та форми заготовок за умов чистової обробки.

3.5 Перевірка стійкості системи управління за критерієм Гурвіца

Проєктування систем автоматичного керування (САК) вимагає обов'язкового динамічного розрахунку для забезпечення стійкості та заданої точності роботи.

Слідкуючий привід координати X містить:

– регулятор положення з коефіцієнтом підсилення ($K_{під} = 4$);

– електропривід (контур швидкості), апроксимується аперіодичною ланкою з коефіцієнтом передачі ($K_{пер} = 1$) та сталою часу ($T_{пер} = 0,02\ с$);

– механічна передача (гвинт-гайка з кроком $h = 10\ мм = 0,01\ м$);

– коефіцієнт передачі редуктора та гвинта ($K_{прг} = \frac{h}{2\pi} = \frac{0,01}{6,283} = 0,0016$).

Розрахуємо загальний коефіцієнт підсилення розімкненої системи за контуром положення (K):

$$K = K_{під} \cdot K_{пер} \cdot K_{прг} = 4 \cdot 1 \cdot 0,0016 = 0,0064$$

Передавальна функція розімкненої системи (система має астатизм 1-го порядку через інтегруючі властивості механіки):

$$W_{роз}(s) = \frac{K}{s(T_{пер}s + 1)} = \frac{0,0064}{s(0,02s + 1)} = \frac{0,0064}{0,02s^2 + s}.$$

Передавальна функція замкненої системи за керуючим впливом:

$$W_{зам}(s) = \frac{W_{роз}(s)}{1 + W_{роз}(s)} == \frac{0,0064}{0,02s^2 + s + 0,0064}.$$

Отже, характеристичний поліном системи буде дорівнювати:

$$D(s) = 0,02s^2 + s + 0,0064.$$

Для перевірки стійкості системи використаємо алгебраїчний критерій стійкості Гурвіца, отже для системи 2-го порядку характеристичне рівняння має наступний вигляд:

$$a_0 s^2 + a_1 s + a_2 = 0.$$

У нашому випадку маємо значення:

– $a_0 = 0,02$;

– $a_1 = 1$;

– $a_2 = 0,0064$.

За правилом Гурвіца для системи 2-го порядку система є стійкою тоді й лише тоді, коли всі коефіцієнти характеристичного рівняння є додатними. Оскільки 0.02 > 0, 1 > 0 та 0.0064 > 0, система є абсолютно стійкою.

У висновку можна сказати що система є стійкою, для того щоб зменшити похибку при вимінюванні необхідно збільшувати коефіцієнт підсилення, а для збереження стійкості можна ввести в регулятор положення диференціальну складову (ПІД-регулятор) або реалізувати зворотний зв'язок за швидкістю та прискоренням (компенсація за збуренням).

3.6 Питання охорони праці

Розміри приміщення на виробництві, в якому виготовлятиметься система управління точністю обробки на верстатах з ЧПК складає наступні розміри $6,2\,м \times 7\,м \times 3,2\,м$. Робоче місце є столом, який обладнаний персональним

комп'ютером (потужність 600 Вт, монітор – LCD 21", частота 100 Гц). У приміщенні працює 3 особи. Площа приміщення 43,4 м^2, а об'єм 138,88 м^3. Згідно з НПАОП 0.00-1.28-10 площа на одне робоче місце повинна становити не менше 6 м^2, а обсяг – 20 м^3, у лабораторії на одне робоче місце припадає 14,4 м^2 і 46,3 м^3, що відповідає нормативному документу.

Для розрахунку необхідного повітрообміну необхідно в кожному випадку визначати кількість шкідливих речовин, що виділяються у повітря приміщення.

Необхідний повітрообмін визначається за такою формулою:

$$L = \frac{G \cdot 1000}{x_в - x_н},$$

де L, м^3/год – необхідний повітрообмін;

G, г/ч – кількість шкідливих речовин, що виділяються у повітря приміщення;

$x_в$, мг/м^3 – допустима концентрація шкідливості у повітрі робочої зони приміщення;

$x_н$, мг/м^3 – максимально можлива концентрація тієї ж шкідливості у зовнішньому повітрі, (приймаємо $x_н$=0).

$$L = \frac{0,195}{0,01 - 0} = 19,5\ м^3 / год.$$

Визначаємо кількість повітря, яке потрібно подати до робочої зони для того, щоб забезпечити необхідну кількість повітря на працюючого:

$$L = n \cdot L_{ос} = 3 \cdot 40 = 120\ м^3 / год.$$

де L_{oc} – норма подачі припливного повітря на 1 особу.

Порівнюючи норми подання L_{oc} та L для подальших розрахунків приймаємо найбільше з значень. Знайдемо кратність повітрообміну (n), яке показує скільки разів протягом однієї години повітря повністю змінюється у приміщенні:

$$n = L \cdot V_p = 120 / 138,88 = 0,86$$

де V_p - Внутрішній обсяг приміщення, м3.

Таким чином, для розрахованих параметрів обрано енергозберігаючу припливно-витяжну установку Dantex DV 250E-DV1200E з продуктивністю 150-1200 м3/год, що забезпечить необхідне значення повітрообміну.

ВИСНОВКИ

Використання сучасних контактних щупів для верстатів ЧПК дозволяють досягнути високої точності та повторюваності вимірювань, а також підтримувати автоматичний контроль деталей без участі оператора. Це дозволяє значно знизити кількість браку, своєчасно виявляти поломку інструмента та забезпечувати стабільність серійного виробництва.

У роботі було запропоновано встановити на верстат з ЧПК моторизовану руку, за основу якої взято лапа Renishaw та контактно-вимірювальний датчик Renishaw RP3, що дозволяє автоматизувати процес налаштування інструменту, підвищити точність обробки та скоротити час підготовки виробництва. Система забезпечує автоматичне визначення геометричних параметрів інструменту, контроль його зношення та виявлення поломки без участі оператора.

У першому розділі проведено аналіз можливостей сучасних верстатів з ЧПК, аналіз допоміжних пристроїв та контактно-вимірювальних систем. Проведений аналіз показав необхідність розробки нових вимірювальних систем для автоматизації процесу прив’язки інструмента.

У другому розділі на початку обрано систему автоматизованого проектування для моделювання конструкції системи управління точністю обробки та ескіз деталі для перевірки. Також розроблено структурну та блок схеми керування. Визначено що при розробці програм необхідно дотримуватися ряду вимог, а саме: забезпечення безпечних переміщень, правильний вибір швидкості подачі, контроль стану датчика та уникнення механічних перевантажень.

Третій розділ присвячений практичній частині, а саме розробці системи управління точністю обробки . Наведено вимоги при розробці керуючої програми прив’язки інструмента. Описано алгоритм розробки керуючої програми з фрагментами коду. В подальшому проведено розрахунки похибок системи

автоматичної прив’язки інструмента та перевірка стійкості системи управління за критерієм Гурвіца. Після проведення конструкторсько-технологічних розрахунків та монтажу запропонованої системи проведено експеримент впливу швидкості подачі та положення виміру в робочій зоні верстата на точність і повторюваність позиціонування.

Вимірювання проводились на різних висотах з використанням різних швидкостей, визначено, що швидкість подачі не так важлива, як положення, в якому проводиться вимірювання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. 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 кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарєва, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2023. 65 с.

3. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.

4. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с.

5. Невлюдов І. Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: підручник для студентів закладів вищої освіти ; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ФОП Панов А.М., 2021. – 604 с. ISBN 978-617-7947-67-6

6. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. No 50. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademi-chnu-dobrochesnist.pdf.

7. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. No 50. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademi-chnu-dobrochesnist.pdf.

8. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-diju-rishennja-vchenoi-radi -universitetu.pdf

9. Закон України “Про вищу освіту” від 01.07.2014 No 1556-VII. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text.

10. Положення про організацію освітнього процесу у ХНУРЕ [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 27.11.2020 р. No 400. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-organizaciju -osvitnogo-procesu-v-hnure.pdf.

11. Положення про організацію проведення практики здобувачів вищої освіти Харківського національного університету радіоелектроніки [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 03.05. 2019 р. No 222. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/222-vid-03.05.2019-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf.

12. Токарні верстати з ЧПК DN SOLUTIONS [Електронний ресурс] / URL: https://varitec.com.ua/category/tokarni-verstati-z-chpk-doosan/

13. Токарний автомат швейцарського типу Sowin [Електронний ресурс] / URL: https://metallworks.com.ua/ua/p1038812911-tokarnyj-avtomat-shvejtsarskogo.html

14. DOOSAN Lynx 2100A [Електронний ресурс] / URL: https://www.machineseeker.com.ua/doosan-lynx+2100a/i-21542123?srsltid=AfmBOopi46G28qiUVm53buYRXnYMeucoKDMTu-AH6N6bhZ-Y3DS67yYp

15. Renishaw reveals extra large tool setting arm for machine tools [Електронний ресурс] / URL: https://www.renishaw.com/

16. RP3 tool setting probe [Електронний ресурс] https://www.renishaw.com/resourcecentre/download/data-sheet-rp3-tool-setting-probe--142137?userLanguage=en&&srsltid=AfmBOoqsNR7Ac2ZaMYJsX4Ori1t9b4Xw1WvMgNUrgxUnytfvRJ3gXdC8

17. Advances in Computer Numerical Control Geometric Error Measurement and Compensation Techniques: A Review / J. Wang, L. Zhang, H. Liu et al. Machines. 2025. Vol. 13, No. 2. P. 112–134.

18. Clamping error compensation based on on-machine measurement / T. Tanaka, K. Sato, M. Nakamura et al. Synapse Engineering Research. 2026. Vol. 8, No. 1.

19. Enhancing CNC Machining Accuracy Through the Investigation of Errors and Factors Using Artificial Intelligence / A. Smith, B. Johnson, C. Davis et al. Proceedings of the VIII International Scientific Conference. Montreal, Canada, 2026. P. 45–52.

20. Evaluation of measurement capability when using CNC machine tools as a measurement system / R. Schmitt, P. J. Groche, M. Weigold et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025. Vol. 136, No. 4. P. 1821–1835.

21. Geometric Accuracy Design of High Performance CNC Machine Tools / X. Liu, Y. Zhao, Z. Ma et al. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2025. Vol. 38, No. 1.

22. Geometric and Thermal-Induced Errors Prediction for Active Error Compensation in Machine Tools / H. Nguyen, T. Tran, L. Le et al. Sensors and Actuators A: Physical. 2025. Vol. 379.

23. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / упоряд.: В. А. Айвазов. Т. Є. Стиценко., Н. Л. Березуцька ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 28 с.