

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА
Навчально-науковий Інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

РОЗРАХУНКОВО-ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА

на тему: Розроблення та тестування керуючої програми
для верстата з ЧПК

Виконав: здобувач вищої освіти
3 курсу, групи Сінж-2023-1у
курс, група

174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»
напрямок підготовки (спеціальність)

Буткевич Євген Вікторович
(прізвище та ініціали)

Керівник Цегельник Є.В., к.т.н., ст. дослідник
(прізвище та ініціали, наук. ступ., вч. звання)

Рецензент Тимофєєв Олексій Володимирович,
директор ПП «АКСІКОН»
(прізвище та ініціали, наук. ступ., вч. звання)

Харків – 2026


**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА**

**Навчально-науковий Інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури**

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр
Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

 БАРАНОВ О.О.

« 19 » червня 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Буткевич Євген Вікторович

1. Тема роботи: Розроблення та тестування керуючої програми для верстата з
ЧПК

Затверджена наказом університету від « 22 » травня 2026 року №440-03
Керівник роботи Цегельник Є.В., кандидат технічних наук, старший
дослідник, доцент кафедри АКІТ

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

2. Строк подання роботи здобувачем вищої освіти «15» червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи Верстат з ЧПК
4. Зміст розрахунково пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити): Вступ. Теоретичні основи використання систем числового
програмного керування. Дослідження предметної області та проектування
програмної системи. Реалізація та перевірка працездатності програмного застосування.
Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях. Висновки.

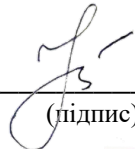
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентація.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналіз проблеми	Цегельник Є.В.	11.05.2026	21.05.2026
Основна частина	Цегельник Є.В.	22.05.2026	31.05.2026
Спеціальний розділ	Цегельник Є.В.	01.06.2026	17.06.2026
Охорона праці	Малишева В.В.	08.06.2026	15.06.2026

7. Дата видачі завдання « 11 » травня 2026 р.

Керівник _____ Цегельник Є.В.



(підпис)


Завдання прийняв до виконання



(підпис)

Буткевич Є.В.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання розділів	Примітка
1	Розробка 1 го розділу бакалаврської роботи	11.05.2026 - 21.05.2026	
2	Розробка 2 го розділу бакалаврської роботи	22.05.2026 - 31.05.2026	
3	Розробка 3 го розділу бакалаврської роботи	01.06.2026 - 17.06.2026	
4	Розробка 4 го розділу з охорони праці	08.06.2026 - 15.06.2026	
5	Рецензування бакалаврської роботи	15.06.2026	Тимофєєв О.В.
6	Захист на ДЕК	25.06.2026	

Здобувача вищої освіти _____



(підпис)

Буткевич Є.В.

Керівник _____

(підпис)

Цегельник Є.В.

РЕФЕРАТ

Розроблення та тестування керуючої програми для верстата з ЧПК – Буткевич Євген Вікторович дипломна робота бакалавра, Харків, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, кількість сторінок 108, кількість таблиць 23, кількість рисунків 23, кількість джерел літератури 25.

Актуальність дослідження. Актуальність теми дипломної роботи обумовлена стрімким розвитком автоматизованих виробничих систем та широким впровадженням обладнання з числовим програмним керуванням у різних галузях промисловості. Сучасні верстати з ЧПК забезпечують високу точність, продуктивність і стабільність технологічних процесів, що є необхідною умовою підвищення конкурентоспроможності підприємств в умовах цифрової трансформації виробництва. Водночас ефективність використання такого обладнання значною мірою залежить від якості розроблення керуючих програм, правильності налаштування технологічних параметрів та можливості їх оперативного коригування. Ускладнення геометрії виробів, зростання вимог до точності обробки та необхідність скорочення часу підготовки виробництва потребують удосконалення процесів програмування верстатів з ЧПК та застосування сучасних програмних засобів автоматизації. Крім того, актуальність дослідження посилюється необхідністю підготовки висококваліфікованих фахівців, здатних здійснювати розроблення, тестування та оптимізацію керуючих програм для автоматизованого обладнання. У зв'язку з цим розроблення та дослідження програмних рішень для формування і перевірки G-code є важливим науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення ефективності функціонування сучасних виробничих систем.

Об'єкт дослідження: процес керування верстатом з ЧПК.

Предмет дослідження: керуюча програма (G-код) та її вплив на виконання технологічного процесу.

Метою роботи є розробити та дослідити керуючу програму для оброблення контурної деталі на верстаті з ЧПК з використанням засобів симуляції.

У роботі використовуються методи. Для вивчення принципів функціонування верстатів з числовим програмним керуванням, особливостей побудови керуючих програм та сучасних програмно-технічних рішень застосовано методи аналізу, синтезу, узагальнення та систематизації науково-технічної літератури. Під час проектування програмного застосунку використано методи структурного аналізу та об'єктно-орієнтованого моделювання із застосуванням UML-діаграм. Для розроблення керуючої програми використано метод алгоритмізації та програмування мовою G-code. Перевірку працездатності розробленого рішення виконано за допомогою методів комп'ютерного моделювання та симуляції технологічного процесу оброблення деталі на верстаті з ЧПК. Для оцінювання результатів роботи застосовано метод порівняльного аналізу, що дозволив дослідити правильність виконання керуючої програми, виявити можливі помилки та оцінити ефективність запропонованого програмного рішення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: верстат з ЧПК, ЧПК, комп'ютерно-інтегрована система керування, G-code.

ABSTRACT

Development and Testing of a Control Program for a CNC Machine – Yevhen V. Butkevych, Bachelor's Thesis, Kharkiv, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Total number of pages: 108, number of tables: 23, number of figures: 23, number of references: 25.

Research relevance. The relevance of the thesis topic is determined by the rapid development of automated manufacturing systems and the widespread implementation of computer numerical control (CNC) equipment in various industrial sectors. Modern CNC machines provide high precision, productivity, and stability of technological processes, which are essential prerequisites for enhancing the competitiveness of enterprises in the context of digital transformation of production. At the same time, the efficiency of such equipment largely depends on the quality of control program development, the correct configuration of technological parameters, and the possibility of their prompt adjustment. The increasing complexity of product geometry, growing requirements for machining accuracy, and the need to reduce production preparation time require the improvement of CNC programming processes and the application of modern automation software tools. In addition, the relevance of the research is strengthened by the need to train highly qualified specialists capable of developing, testing, and optimizing control programs for automated equipment. Therefore, the development and study of software solutions for generating and verifying G-code constitute an important scientific and practical task aimed at improving the efficiency of modern manufacturing systems.

Object of research: the process of controlling a CNC machine.

Subject of research: the control program (G-code) and its influence on the execution of the technological process.

The purpose of the thesis is to develop and investigate a control program for machining a star-shaped component of an inspection machine on a CNC machine using simulation tools.

Research methods. The study employs a set of general scientific and specialized research methods. To investigate the operating principles of CNC machines, the features of control program development, and modern software and hardware solutions, the methods of analysis, synthesis, generalization, and systematization of scientific and technical literature were applied. During the design of the software application, methods of structural analysis and object-oriented modeling using UML diagrams were employed. The development of the control program was carried out using algorithm design and G-code programming methods. The functionality of the developed solution was verified through computer modeling and simulation of the machining process on a CNC machine. To evaluate the obtained results, a comparative analysis method was used, which made it possible to assess the correctness of the control program, identify possible errors, and evaluate the effectiveness of the proposed software solution.

KEYWORDS: CNC machine, CNC, computer-integrated control system, G-code.

ЗМІСТ

Вступ	9
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ	11
1.1 Характеристика та сфери застосування верстатів із числовим програмним керуванням	11
1.2 Особливості функціонування обладнання з ЧПК	19
1.3 Аналіз сучасних програмних і технічних рішень-аналогів	28
Висновки до розділу 1	33
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ	33
2.1 Формування вимог до програмного продукту	33
2.2 Моделювання взаємодії користувача із системою засобами UML	43
2.3 Основні конструкції та принципи використання мови G-code	50
Висновки до розділу 2	52
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКА КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ.....	53
3.1 Розроблення програмного рішення для для оброблення контурної деталі	53
3.2 Демонстрація функціональних можливостей створеного застосунку	64
Висновки до розділу 3	73
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	74
4.1 Організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці	74
4.2 Характеристика об'єкта та виявлення потенційних небезпек	78
4.3 Дослідження ризику реалізації потенційних небезпек на об'єкті проєктування та розробка заходів щодо їх попередження	87
Висновки до підрозділу 4	95
Висновки	96
Список використаних джерел	98
Додатки	101

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку промислового виробництва важливе місце посідають автоматизовані технологічні комплекси, здатні забезпечувати високу продуктивність, точність та стабільність виконання виробничих операцій. Одним із ключових елементів таких комплексів є обладнання з числовим програмним керуванням, використання якого дозволяє реалізувати складні технологічні процеси із заданими параметрами якості та мінімальним рівнем похибок.

Верстати з числовим програмним керуванням широко застосовуються для механічної обробки різноманітних матеріалів, зокрема металів, деревини, скла, полімерних матеріалів та паперової продукції. Завдяки автоматизованому виконанню виробничих операцій забезпечується скорочення тривалості технологічного циклу, зменшення витрат сировини та підвищення ефективності використання виробничих ресурсів.

Однією з основних переваг впровадження технологій ЧПК є можливість виконання складних операцій з високим ступенем точності та відтворюваності результатів. Це набуває особливої актуальності в умовах серійного та масового виробництва, де необхідно забезпечити відповідність кожного виробу встановленим технічним вимогам. Використання автоматизованих систем керування дозволяє мінімізувати вплив людського фактора на виробничий процес, що сприяє зменшенню кількості технологічних помилок і підвищенню загальної надійності виробництва.

Разом із численними перевагами експлуатація верстатів з числовим програмним керуванням супроводжується низкою технічних та організаційних труднощів. Однією з найбільш суттєвих проблем є складність процесу підготовки керувальних програм, їх налаштування та подальшої оптимізації. Розроблення ефективних програм обробки потребує значних часових витрат, а також залучення фахівців, які володіють спеціалізованими знаннями у сфері програмування та експлуатації обладнання з ЧПК.

Окремої уваги потребує проблема кадрового забезпечення підприємств кваліфікованими спеціалістами, здатними здійснювати програмування, технічне обслуговування та діагностику верстатів з числовим програмним керуванням. Високий рівень складності сучасних виробничих систем висуває підвищені вимоги до професійної підготовки персоналу та його практичних компетентностей.

Важливим аспектом функціонування автоматизованих виробничих комплексів є забезпечення їхньої інтеграції з іншими інформаційними та технологічними системами підприємства. Така інтеграція передбачає організацію взаємодії обладнання з ЧПК із системами управління виробництвом, планування ресурсів підприємства, контролю якості продукції та іншими програмно-технічними засобами. Реалізація комплексного інформаційного середовища дозволяє підвищити рівень координації виробничих процесів, скоротити непродуктивні простой обладнання, оптимізувати використання матеріальних ресурсів і, як наслідок, забезпечити зростання ефективності функціонування виробничого підприємства.

Мета роботи: розробити та дослідити керуючу програму для оброблення контурної деталі на верстаті з ЧПК з використанням засобів симуляції.

Задачі:

- проаналізувати структуру керуючих програм ЧПК;
- розробити G-код для оброблення деталі;
- виконати симуляцію оброблення;
- виявити та усунути помилки програми;
- оцінити ефективність розробленої програми.

Об'єкт дослідження: процес керування верстатом з ЧПК.

Предмет дослідження: керуюча програма (G-код) та її вплив на виконання технологічного процесу.

Структура роботи: робота складається з чотирьох розділів, обсяг роботи 111 сторінок, в тому числі 82 сторінки основного тексту, включаючи список літератури та додатки.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Характеристика та сфери застосування верстатів із числовим програмним керуванням

Сучасний розвиток промислового виробництва характеризується широким впровадженням автоматизованих технологій, спрямованих на підвищення продуктивності праці, забезпечення високої точності виготовлення продукції та скорочення виробничих витрат. Одним із найбільш ефективних засобів автоматизації технологічних процесів є верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), які дозволяють виконувати складні операції механічної обробки відповідно до заданої програми без безпосереднього втручання оператора в процес оброблення.

Застосування верстатів з ЧПК забезпечує високу повторюваність технологічних операцій, стабільність параметрів оброблення та можливість виготовлення деталей складної геометричної форми. Завдяки використанню програмного керування значно зменшується вплив людського фактора на якість кінцевої продукції, підвищується точність позиціонування інструмента та скорочується час підготовчо-завершальних операцій.

Особливого значення обладнання з числовим програмним керуванням набуло в галузях машинобудування, приладобудування, авіаційної та автомобільної промисловості, де до точності виготовлення деталей висуваються підвищені вимоги. Крім того, розвиток сучасних CAD/CAM-систем дозволив інтегрувати процеси проектування та виробництва в єдиний інформаційний простір, що сприяє підвищенню ефективності технологічної підготовки виробництва.

У межах даного підрозділу розглянуто основні характеристики верстатів із числовим програмним керуванням, їх конструктивні особливості, класифікацію та основні сфери застосування у сучасному виробництві.

Верстати з числовим програмним керуванням являють собою високотехнологічне обладнання, функціонування якого базується на використанні спеціалізованих програмних засобів для автоматизованого керування робочими органами та виконавчими механізмами верстата [1]. Застосування технологій програмного керування забезпечує можливість виконання складних операцій механічного оброблення із заданою точністю, стабільністю параметрів та високою відтворюваністю результатів. Завдяки цьому обладнання даного типу набуло широкого поширення у різних галузях промислового виробництва під час оброблення металів, деревини, полімерних матеріалів, акрилу, композитів та інших конструкційних матеріалів.

Функціонування верстатів з ЧПК ґрунтується на виконанні керуючих програм, які містять формалізований опис послідовності технологічних операцій. Як правило, такі програми формуються мовою G-код та включають набір команд, що визначають траєкторію переміщення інструмента, режими різання, швидкість подачі, частоту обертання шпинделя та інші параметри технологічного процесу. Автоматизоване виконання програмних інструкцій дозволяє реалізовувати операції оброблення підвищеної складності, які характеризуються високими вимогами до точності геометричних параметрів і якості поверхні готових виробів [2].

Висока ефективність та універсальність верстатів з числовим програмним керуванням зумовили їх активне використання у багатьох виробничих сферах. У машинобудуванні таке обладнання застосовується для виготовлення деталей та вузлів транспортних засобів, промислових машин і технологічного устаткування. В авіаційній та аерокосмічній галузях верстати з ЧПК використовуються для оброблення складнопрофільних елементів конструкцій, до яких висуваються підвищені вимоги щодо точності та надійності. Значного поширення ці системи набули й у медичній промисловості, де використовуються для виробництва імплантатів, протезів, хірургічних інструментів та інших виробів медичного призначення.

У сфері електронного виробництва обладнання з ЧПК застосовується під час виготовлення друкованих плат, корпусних елементів і комплектувальних виробів. У деревообробній та меблевій галузях верстати забезпечують високоточне фрезерування, різання та гравіювання деталей складної конфігурації. Крім того, широкі можливості програмного керування сприяли впровадженню ЧПК-технологій у ювелірному виробництві, де необхідне виготовлення виробів зі складною геометрією та високою якістю оброблення поверхонь дорогоцінних металів і каменів.

Таким чином, верстати з числовим програмним керуванням є невід'ємною складовою сучасних автоматизованих виробничих систем, забезпечуючи високу точність виконання технологічних операцій, гнучкість виробництва та підвищення ефективності використання виробничих ресурсів.

Впровадження обладнання з числовим програмним керуванням є важливим фактором підвищення ефективності діяльності не лише великих промислових підприємств, а й суб'єктів малого та середнього бізнесу. Використання верстатів з ЧПК створює передумови для модернізації виробничих процесів, розширення технологічних можливостей підприємства та підвищення конкурентоспроможності продукції на ринку [3].

Однією з ключових переваг застосування ЧПК-технологій є суттєве зростання продуктивності виробництва. Автоматизація технологічних операцій дозволяє забезпечити безперервність процесу оброблення та збільшити обсяги випуску продукції без пропорційного розширення штату працівників. У багатьох випадках контроль за роботою обладнання, його налаштування та коригування технологічних параметрів можуть здійснюватися одним оператором, що є особливо актуальним для невеликих виробничих підприємств з обмеженими кадровими ресурсами.

Важливою характеристикою верстатів з числовим програмним керуванням є висока гнучкість виробничого процесу. Малі підприємства часто працюють в умовах змінного попиту та необхідності виготовлення невеликих партій продукції або індивідуальних виробів за замовленням. За таких умов програмне керування дозволяє оперативно змінювати технологічні параметри оброблення та швидко адаптувати

обладнання до виробництва нових типів деталей без суттєвих витрат часу на переналагодження [4].

Додатковою перевагою автоматизованих виробничих систем є зниження виробничих витрат. Використання програмно-керованого обладнання сприяє раціональному використанню матеріальних ресурсів, мінімізації кількості бракованої продукції та скороченню втрат, пов'язаних із помилками під час ручного виконання технологічних операцій. Це дозволяє підвищити економічну ефективність виробництва та забезпечити стабільну якість готової продукції.

Особливого значення застосування верстатів з ЧПК набуває під час виготовлення деталей складної геометричної форми, для яких характерні підвищені вимоги до точності розмірів і якості оброблення поверхонь. Автоматизоване керування забезпечує стабільність технологічного процесу, високу повторюваність результатів та скорочення термінів виготовлення продукції. Сукупність зазначених факторів позитивно впливає на ринкові позиції підприємства та сприяє підвищенню його конкурентних переваг [5].

Залежно від функціонального призначення, технологічних можливостей та конструктивного виконання верстати з числовим програмним керуванням поділяються на декілька основних груп. Однією з найпоширеніших ознак класифікації є вид технологічної обробки. За даним критерієм виділяють фрезерні, токарні, свердлильні, шліфувальні, розточувальні та багатофункціональні обробні центри.

Важливою характеристикою обладнання є кількість координатних осей, які беруть участь у процесі керування переміщенням інструмента або заготовки. Найбільш поширеними є трикоординатні верстати, що забезпечують переміщення по осях X , Y та Z . Для виконання складних просторових операцій використовуються п'ятикоординатні та багатокоординатні системи, які дозволяють реалізувати додаткові ступені свободи та обробляти поверхні складної геометричної конфігурації за один технологічний цикл [6].

За конструктивним виконанням верстати з ЧПК можуть мати вертикальне або горизонтальне компонування робочих вузлів, а також відрізнятися способом переміщення заготовки чи інструмента. Одні моделі оснащуються нерухомими робочими столами, тоді як в інших переміщення здійснюється безпосередньо робочою платформою. Важливим параметром обладнання є розмір робочої зони, який визначає максимально допустимі габарити деталей, що можуть бути оброблені на конкретному верстаті [7].

Таким чином, використання верстатів з числовим програмним керуванням забезпечує підвищення ефективності виробничих процесів, розширення технологічних можливостей підприємств та створення умов для виготовлення високоякісної продукції відповідно до сучасних вимог промислового виробництва.

До основних технічних параметрів верстатів з числовим програмним керуванням належать точність позиціонування, швидкість виконання технологічних операцій, потужність приводу шпинделя, кількість координатних осей керування та розміри робочої області. Сукупність зазначених характеристик визначає функціональні можливості обладнання, його продуктивність та сферу практичного застосування.

Одним із найважливіших показників ефективності верстата є точність позиціонування, яка характеризує здатність системи забезпечувати переміщення інструмента або заготовки до заданих координат із мінімальним відхиленням від програмно визначеної траєкторії. Від даного параметра безпосередньо залежить точність геометричних розмірів готового виробу та відповідність продукції встановленим технічним вимогам.

Важливим критерієм оцінювання роботи обладнання також є швидкість оброблення, яка визначається режимами різання, швидкістю подачі робочого інструмента та потужністю шпиндельного вузла. Підвищення цих параметрів дозволяє скоротити тривалість технологічного циклу та забезпечити зростання продуктивності виробництва без погіршення якості оброблення [8].

Кількість керованих координатних осей визначає рівень складності операцій, які можуть виконуватися на верстаті. Зі збільшенням кількості осей розширюються можливості формування складних просторових поверхонь, оброблення деталей комплексної конфігурації та реалізації багатокоординатних траєкторій руху інструмента. Не менш важливим параметром є розмір робочої зони, що встановлює граничні габарити заготовок, які можуть бути оброблені на конкретному обладнанні.

Основні характеристики верстатів з числовим програмним керуванням представлені в табл. 1.1

Таблиця 1.1

Основні характеристики верстатів з числовим програмним керуванням

Характеристика	Опис	Вплив на технологічний процес
Точність позиціонування	Здатність верстата переміщувати інструмент або заготовку до заданих координат з мінімальним відхиленням	Забезпечує відповідність геометричних параметрів виробу технічним вимогам
Повторюваність позиціонування	Здатність багаторазово відтворювати однакові координати переміщення	Гарантує стабільність якості серійної продукції
Потужність шпинделя	Максимальна потужність приводу різального інструмента	Визначає можливість оброблення різних матеріалів та режими різання
Частота обертання шпинделя	Кількість обертів шпинделя за одиницю часу	Впливає на продуктивність і якість поверхні оброблення
Швидкість подачі	Швидкість переміщення інструмента або заготовки під час оброблення	Визначає тривалість виробничого циклу та ефективність роботи
Кількість координатних осей	Число напрямків керованого переміщення інструмента	Розширює можливості виготовлення деталей складної форми
Розмір робочої зони	Максимальні габарити заготовки, що може бути оброблена	Обмежує розміри виробів, які можуть виготовлятися на верстаті
Тип системи ЧПК	Програмно-апаратний комплекс керування верстатом	Визначає функціональні можливості та точність керування
Тип приводу	Серводвигуни або крокові двигуни	Впливає на точність позиціонування та динаміку роботи
Автоматизація зміни інструмента	Наявність систем автоматичної заміни інструменту	Скорочує допоміжний час та підвищує продуктивність
Максимальне навантаження на стіл	Гранична маса заготовки, що допускається до оброблення	Визначає сферу застосування обладнання
Споживана потужність	Енергетичні витрати верстата під час роботи	Впливає на економічну ефективність виробництва

Таким чином, верстати з числовим програмним керуванням є ключовим елементом сучасних автоматизованих виробничих систем. Їх використання забезпечує високий рівень точності, стабільність технологічних процесів, підвищення продуктивності праці та раціональне використання виробничих ресурсів. Завдяки широкому спектру технічних характеристик і можливостей програмного керування обладнання даного типу успішно застосовується для оброблення різноманітних матеріалів та виготовлення деталей різної складності. Це обумовлює його важливу роль у розвитку сучасного машинобудування, приладобудування та інших високотехнологічних галузей промисловості.

Аналіз характеристик верстатів з числовим програмним керуванням, наведених у таблиці 1.1, свідчить про те, що ефективність функціонування такого обладнання визначається сукупністю технічних параметрів, які безпосередньо впливають на точність, продуктивність та якість виконання технологічних операцій. Найбільш важливими серед них є точність позиціонування, повторюваність переміщень, потужність шпинделя та кількість координатних осей, оскільки саме ці характеристики визначають можливість виготовлення деталей складної конфігурації з мінімальними відхиленнями від заданих розмірів.

Встановлено, що збільшення кількості керованих осей розширює технологічні можливості обладнання та дозволяє виконувати багатокординатну обробку складних поверхонь. Водночас параметри робочої зони, швидкість подачі та частота обертання шпинделя визначають продуктивність верстата та його придатність для оброблення заготовок різних розмірів і матеріалів.

Класифікація верстатів з числовим програмним керуванням представлена на рис.1.1

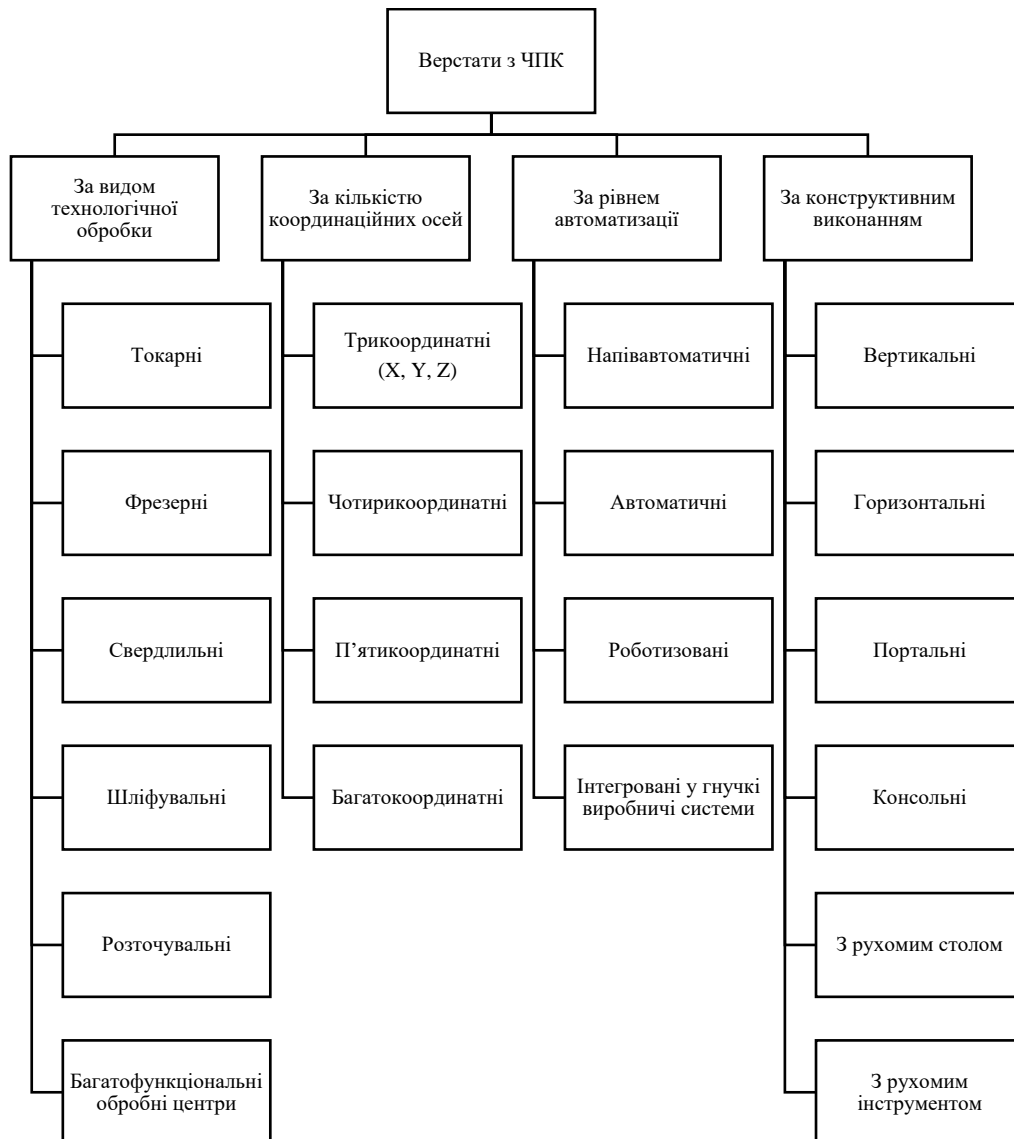


Рис. 1.1 - Класифікація верстатів з числовим програмним керуванням

Таким чином, вибір верстата з ЧПК повинен здійснюватися з урахуванням технологічних вимог до виробничого процесу, характеристик оброблюваних матеріалів та необхідного рівня точності виготовлення продукції. Раціональне поєднання зазначених технічних параметрів забезпечує ефективне використання обладнання, підвищення якості готових виробів та зростання економічної ефективності виробництва.

1.2 Особливості функціонування обладнання з ЧПК

Функціонування верстатів з числовим програмним керуванням базується на автоматизованому виконанні технологічних операцій відповідно до заздалегідь розробленої керуючої програми. На відміну від традиційного обладнання, де більшість операцій виконується оператором вручну, системи ЧПК забезпечують керування переміщенням робочих органів верстата за допомогою програмних команд, що значно підвищує точність та стабільність процесу оброблення.

Основою роботи верстата з ЧПК є взаємодія апаратних і програмних компонентів, які формують єдину систему автоматизованого керування. До складу такої системи входять пристрій числового програмного керування, виконавчі механізми, приводи подачі, шпindelний вузол, датчики контролю положення та програмне забезпечення для оброблення керуючих команд. Узгоджена робота зазначених елементів забезпечує реалізацію заданої траєкторії руху інструмента та виконання необхідних технологічних операцій [9].

Процес функціонування обладнання з ЧПК починається зі створення або завантаження керуючої програми. У програмі міститься послідовність команд, які визначають координати переміщення інструмента, швидкість подачі, режими різання, частоту обертання шпинделя та інші технологічні параметри. Після запуску програми система керування послідовно обробляє кожну команду та передає відповідні сигнали виконавчим механізмам верстата.

Важливу роль у роботі обладнання відіграє система координат, яка використовується для визначення положення інструмента відносно заготовки. Найчастіше застосовується декартова система координат, що включає осі X, Y та Z. У багатоосьових верстатах додатково використовуються поворотні осі, які розширюють можливості оброблення складних поверхонь та просторових контурів.

Для забезпечення високої точності оброблення сучасні верстати оснащуються системами зворотного зв'язку. За допомогою датчиків положення контролюється фактичне переміщення робочих вузлів, а отримана інформація постійно порівнюється

із заданими параметрами керуючої програми. У разі виникнення відхилень система автоматично виконує коригування руху, що дозволяє мінімізувати похибки позиціонування [10].

Однією з ключових особливостей сучасних систем ЧПК є можливість використання програмної симуляції технологічного процесу. Засоби комп'ютерного моделювання дозволяють виконати попередню перевірку керуючої програми, виявити потенційні помилки, оцінити траєкторію руху інструмента та запобігти можливим аварійним ситуаціям ще до початку реального оброблення деталі. Це сприяє підвищенню надійності виробничого процесу та скороченню витрат матеріалів і часу [10].

Таким чином, функціонування обладнання з числовим програмним керуванням являє собою складний процес взаємодії програмних і апаратних засобів, спрямований на забезпечення автоматизованого виконання технологічних операцій з високим рівнем точності та повторюваності результатів. Особливе значення при цьому має якість розроблення керуючої програми, оскільки саме вона визначає ефективність виконання технологічного процесу та якість виготовленої продукції.

Отже, під числовим програмним керуванням розуміють спосіб автоматичного керування роботою технологічного обладнання за допомогою спеціалізованих програм, що містять послідовність цифрових та символічних команд. Такі команди визначають параметри переміщення робочих органів верстата, режими різання, швидкість подачі інструмента, частоту обертання шпинделя та інші характеристики технологічного процесу. Керуюча програма виступає основним джерелом інформації для системи керування та забезпечує реалізацію заданого алгоритму оброблення деталі [11].

Принцип функціонування верстата з ЧПК полягає у послідовному виконанні команд керуючої програми, яка попередньо створюється оператором або автоматично генерується за допомогою спеціалізованих CAD/CAM-систем. Після завантаження програми до контролера ЧПК відбувається її інтерпретація та перетворення у керуючі сигнали для виконавчих механізмів [12]. На основі отриманих команд приводи

переміщують робочі вузли верстата по визначених координатах, забезпечуючи виконання необхідних технологічних операцій відповідно до заданої траєкторії руху інструмента.

На відміну від традиційних металорізальних верстатів, де більшість операцій виконується вручну або за безпосередньої участі оператора, обладнання з числовим програмним керуванням характеризується високим рівнем автоматизації. У традиційних верстатах точність оброблення значною мірою залежить від кваліфікації працівника, його досвіду та здатності контролювати процес оброблення. У верстатах з ЧПК функції керування реалізуються програмними засобами, що дозволяє забезпечити високу повторюваність операцій та мінімізувати вплив людського фактора.

Порівняно зі звичайним обладнанням верстата з ЧПК мають низку суттєвих переваг. До них належать висока точність позиціонування, стабільність параметрів оброблення, можливість виготовлення деталей складної геометричної форми, скорочення тривалості виробничого циклу та підвищення продуктивності праці. Крім того, використання програмного керування дозволяє швидко переналаштовувати обладнання на виготовлення нової продукції шляхом зміни керуючої програми без необхідності внесення конструктивних змін до самого верстата.

Особливого значення автоматизація виробничих процесів набуває в умовах сучасного машинобудування та серійного виробництва. Використання систем ЧПК забезпечує зменшення кількості виробничих помилок, підвищення якості продукції та скорочення витрат матеріальних ресурсів. Завдяки автоматичному виконанню технологічних операцій досягається висока повторюваність результатів, що є необхідною умовою для виготовлення деталей із жорсткими вимогами до точності розмірів і якості поверхні.

Важливою перевагою автоматизованих систем є можливість інтеграції верстатів з ЧПК до складу цифрових виробничих комплексів. Сучасне обладнання може взаємодіяти з системами автоматизованого проектування, виробничого планування та контролю якості, що забезпечує створення єдиного інформаційного

середовища підприємства. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність управління виробництвом та забезпечити оперативне коригування технологічних процесів відповідно до виробничих потреб.

Таким чином, числове програмне керування є основою функціонування сучасного автоматизованого обладнання та забезпечує виконання складних технологічних операцій з високим рівнем точності, продуктивності та надійності. Саме якість розроблення керуючої програми визначає ефективність роботи верстата та результати оброблення деталі.

Ефективність функціонування верстата з числовим програмним керуванням значною мірою залежить від узгодженої роботи його основних конструктивних та програмно-апаратних компонентів. Система ЧПК являє собою складний комплекс взаємопов'язаних елементів, які забезпечують оброблення керуючої інформації, формування команд керування та їх реалізацію у вигляді механічних переміщень робочих органів обладнання.

Центральним елементом системи є пристрій числового програмного керування (рис. 1.2), який виконує функції оброблення та інтерпретації команд керуючої програми. Контролер ЧПК приймає програмний код, аналізує його структуру та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів верстата [12].

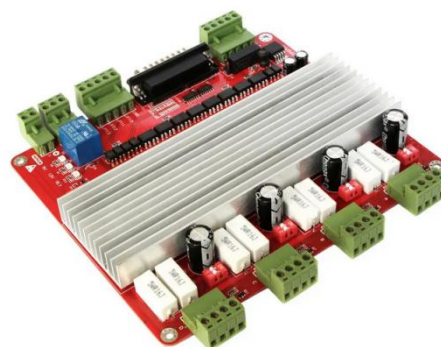


Рис. 1.2 - Пристрій числового програмного керування

Крім того, він здійснює контроль виконання технологічного процесу, координує роботу окремих вузлів обладнання та забезпечує взаємодію із системами зворотного зв'язку. Виконавчі механізми та приводи призначені для реалізації команд, сформованих контролером. Найчастіше у сучасних системах використовуються сервоприводи або крокові двигуни (рис. 1.3), які забезпечують точне позиціонування рухомих вузлів верстата.



сервоприводи



крокові двигуни

Рис. 1.3 - Виконавчі механізми та приводи

Приводи здійснюють переміщення робочого інструмента або заготовки вздовж координатних осей відповідно до заданої траєкторії. Від точності та швидкодії приводів безпосередньо залежить якість виконання технологічних операцій.

Одним із найважливіших вузлів обладнання з числовим програмним керуванням є шпиндельний механізм. Саме шпиндель забезпечує передачу крутного моменту від приводу до робочого інструмента та безпосередньо впливає на точність, продуктивність і якість механічної обробки. Конструкція шпиндельного вузла включає вал, підшипникові опори, систему приводу, пристрої кріплення інструмента та елементи охолодження. Під час роботи шпиндель сприймає значні радіальні та осьові навантаження, тому до нього висуваються підвищені вимоги щодо жорсткості, точності обертання та вібростійкості.

Його основним призначенням є забезпечення обертального руху різального інструмента або заготовки залежно від типу верстата. Технічними характеристиками шпинделя є потужність приводу, максимальна частота обертання та стабільність підтримання режимів роботи. Саме ці параметри визначають продуктивність оброблення та можливість використання різних режимів різання для конкретних матеріалів.

Для забезпечення високої точності сучасні верстати оснащуються датчиками контролю положення та системами зворотного зв'язку. До таких пристроїв належать енкодери, лінійні вимірювальні системи та інші сенсорні елементи, які постійно контролюють фактичне положення рухомих вузлів обладнання. Інформація від датчиків надходить до контролера ЧПК, де здійснюється її порівняння із заданими параметрами програми [12]. У випадку виникнення відхилень система автоматично виконує коригування руху, що дозволяє підтримувати високу точність позиціонування. Важливим елементом системи є операторська панель керування, яка забезпечує взаємодію користувача з обладнанням. За допомогою панелі оператор здійснює завантаження керуючих програм, налаштування технологічних параметрів, запуск і зупинку оброблення, а також контроль поточного стану верстата. Сучасні панелі оснащуються графічними інтерфейсами, засобами візуалізації траєкторії інструмента та функціями діагностики роботи обладнання.

Отже, система числового програмного керування являє собою комплекс взаємопов'язаних апаратних і програмних компонентів, функціонування яких спрямоване на забезпечення точного виконання керуючої програми та реалізацію заданого технологічного процесу. Ефективність роботи верстата безпосередньо залежить від узгодженості функціонування контролера, приводів, шпиндельного вузла, систем контролю та засобів взаємодії з оператором.

Однією з основних умов забезпечення точності роботи верстатів з числовим програмним керуванням є використання координатних систем для опису положення інструмента та заготовки у робочому просторі. Координатна система дозволяє однозначно визначати положення будь-якої точки під час виконання технологічних

операцій та забезпечує формування траєкторії руху виконавчих механізмів відповідно до команд керуючої програми. У більшості сучасних систем ЧПК викотується декартова система координат, яка базується на трьох взаємно перпендикулярних осях X, Y та Z. Координатна система формується відносно початкової точки відліку, яка задається під час налаштування обладнання. Переміщення вздовж кожної осі визначаються числовими значеннями координат, що містяться у керуючій програмі.

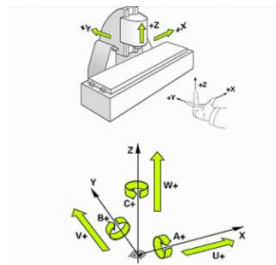


Рис. 1.4 – Декартова система координат верстата з ЧПК

Вісь X зазвичай відповідає горизонтальному переміщенню інструмента або робочого столу, вісь Y визначає поперечне переміщення, а вісь Z використовується для вертикального руху інструмента відносно заготовки. Для виконання складніших технологічних операцій застосовуються додаткові поворотні осі A, B та C. Дані осі забезпечують обертання навколо координатних осей X, Y та Z відповідно. Використання поворотних координат значно розширює можливості оброблення складнопрофільних деталей та дозволяє виконувати оброблення поверхонь під різними кутами без зміни положення заготовки [13]. Характеристика координатних осей верстатів з ЧПК надана в табл. 1.2

Таблиця 1.2

Характеристика координатних осей верстатів з ЧПК

Позначення осі	Тип руху	Напрямок переміщення
X	Лінійний	Поздовжній
Y	Лінійний	Поперечний
Z	Лінійний	Вертикальний
A	Обертальний	Навколо осі X
B	Обертальний	Навколо осі Y
C	Обертальний	Навколо осі Z

Застосування багатоосьових верстатів дозволяє реалізовувати складні траєкторії руху інструмента та виконувати оброблення деталей за один цикл без необхідності багаторазового переустановлення заготовки. Особливо актуальним це є під час виготовлення виробів складної геометричної форми, до яких належать деталі машинобудівного та приладобудівного призначення.

Функціонування будь-якого верстата з числовим програмним керуванням базується на виконанні керуючої програми, яка містить послідовність команд для здійснення технологічного процесу. Саме керуюча програма визначає порядок виконання операцій, траєкторію руху інструмента, режими різання та інші параметри оброблення [14].

Керуюча програма являє собою структурований набір команд, записаних відповідно до встановленого синтаксису. У більшості систем ЧПК використовується міжнародний стандарт програмування G-code, який забезпечує уніфікований підхід до керування технологічним обладнанням.

Типова структура керуючої програми включає [14]:

- службові команди;
- команди позиціонування;
- команди лінійної та кругової інтерполяції;
- команди керування шпинделем;
- команди зміни інструмента;
- завершальні команди.

Під час виконання програми контролер ЧПК послідовно зчитує кожний блок команд та перетворює його у сигнали керування приводами верстата. Отримані сигнали визначають напрямок руху інструмента, швидкість подачі та інші технологічні параметри.

Взаємозв'язок між керуючою програмою та технологічним процесом є безпосереднім. Будь-яка зміна параметрів програми призводить до зміни режимів оброблення, траєкторії інструмента або тривалості виробничого циклу. Саме тому якість розроблення керуючого коду безпосередньо впливає на точність виготовлення

деталей та ефективність використання обладнання. Особливе місце серед програмних команд займають G-коди. Вони визначають геометрію руху інструмента та координатні переміщення під час оброблення. Найбільш поширеними є команди швидкого позиціонування, лінійної інтерполяції та кругових переміщень.

Основні команди G-коду [15]:

G00 Швидке переміщення

G01 Лінійна інтерполяція

G02 Кругова інтерполяція за годинниковою стрілкою

G03 Кругова інтерполяція проти годинникової стрілки

G17 Вибір площини XY

G21 Метрична система координат

G90 Абсолютне програмування

G91 Відносне програмування

Використання G-коду забезпечує точне формування траєкторії руху інструмента та створює основу для реалізації технологічного процесу відповідно до вимог конструкторської документації. Однією з ключових вимог до сучасного обладнання з числовим програмним керуванням є забезпечення високої точності позиціонування та стабільності виконання технологічних операцій. Для досягнення цих цілей використовуються спеціалізовані системи контролю та автоматичного коригування параметрів роботи обладнання. Функціонування сучасних систем ЧПК базується на принципі зворотного зв'язку. Під час виконання керуючої програми датчики постійно передають інформацію про фактичне положення інструмента до контролера. Отримані дані порівнюються із заданими параметрами програми, після чого система автоматично визначає величину відхилення.

Таким чином, використання систем контролю положення, зворотного зв'язку та автоматичного коригування параметрів роботи забезпечує високу точність функціонування верстатів з ЧПК. Саме поєднання програмного керування, датчиків контролю та механізмів компенсації похибок створює умови для виготовлення деталей складної геометричної форми відповідно до встановлених технічних вимог.

1.3 Аналіз сучасних програмних і технічних рішень-аналогів

Ефективність функціонування сучасного обладнання з числовим програмним керуванням значною мірою залежить від якості підготовки керуючих програм та програмного забезпечення, що використовується для їх створення, перевірки та оптимізації. Розвиток цифрових технологій сприяв появі широкого спектра програмних засобів, які забезпечують автоматизацію процесів проєктування, підготовки виробництва та керування технологічними операціями.

Програмні системи для верстатів з ЧПК призначені для створення, редагування, налагодження та симуляції керуючих програм, що містять команди для керування переміщенням інструмента та виконанням технологічних операцій. Основним завданням таких систем є забезпечення коректного формування траєкторії оброблення, вибору оптимальних режимів різання та мінімізації ймовірності виникнення помилок під час виробничого процесу [16].

Сучасні програмні комплекси дозволяють автоматизувати значну частину робіт, пов'язаних із підготовкою виробництва. На відміну від традиційного ручного програмування, коли оператор самотійно формує кожний рядок G-коду, автоматизовані системи забезпечують генерацію програм на основі тривимірної моделі деталі та заданих технологічних параметрів. Це дозволяє скоротити тривалість підготовки виробництва, знизити ризик програмних помилок та підвищити ефективність використання обладнання.

Важливе місце у сучасному виробництві займають CAD/CAM-технології. CAD-системи (Computer-Aided Design) використовуються для створення електронних моделей виробів, розроблення креслень та конструкторської документації. CAM-системи (Computer-Aided Manufacturing) забезпечують автоматичне формування керуючих програм на основі створених моделей. Інтеграція CAD та CAM технологій дозволяє створити єдиний цифровий цикл підготовки виробництва, у межах якого конструкторська модель безпосередньо використовується для розроблення технологічного процесу та генерації керуючого коду [17].



Рис. 1.5 – Загальна схема підготовки керуючої програми

Застосування CAD/CAM-систем особливо актуальне під час виготовлення деталей складної геометричної форми, для яких необхідно забезпечити високу точність та оптимізувати траєкторію руху інструмента. У межах даної роботи такі програмні засоби можуть використовуватися для підготовки та перевірки керуючої програми під час оброблення контурної деталі.

Одним із найбільш доступних засобів перевірки програм є NC Viewer. Даний програмний продукт являє собою веборієнтоване середовище для візуалізації та аналізу G-коду. Основною перевагою NC Viewer є простота використання та можливість швидкої перевірки траєкторії руху інструмента без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення. Широке поширення серед фахівців отримала система CIMCO Edit. Програмне середовище забезпечує професійне редагування керуючих програм, синтаксичний контроль команд, симуляцію процесу оброблення та пошук помилок у коді. Наявність спеціалізованих інструментів аналізу робить дану систему ефективним засобом налагодження програм для верстатів з ЧПК. Програмний комплекс Mach3 використовується як система керування верстатами з ЧПК та дозволяє здійснювати безпосереднє виконання керуючих програм на обладнанні. Програма підтримує роботу з різними типами верстатів та забезпечує можливість ручного керування, налаштування координатних систем і моніторингу процесу оброблення. Важливим представником відкритих програмних систем є LinuxCNC. Дане програмне забезпечення функціонує на базі операційної системи Linux та використовується для керування широким

спектром обладнання з числовим програмним керуванням. Серед переваг системи слід відзначити відкритий вихідний код, гнучкість налаштувань та відсутність ліцензійних обмежень. Особливе місце серед сучасних програмних продуктів займає модуль Fusion 360 Manufacture. На відміну від редакторів G-коду, дане середовище забезпечує повний цикл підготовки виробництва, включаючи створення тривимірної моделі, розроблення технологічного процесу, автоматичну генерацію керуючої програми та симуляцію оброблення. Порівняльна характеристика програмних середовищ для роботи з G-кодом представлена в табл. 1.3

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика програмних середовищ
для роботи з G-кодом [15-17]

Програмне забезпечення	Редагування G-коду	Симуляція	Керування верстатом	CAD/CAM-функції
NC Viewer	Так	Так	Ні	Ні
CIMCO Edit	Так	Так	Ні	Ні
Mach3	Частково	Так	Так	Ні
LinuxCNC	Так	Так	Так	Ні
Fusion 360 Manufacture	Автоматична генерація	Так	Ні	Так

Крім розглянутих програмних продуктів, у промисловості широко застосовуються такі системи, як Mastercam, PowerMill, SolidCAM, SprutCAM та Siemens NX CAM.

Переваги та недоліки основних програмних засобів представлені в табл. 1.6

Таблиця 1.6

Переваги та недоліки основних програмних засобів

Програмний продукт	Переваги	Недоліки
NC Viewer	Простота використання, доступність	Обмежена функціональність
CIMCO Edit	Потужні засоби аналізу коду	Комерційна ліцензія
Mach3	Безпосереднє керування обладнанням	Обмежені можливості CAD/CAM
LinuxCNC	Відкритий код, гнучкість налаштувань	Складність налаштування
Fusion 360 Manufacture	Повна інтеграція CAD/CAM	Високі вимоги до апаратних ресурсів

Проведений аналіз показує, що вибір програмного забезпечення залежить від поставлених виробничих завдань та рівня складності технологічного процесу. Для цілей розроблення та дослідження керуючої програми контурної деталі найбільший інтерес становлять системи, які поєднують можливості створення G-коду, його симуляції та перевірки коректності виконання технологічних операцій. Саме використання таких програмних засобів дозволяє забезпечити високу якість підготовки керуючої програми та мінімізувати ризик виникнення помилок під час оброблення деталі на верстаті з ЧПК.

Висновки до розділу 1

Досліджено основні характеристики, класифікацію та сфери застосування верстатів з числовим програмним керуванням. Встановлено, що використання ЧПК-технологій забезпечує високий рівень автоматизації виробничих процесів, підвищення точності оброблення, стабільність якості продукції та ефективне використання виробничих ресурсів. Проведений аналіз показав, що сучасні верстати з ЧПК широко застосовуються у машинобудуванні, приладобудуванні, авіаційній, медичній та інших галузях промисловості, де необхідне виготовлення деталей складної геометричної форми з високими вимогами до точності.

Розглянуто особливості функціонування обладнання з числовим програмним керуванням, принципи побудови координатних систем, структуру керуючих програм та засоби забезпечення точності оброблення. Визначено, що ефективність роботи верстатів з ЧПК ґрунтується на взаємодії апаратних і програмних компонентів, використанні координатних систем для керування переміщенням інструмента та застосуванні систем зворотного зв'язку для контролю параметрів технологічного процесу. Встановлено, що якість розроблення керуючої програми безпосередньо впливає на точність позиціонування, продуктивність обладнання та кінцеві результати оброблення деталей.

Проведено аналіз сучасних програмних і технічних рішень, що використовуються для створення, редагування та перевірки керуючих програм верстатів з ЧПК. Дослідження показало, що застосування спеціалізованих програмних середовищ, зокрема NC Viewer, CIMCO Edit, Mach3, LinuxCNC та Fusion 360 Manufacture, дозволяє автоматизувати процес підготовки виробництва, виконувати симуляцію технологічних операцій та своєчасно виявляти помилки у програмному коді. Встановлено, що використання CAD/CAM-технологій сприяє підвищенню ефективності розроблення керуючих програм і створює необхідні передумови для якісної реалізації процесу оброблення контурної деталі.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Формування вимог до програмного продукту

Сучасні програмні засоби, призначені для підготовки, редагування та перевірки керуючих програм для обладнання з числовим програмним керуванням, повинні відповідати комплексу функціональних і експлуатаційних вимог, що забезпечують ефективність їх використання в умовах автоматизованого виробництва. Враховуючи специфіку процесів програмування верстатів з ЧПК, особливе значення мають вимоги щодо зручності взаємодії користувача із системою, підтримки стандартів програмування, можливостей перевірки коректності сформованого G-коду та забезпечення надійності роботи програмного продукту.

Формування вимог до програмного забезпечення є важливим етапом проєктування системи, оскільки саме на їх основі визначаються функціональні можливості майбутнього програмного продукту, його архітектура та механізми взаємодії з користувачем. Для досягнення поставленої мети необхідно визначити як функціональні вимоги, що описують основні можливості системи, так і нефункціональні вимоги, які характеризують якість її функціонування.

Функціональні вимоги визначають перелік операцій та можливостей, які повинна забезпечувати розроблювана система для підтримки процесу створення, аналізу та перевірки керуючих програм верстатів з числовим програмним керуванням.

Однією з ключових вимог є забезпечення роботи з керуючими програмами мовою G-код. Програмне забезпечення повинно надавати можливість створення, редагування та збереження програмних файлів, а також здійснювати перевірку правильності синтаксису команд. Наявність таких інструментів дозволяє зменшити

ймовірність виникнення програмних помилок та підвищити якість підготовки технологічного процесу [18].

Важливою функцією системи є підтримка керування параметрами оброблення. Користувач повинен мати можливість задавати координати переміщення інструмента, швидкість подачі, частоту обертання шпинделя, параметри врізання та інші технологічні характеристики, необхідні для реалізації процесу механічного оброблення. Гнучке налаштування зазначених параметрів забезпечує адаптацію керуючої програми до особливостей конкретної деталі та технологічного обладнання.

Особливе значення для сучасних систем програмування ЧПК має можливість візуалізації та симуляції процесу оброблення. Засоби комп'ютерного моделювання повинні забезпечувати відображення траєкторії руху інструмента, контроль виконання програмних команд та виявлення потенційних помилок ще до початку реального оброблення заготовки. Використання симуляції дозволяє мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій та пошкодження обладнання [19].

До функціональних вимог також належить реалізація засобів моніторингу виконання керуючої програми. Система повинна забезпечувати відображення поточного стану оброблення, координат інструмента, активних режимів роботи та інформації про виконання окремих програмних блоків. Такий підхід спрощує процес налагодження програм і підвищує ефективність контролю технологічного процесу.

Не менш важливою вимогою є можливість формування звітної інформації щодо виконання технологічних операцій. Доцільним є автоматичне визначення орієнтовної тривалості оброблення, кількості виконаних команд та інших параметрів, які можуть використовуватися для оцінювання ефективності керуючої програми.

Для забезпечення сумісності з різними програмними середовищами система повинна підтримувати імпорту та експорту файлів поширених форматів програмування ЧПК. Це дозволяє інтегрувати програмний продукт із CAD/CAM-системами та іншими засобами автоматизованої підготовки виробництва.

З урахуванням тематики кваліфікаційної роботи основними функціональними можливостями розроблюваного програмного забезпечення є створення та

редагування G-коду, візуалізація траєкторії руху інструмента, виконання симуляції процесу оброблення контурної деталі, а також виявлення та усунення можливих помилок у керуючій програмі [20].

Основні функціональні вимоги до системи представлені в табл. 2.1

Таблиця 2.1

Основні функціональні вимоги до системи

№	Функціональна вимога	Призначення
1	Створення та редагування G-коду	Формування керуючих програм
2	Перевірка синтаксису команд	Виявлення помилок програмування
3	Візуалізація траєкторії інструмента	Контроль правильності оброблення
4	Симуляція процесу оброблення	Попередня перевірка програми
5	Моніторинг виконання команд	Контроль роботи системи
6	Формування звітів	Аналіз результатів роботи
7	Імпорт та експорт файлів	Забезпечення сумісності даних

Основні функціональні можливості системи представлені схематично – рис. 2.1

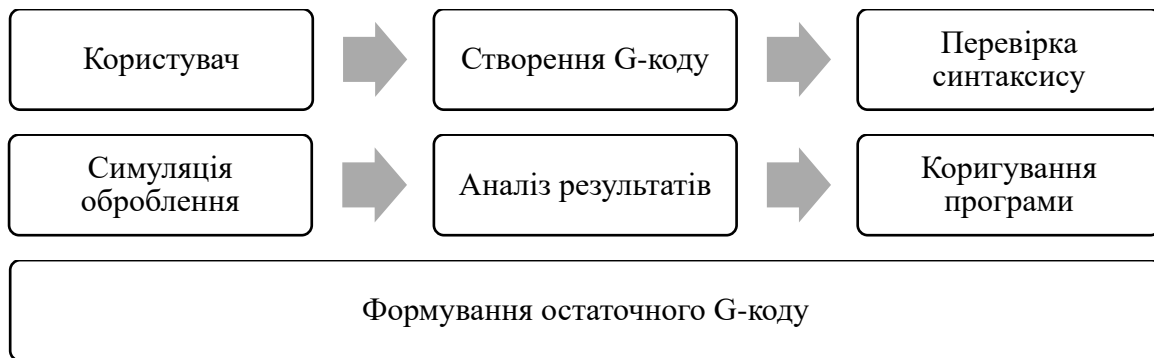


Рис. 2.1 – Основні функціональні можливості системи

Таким чином, функціональні вимоги визначають перелік основних можливостей програмного забезпечення та забезпечують реалізацію процесу створення, аналізу й перевірки керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням.

Окрім функціональних можливостей програмного забезпечення, важливе значення мають нефункціональні вимоги, які визначають якісні характеристики системи та впливають на ефективність її експлуатації. Нефункціональні вимоги регламентують продуктивність, надійність, безпеку, масштабованість, зручність використання та інші параметри, що забезпечують стабільну роботу програмного продукту в умовах реального виробничого середовища.

Однією з ключових вимог є забезпечення високої продуктивності системи. Програмне забезпечення повинно здійснювати оброблення вхідних даних та виконання користувацьких команд із мінімальними затримками. Особливо важливою дана вимога є під час роботи з обладнанням з числовим програмним керуванням, де швидкість реакції системи безпосередньо впливає на точність та безпечність виконання технологічних операцій. Час передачі команд від програмного середовища до системи керування верстатом повинен бути мінімальним та забезпечувати оперативне виконання необхідних дій [21].

Важливе місце серед нефункціональних характеристик займають вимоги щодо безпеки та збереження даних. Програмний продукт повинен забезпечувати стабільне функціонування навіть за умов виникнення окремих технічних несправностей або помилок програмного забезпечення. У випадку аварійного завершення роботи системи повинна бути передбачена можливість відновлення інформації без втрати важливих даних. Для цього доцільним є використання механізмів автоматичного резервного копіювання керуючих програм, параметрів налаштування та результатів виконання технологічних операцій.

Одним із напрямів забезпечення безпеки є використання хмарних технологій для зберігання резервних копій. Такий підхід дозволяє підвищити рівень захисту інформації та мінімізувати ризики її втрати внаслідок пошкодження апаратного забезпечення або інших позаштатних ситуацій. Крім того, система повинна містити механізми авторизації користувачів та захисту від несанкціонованого доступу до даних і функціональних можливостей програмного забезпечення.

Суттєвою нефункціональною вимогою є масштабованість системи. Програмне забезпечення повинно забезпечувати можливість розширення функціональності та підтримувати збільшення кількості підключених пристроїв без суттєвого зниження продуктивності. У перспективі система повинна дозволяти інтеграцію з додатковим обладнанням та підтримувати роботу з більшою кількістю керуючих програм і виробничих завдань [22].

Особливу увагу необхідно приділити надійності функціонування програмного продукту. Система повинна забезпечувати безперервність роботи протягом тривалого часу, мінімізувати кількість відмов та гарантувати коректне завершення виконуваних операцій. У випадку виникнення помилок програмне забезпечення повинно формувати відповідні повідомлення та забезпечувати можливість їх подальшого аналізу.

Однією з найважливіших вимог до сучасних програмних систем є зручність використання. Інтерфейс користувача повинен бути логічно структурованим, інтуїтивно зрозумілим та орієнтованим на швидке виконання типових операцій. Для забезпечення комфортної роботи операторів доцільною є підтримка багатомовного інтерфейсу, а також наявність довідкової документації та інтерактивних підказок щодо використання функціональних можливостей системи.

Не менш важливою характеристикою є забезпечення підтримки та супроводу програмного продукту. Програмне забезпечення повинно супроводжуватися технічною документацією, що містить опис архітектури системи, інструкції з налаштування та рекомендації щодо експлуатації. Крім того, важливим є забезпечення можливості оновлення програмного забезпечення без необхідності тривалого припинення виробничого процесу.

Сучасні вимоги до програмних продуктів передбачають також кросплатформність. Система повинна підтримувати функціонування на найбільш поширених операційних системах, зокрема Windows, Linux та macOS. Додатковою перевагою є реалізація веборієнтованого інтерфейсу, який забезпечує доступ до функціональних можливостей системи через мережу Інтернет без необхідності

встановлення спеціалізованого програмного забезпечення на робочі станції користувачів [23].

Основні нефункціональні вимоги до системи представлено в табл. 2.2

Таблиця 2.2

Основні нефункціональні вимоги до системи

Категорія вимог	Характеристика
Продуктивність	Висока швидкість оброблення даних та мінімальний час відгуку
Надійність	Стабільне функціонування та мінімізація відмов
Безпека	Захист інформації та контроль доступу
Масштабованість	Можливість розширення функціональності та кількості користувачів
Зручність використання	Інтуїтивний інтерфейс та багатомовна підтримка
Підтримка та супровід	Наявність документації та регулярних оновлень
Кросплатформність	Підтримка різних операційних систем та вебдоступу

Для формалізації функціональних можливостей програмного забезпечення та візуалізації взаємодії користувача із системою доцільно використовувати діаграму прецедентів (Use Case Diagram), яка є одним із основних інструментів моделювання в нотації UML [20].

Діаграма прецедентів призначена для графічного представлення функціональних можливостей системи та відображення сценаріїв взаємодії між зовнішніми користувачами і програмним забезпеченням. Основними елементами діаграми є актори та прецеденти. Актори представляють користувачів або зовнішні системи, що взаємодіють із програмним продуктом, а прецеденти відображають окремі функції або сервіси, які надаються системою.

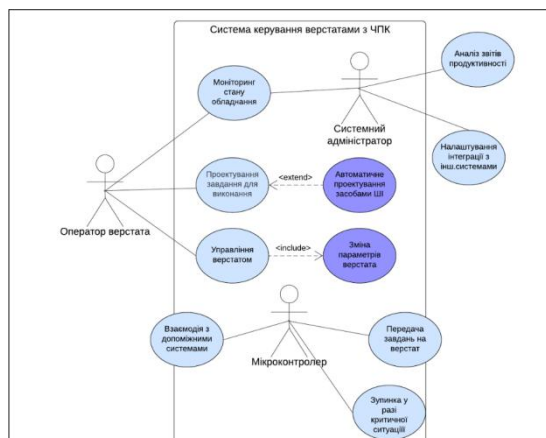


Рис. 2.2 - Діаграма прецедентів

У межах даної роботи основним актором виступає оператор верстата з ЧПК, який здійснює підготовку, перевірку та запуск керуючих програм. Взаємодія оператора із системою реалізується через набір функціональних сценаріїв, що включають створення та редагування G-коду, виконання симуляції оброблення, моніторинг виконання програми та формування звітної інформації.

Одним із основних прецедентів є «Управління верстатом». У межах даного сценарію оператор здійснює підключення обладнання до програмного середовища, завантажує або створює керуючу програму, виконує налаштування параметрів оброблення та запускає процес виконання технологічної операції. Після завершення налаштувань система передає відповідні команди до обладнання та забезпечує контроль виконання виробничого процесу.

Основний сценарій прецеденту «Управління верстатом» включає такі етапи [20]:

- Підключення верстата до системи керування.
- Завантаження або створення керуючої програми.
- Налаштування параметрів оброблення.
- Перевірка коректності сформованого G-коду.
- Виконання симуляції технологічного процесу.
- Запуск керуючої програми на виконання.
- Моніторинг стану оброблення та отримання результатів.

Застосування діаграми прецедентів дозволяє формалізувати вимоги до системи, визначити основні сценарії її використання та забезпечити більш чітке розуміння взаємодії між користувачем і програмним забезпеченням на етапі проектування.

Прецедент «Налаштування параметрів функціонування верстата»

Актор: оператор.

Основний сценарій виконання: оператор обирає необхідний верстат із переліку доступного обладнання, підключеного до системи керування. Після вибору пристрою користувач переходить до меню конфігурації, де виконує налаштування технологічних параметрів роботи обладнання, зокрема швидкості подачі, режимів

оброблення, координатних параметрів та інших експлуатаційних характеристик. Після завершення налаштування внесені зміни зберігаються та передаються до системи керування верстатом [18].

Альтернативний сценарій: у випадку відсутності необхідного обладнання у списку доступних пристроїв оператор виконує повторне підключення верстата до програмного забезпечення або ініціює перезапуск системи керування для оновлення списку підключеного обладнання.

Прецедент «Створення та підготовка технологічного завдання»**

Актор: оператор.

Основний сценарій виконання: оператор відкриває модуль підготовки технологічних завдань та створює модель майбутньої деталі за допомогою графічного інтерфейсу системи. Після завершення проєктування виконується перевірка відповідності моделі встановленим параметрам та запускається процедура симуляції руху інструмента. За результатами моделювання здійснюється аналіз траєкторії оброблення з метою виявлення можливих помилок, надлишкових переміщень або дублювання окремих операцій. У разі відсутності зауважень модель зберігається для подальшого формування керуючої програми [20].

Альтернативний сценарій 1: користувач імпортує готовий файл моделі у підтримуваному форматі. Система виконує аналіз завантажених даних та автоматично формує керуючу програму мовою G-код для подальшого використання на верстаті з ЧПК.

Альтернативний сценарій 2: якщо під час симуляції виявлено помилки у геометрії моделі або траєкторії інструмента, оператор повертається до режиму редагування, вносить необхідні зміни та повторно виконує перевірку результатів моделювання.

Прецедент «Автоматизоване проєктування із застосуванням технологій штучного інтелекту»

Актор: оператор.

Основний сценарій виконання: користувач активує модуль автоматичного проєктування та завантажує вихідні дані у вигляді графічного макета або іншого цифрового представлення майбутньої деталі. Після задання необхідних параметрів система здійснює автоматизований аналіз вхідної інформації та формує цифрову модель виробу у форматі, придатному для подальшої технологічної підготовки виробництва. Отримана модель перевіряється оператором та, за умови відповідності встановленим вимогам, зберігається для подальшого використання [21].

Альтернативний сценарій: у випадку виявлення невідповідності між сформованою моделлю та початковими вимогами оператор коригує параметри генерації та повторно запускає процес автоматичного проєктування до отримання задовільного результату.

Прецедент «Моніторинг технічного стану обладнання»

Актори: оператор, системний адміністратор.

Основний сценарій виконання: система в автоматичному режимі збирає інформацію про технічний стан обладнання, включаючи температуру вузлів, енергоспоживання, швидкість переміщення інструмента, навантаження на приводи та інші експлуатаційні параметри. Отримані дані відображаються на інформаційній панелі користувача та можуть використовуватися для контролю процесу оброблення. У разі перевищення допустимих значень або виникнення несправностей система автоматично генерує попереджувальні повідомлення [22].

Прецедент «Налаштування інтеграції із зовнішніми інформаційними системами»

Актор: системний адміністратор.

Основний сценарій виконання: адміністратор відкриває модуль інтеграції та обирає зовнішні інформаційні системи, з якими необхідно забезпечити обмін даними. Після введення параметрів підключення програмне забезпечення виконує перевірку коректності налаштувань та здійснює тестове з'єднання. У разі успішного встановлення зв'язку система формує відповідне повідомлення, після чого налаштування зберігаються та вводяться в експлуатацію [23].

Альтернативний сценарій: якщо встановлення з'єднання завершилося помилкою, система відображає інформацію про можливі причини збою. Після усунення виявлених недоліків адміністратор повторює процедуру підключення.

Прецедент «Аналіз показників продуктивності»

Актор: системний адміністратор.

Основний сценарій виконання: користувач відкриває модуль аналітики та задає часовий інтервал для формування звітної інформації. На основі накопичених даних система генерує звіт, який містить інформацію про тривалість роботи обладнання, фактичний та розрахунковий час виконання технологічних операцій, простої обладнання та відхилення від запланованих показників. Отримані результати використовуються для оцінювання ефективності виробничого процесу [20].

Прецедент «Передача керуючих команд на обладнання»

Актор: мікроконтролер.

Основний сценарій виконання: мікроконтролер приймає команди G-коду від програмного середовища, виконує їх інтерпретацію та перетворення у сигнали керування. Сформовані сигнали передаються на виконавчі механізми верстата, що забезпечує реалізацію заданих переміщень інструмента та виконання технологічних операцій [19].

Прецедент «Аварійне припинення роботи обладнання»

Актор: мікроконтролер.

Основний сценарій виконання: під час моніторингу технологічного процесу система виявляє критичне відхилення параметрів роботи обладнання або виникнення несправності. Після цього формується команда аварійної зупинки, яка негайно припиняє виконання технологічної операції. Одночасно користувачу надсилається повідомлення із зазначенням можливих причин виникнення аварійної ситуації [20].

Прецедент «Взаємодія з допоміжними підсистемами»

Актор: мікроконтролер.

Основний сценарій виконання: мікроконтролер здійснює обмін інформацією з допоміжними системами верстата, зокрема системою охолодження, вентиляції,

мастила та іншими сервісними підсистемами. Отримані дані передаються до програмного забезпечення, де відображаються на інформаційній панелі та використовуються для контролю технічного стану обладнання під час виконання технологічних операцій.

2.2 Моделювання взаємодії користувача із системою засобами UML

На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій проєктування програмних систем неможливе без застосування засобів моделювання, які дозволяють формалізувати функціональні вимоги та описати взаємодію користувачів із програмним забезпеченням ще до початку його реалізації. Одним із найбільш поширених інструментів аналізу та проєктування програмних систем є уніфікована мова моделювання UML (Unified Modeling Language), яка забезпечує стандартизований підхід до візуального представлення структури та поведінки програмного продукту.

Використання UML дозволяє описати основні функціональні можливості системи, визначити ролі користувачів, встановити взаємозв'язки між окремими компонентами та сформулювати логіку роботи програмного забезпечення. Для систем, призначених для створення, редагування, перевірки та симуляції керуючих програм верстатів з числовим програмним керуванням, UML-моделювання відіграє важливу роль, оскільки дозволяє ще на етапі проєктування виявити потенційні недоліки архітектури та оптимізувати взаємодію між користувачем і програмним середовищем.

Основною метою UML-моделювання у межах даної роботи є формалізація функціональних вимог до системи підготовки та перевірки керуючих програм G-code, а також визначення основних сценаріїв використання програмного забезпечення під час оброблення контурної деталі.

Уніфікована мова моделювання UML містить набір графічних засобів, призначених для опису різних аспектів функціонування системи. До найбільш поширених діаграм належать:

- діаграми прецедентів (Use Case Diagram);
- діаграми діяльності (Activity Diagram);
- діаграми послідовності (Sequence Diagram);
- діаграми класів (Class Diagram);
- діаграми станів (State Diagram);
- діаграми компонентів (Component Diagram).

У межах даної роботи основну увагу приділено діаграмі прецедентів, оскільки вона дозволяє найбільш наочно представити взаємодію користувачів із системою та визначити функціональні можливості програмного забезпечення.

Першим етапом UML-моделювання є визначення акторів, тобто зовнішніх об'єктів, які взаємодіють із системою. У розробленій системі можна виділити три основні категорії користувачів та технічних компонентів.

Першим актором є оператор. Саме він здійснює основну взаємодію із програмним забезпеченням, створює або редагує керуючі програми, виконує їх перевірку та запускає процес симуляції.

Другим актором виступає системний адміністратор. Його функції пов'язані з налаштуванням системи, керуванням доступом користувачів, інтеграцією із зовнішніми програмними комплексами та аналізом статистичної інформації.

Третім актором є мікроконтролер або контролер ЧПК, який виконує роль посередника між програмним забезпеченням та виконавчими механізмами верстата.

Після визначення акторів здійснюється формування прецедентів використання системи. Прецедент описує окремий сценарій взаємодії користувача з програмним забезпеченням для досягнення певного результату.

Одним із головних прецедентів є «Управління верстатом». У межах цього сценарію оператор виконує підключення обладнання, завантажує керуючу програму, перевіряє технологічні параметри та запускає процес виконання програми.

Наступним важливим прецедентом є «Редагування керуючої програми». Він передбачає відкриття файлу G-code, внесення змін до програмних блоків та збереження оновленої версії програми.

Значне місце займає прецедент «Симуляція оброблення». Під час його виконання система моделює процес руху інструмента та дозволяє оцінити правильність виконання команд без використання реального обладнання.

Даний сценарій використовується під час підготовки нової керуючої програми для виготовлення деталі. Оператор завантажує креслення або координати опорних точок, після чого формує необхідні команди G-code.

Процес складається з таких етапів:

1. Відкриття редактора програм.
2. Введення координатних даних.
3. Формування траєкторії руху інструмента.
4. Задання режимів різання.
5. Збереження програми.

Результатом виконання прецеденту є готовий файл керуючої програми.

Перед запуском на верстаті кожна програма повинна пройти процедуру перевірки. У межах даного сценарію система здійснює автоматичний аналіз синтаксису G-коду та перевіряє коректність використання команд.

Перевірка охоплює:

- правильність запису команд G та M;
- відповідність координат заданим межам;
- контроль параметрів дугової інтерполяції;
- перевірку завершення програми.

У разі виявлення помилок система формує відповідне повідомлення та пропонує оператору виконати виправлення.

Симуляція є одним із найважливіших функціональних елементів системи. Її основне призначення полягає у відтворенні процесу оброблення деталі у віртуальному середовищі.

Під час виконання симуляції система:

- зчитує керуючу програму;
- виконує інтерпретацію команд;
- будує траєкторію руху інструмента;
- контролює положення інструмента по осях X, Y та Z;
- формує модель готової деталі.

Даний підхід дозволяє мінімізувати ризики пошкодження обладнання та заготовки.

Для більш детального опису роботи системи може бути використана діаграма діяльності. Діаграма діяльності процесу симуляції представлена на рис. 2.3

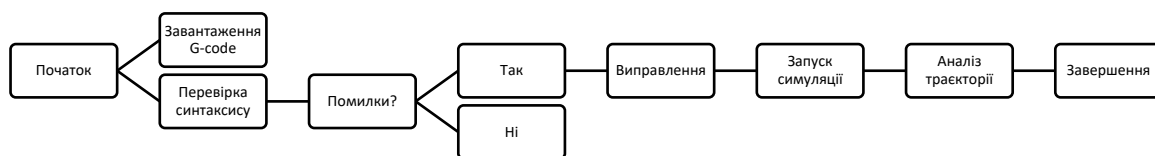


Рис. 2.3 – Діаграма діяльності процесу симуляції

Використання UML-моделювання дозволяє значно спростити процес розроблення програмного забезпечення та забезпечити формалізований опис функціональних можливостей системи. Завдяки використанню діаграм прецедентів можна чітко визначити коло користувачів системи та сценарії їхньої взаємодії з програмним продуктом.

Крім того, UML сприяє покращенню документації проєкту, спрощує взаємодію між розробниками та дозволяє виконувати модернізацію програмного забезпечення без порушення його основної архітектури. Для систем програмування та симуляції верстатів з ЧПК це особливо важливо, оскільки такі програмні продукти характеризуються великою кількістю функціональних модулів та складними алгоритмами взаємодії між користувачем і обладнанням.

Таким чином, використання засобів UML дозволило формалізувати вимоги до розроблюваної системи, визначити основні сценарії роботи користувачів та забезпечити наочне представлення логіки функціонування програмного середовища для створення, перевірки та симуляції керуючих програм мовою G-code.

2.3 Основні конструкції та принципи використання мови G-code

Ефективне функціонування обладнання з числовим програмним керуванням неможливе без використання спеціалізованих мов програмування, призначених для формування команд керування технологічним процесом. Найбільш поширеною мовою програмування верстатів з ЧПК є G-code, яка використовується для опису траєкторії руху інструмента, режимів оброблення та допоміжних операцій під час виготовлення деталей.

Мова G-code являє собою стандартизовану систему команд, що забезпечує передачу інформації від керуючої програми до системи числового програмного керування. Основним призначенням G-коду є формування алгоритму роботи верстата, відповідно до якого виконується оброблення заготовки. Кожна команда містить інформацію про координати переміщення, швидкість подачі, режими різання або інші параметри, необхідні для реалізації технологічного процесу.

Використання G-code забезпечує автоматизацію процесу виготовлення деталей та дозволяє досягти високого рівня точності виконання операцій. Завдяки цифровому представленню технологічних команд усувається залежність якості оброблення від суб'єктивних факторів, пов'язаних із діями оператора. Це особливо важливо в умовах серійного та масового виробництва, де необхідно забезпечити повторюваність результатів та стабільність параметрів готової продукції.

У системах ЧПК G-code виконує функцію проміжної ланки між конструкторською документацією та обладнанням. На основі креслень або тривимірних моделей деталей створюється керуюча програма, яка містить набір

інструкцій для переміщення інструмента та виконання необхідних технологічних операцій. Після завантаження програми до контролера ЧПК відбувається її інтерпретація та перетворення в сигнали керування приводами верстата.

Роль G-коду у керуванні технологічним процесом полягає не лише у визначенні траєкторії руху інструмента, але й у забезпеченні синхронізації роботи різних вузлів обладнання. За допомогою відповідних команд здійснюється керування шпинделем, зміна інструмента, увімкнення систем охолодження, вибір координатних систем та виконання інших допоміжних операцій.

Важливою особливістю G-code є його універсальність. Незважаючи на існування різних систем керування (Fanuc, Siemens, Haas, LinuxCNC та ін.), більшість базових команд є стандартизованими та використовуються в аналогічний спосіб на різних типах обладнання. Це забезпечує можливість перенесення керуючих програм між різними верстатами з мінімальними змінами програмного коду.

У сучасному виробництві формування G-коду може здійснюватися як вручну, так і автоматично за допомогою CAD/CAM-систем. Ручне програмування використовується переважно для нескладних деталей або навчальних цілей. Автоматизована генерація програм застосовується під час виготовлення виробів складної геометричної форми та дозволяє значно скоротити час підготовки виробництва.

Для контурної деталі, яка є об'єктом даної кваліфікаційної роботи, використання G-коду дозволяє забезпечити точне відтворення складного контуру виробу, контроль траєкторії інструмента та оптимізацію процесу механічного оброблення.

Керуюча програма для верстатів з числовим програмним керуванням являє собою впорядковану сукупність команд, записаних відповідно до встановлених правил синтаксису. Основною структурною одиницею такої програми є програмний блок.

Програмний блок являє собою окремий рядок керуючої програми, який містить одну або декілька команд, що виконуються системою керування як єдине логічне

ціле. Кожний блок може містити інформацію про координати переміщення, режими різання, швидкість подачі, параметри роботи шпинделя або допоміжні функції.

Загальна структура програмного блока має вигляд:

N10 G01 X50 Y20 Z-5 F200

де: N10 – номер блока;

G01 – команда лінійного переміщення;

X50 Y20 Z-5 – координати кінцевої точки;

F200 – швидкість подачі.

Під час виконання програми контролер ЧПК послідовно зчитує програмні блоки та виконує зазначені в них інструкції. Порядок виконання команд визначається послідовністю їх розташування у програмі.

Типова керуюча програма складається з таких структурних частин:



Рис. 2.4 – Загальна структура керуючої програми

Залежно від призначення команди, що використовуються у G-кодi, поділяються на декілька основних груп.

Службові команди використовуються для налаштування параметрів системи керування та визначення режимів програмування.

Приклади: G21 – використання метричної системи одиниць; G90 – абсолютна система координат; G91 – відносна система координат.

Координатні команди призначені для задання траєкторії руху інструмента.

Приклад: G01 X100 Y50

Дана команда задає переміщення інструмента до точки з координатами X=100 мм та Y=50 мм.

Технологічні команди використовуються для керування параметрами оброблення.

Приклади: F – швидкість подачі; S – частота обертання шпинделя; T – вибір інструмента.

Початок програми зазвичай позначається символом відсотка (%) або номером програми. Наприклад:

% O1001

Завершення програми здійснюється командою:

M30 або M02

Команда M30 завершує виконання програми та повертає систему до початкового стану.

Основою програмування верстатів з ЧПК є використання команд переміщення інструмента. Найважливішими серед них є команди швидкого позиціонування, лінійної та кругової інтерполяції.

Для швидкого переміщення інструмента використовується команда G00.

Приклад: G00 X0 Y0 Z10

Дана команда забезпечує переміщення інструмента до заданої точки з максимально можливою швидкістю без виконання різання матеріалу.

Перевагою використання G00 є скорочення допоміжного часу та підвищення продуктивності технологічного процесу.

Для виконання оброблення заготовки використовується команда лінійної інтерполяції G01.

Приклад: G01 X50 Y30 F200

У цьому випадку інструмент переміщується прямолінійною траєкторією із заданою швидкістю подачі.

Представимо коди та результати програмування – рис. 2.5

```
G21 G17 G90 F100
M03 S1000
G00 X5 Y5 ; point B
G01 X5 Y5 Z-1 ; point B
G01 X5 Y15 Z-1 ; point C
G02 X9 Y19 Z-1 I4 J0 ; point D
G01 X23 Y19 Z-1 ; point E
G01 X32 Y5 Z-1 ; point F
G01 X21 Y5 Z-1 ; point G
G01 X21 Y8 Z-1 ; point H
G03 X19 Y10 Z-1 I-2 J0 ; point I
G01 X13 Y10 Z-1 ; point J
G03 X11 Y8 Z-1 I0 J-2 ; point K
G01 X11 Y5 Z-1 ; point L
G01 X5 Y5 Z-1 ; point B
G01 X5 Y5 Z0
G28 X0 Y0
M05
M30
```

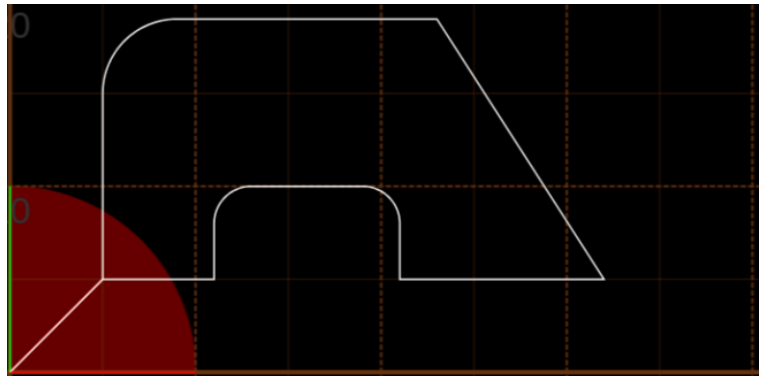


Рис. 2.5 – Приклад роботи G-код

Таким чином, команди G-code утворюють основу керування технологічним процесом на верстатах з числовим програмним керуванням. Їх правильне використання дозволяє формувати складні траєкторії руху інструмента, забезпечувати високу точність оброблення та реалізовувати технологічні операції відповідно до вимог конструкторської документації.

Висновки до розділу 2

Проведено аналіз вимог до розроблюваної системи та визначено її основні функціональні й нефункціональні характеристики. Встановлено, що програмне забезпечення повинно забезпечувати створення, редагування та перевірку керуючих програм, виконання симуляції процесу оброблення, моніторинг виконання технологічних операцій та підтримку інтеграції з іншими інформаційними системами. Також визначено вимоги щодо продуктивності, надійності, безпеки, масштабованості та зручності використання системи, що створює основу для подальшого проектування програмного рішення. Виконано моделювання взаємодії користувачів із системою за допомогою діаграми прецедентів. Визначено основних акторів системи, серед яких оператор, системний адміністратор та мікроконтролер, а також сформовано ключові сценарії використання програмного забезпечення. Проведений аналіз дозволив формалізувати основні бізнес-процеси, пов'язані зі створенням та виконанням керуючих програм, моніторингом стану обладнання, аналізом продуктивності та забезпеченням безпечної роботи верстата з ЧПК. Досліджено основні конструкції та принципи використання мови G-code як базового інструменту програмування верстатів з числовим програмним керуванням. Встановлено, що використання G-code забезпечує точне керування технологічним процесом, автоматизацію оброблення деталей та можливість реалізації складних контурів, необхідних для виготовлення контурної деталі.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКА КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ

3.1 Розроблення програмного рішення для оброблення контурної деталі

У межах даної роботи розглядається контурна деталь, контур якої складається з прямолінійних ділянок, похилої грані, зовнішнього заокруглення та внутрішнього технологічного вирізу. Така геометрія є типовою для деталей, що застосовуються у механізмах переміщення, фіксації або позиціонування виробів у складі інспекційного обладнання.

Для розроблення керуючої програми прийнято такі умовні геометричні параметри деталі – табл. 3.1

Таблиця 3.1

Вихідні геометричні параметри деталі

Параметр	Позначення	Значення, мм
Загальна довжина деталі	L	120
Загальна висота деталі	H	70
Висота основи	h1	20
Радіус зовнішнього заокруглення	R1	20
Ширина внутрішнього вирізу	b	30
Висота внутрішнього вирізу	h2	30
Радіус заокруглення внутрішнього вирізу	R2	6
Товщина заготовки	t	8

Базову систему координат прийнято у лівому нижньому куті заготовки. Початок координат позначено як точку $O(0;0)$.

Вісь X спрямована вздовж довжини деталі,

вісь Y — вздовж висоти деталі,

вісь Z — вертикально, у напрямку переміщення інструмента відносно поверхні заготовки.

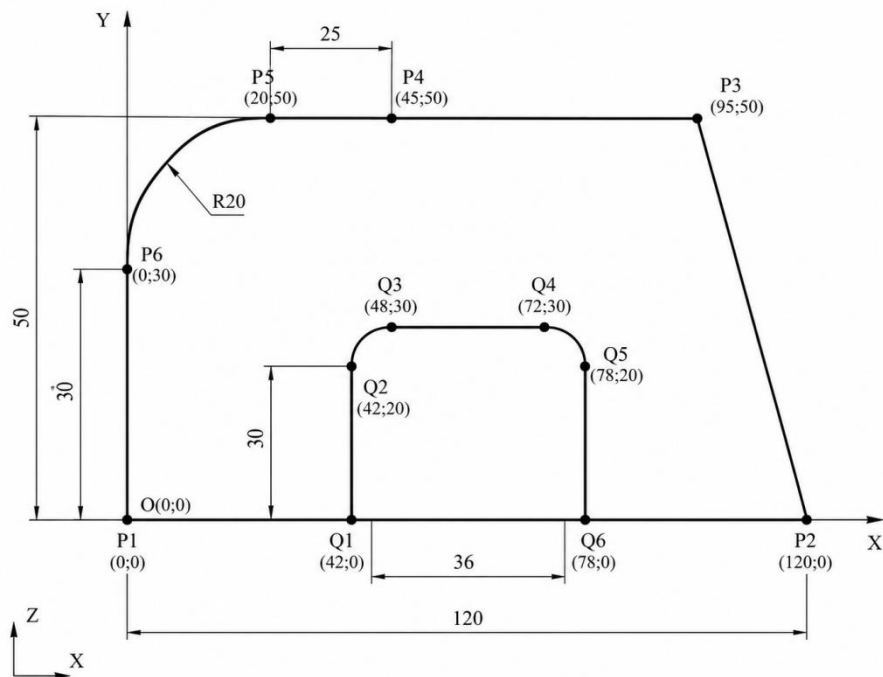


Рис. 3.1 – Розміри деталі

До характерних елементів контуру деталі належать: нижня горизонтальна база, ліва вертикальна ділянка, зовнішнє радіусне заокруглення, верхня горизонтальна ділянка, похила права грань, внутрішній паз із радіусними переходами та горизонтальні ділянки основи. Саме ці елементи визначають послідовність формування траєкторії руху інструмента у керуючій програмі. Для побудови керуючої програми необхідно визначити координати опорних точок зовнішнього та внутрішнього контуру. Умовно приймається, що оброблення виконується фрезеруванням по контуру кінцевою фрезою діаметром 6 мм. Радіус становить:

$$r = \frac{d}{2} = \frac{6}{2} = 3\text{мм}$$

У реальних умовах під час розроблення G-коду необхідно враховувати корекцію траєкторії на радіус фрези за допомогою команд G41 або G42. Координати опорних точок зовнішнього контуру представлені в табл. 3.2

Таблиця 3.2

Координати опорних точок зовнішнього контуру

Точка	X, мм	Y, мм	Опис ділянки
P1	0	0	Початок нижнього контуру
P2	120	0	Кінець нижньої основи
P3	95	50	Кінець похилої правої грані
P4	45	50	Верхня горизонтальна ділянка
P5	20	50	Початок зовнішнього заокруглення
P6	0	30	Завершення зовнішнього заокруглення
P7	0	0	Замикання зовнішнього контуру

Зовнішній контур деталі формується шляхом поєднання лінійних переміщень та дугової інтерполяції. Прямолінійні ділянки програмуються командою G01, а зовнішнє заокруглення між точками P5 і P6 — командою G03, оскільки рух виконується проти годинникової стрілки. Для внутрішнього вирізу – табл. 3.3

Таблиця 3.3

Координати опорних точок внутрішнього контуру

Точка	X, мм	Y, мм	Опис ділянки
Q1	42	0	Лівий нижній край вирізу
Q2	42	20	Ліва вертикальна стінка
Q3	48	30	Ліве верхнє заокруглення
Q4	72	30	Верхня горизонтальна ділянка
Q5	78	20	Праве верхнє заокруглення
Q6	78	0	Права вертикальна стінка

Умовна схема опорних точок деталі – рис. 3.2

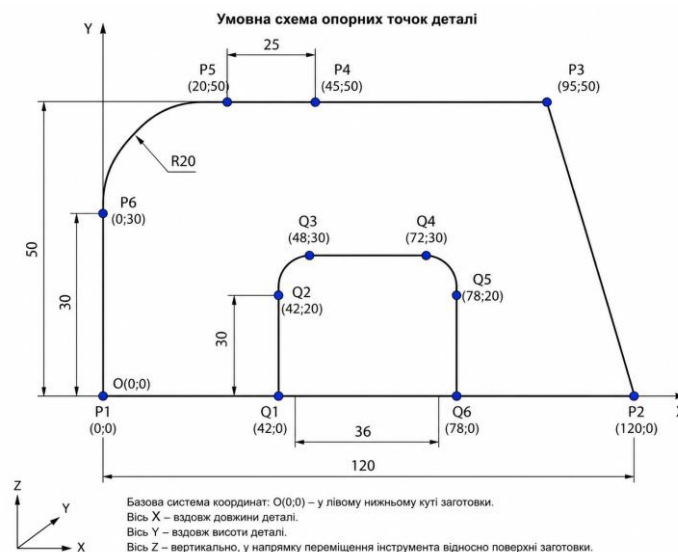


Рис. 3.2 – Умовна схема опорних точок деталі

Напрямок оброблення зовнішнього контуру приймається за годинниковою стрілкою. Такий підхід забезпечує зручність контролю траєкторії та дозволяє застосувати компенсацію радіуса інструмента з правого або лівого боку залежно від прийнятої технології. Внутрішній паз доцільно обробляти окремим контуром після завершення зовнішнього профілю.

Послідовність формування траєкторії руху інструмента має такий вигляд:

1. Підведення інструмента у безпечну точку над заготовкою.
2. Опускання інструмента на задану глибину різання.
3. Оброблення зовнішнього контуру деталі.
4. Перехід до зони внутрішнього вирізу.
5. Оброблення внутрішнього паза.
6. Відведення інструмента у безпечну площину.

Для умовного прикладу приймається, що деталь виготовляється з алюмінієвого сплаву, оскільки цей матеріал широко використовується у машинобудуванні та добре піддається фрезерній обробці. Оброблення виконується на трикоординатному фрезерному верстаті з ЧПК.

Як ріжучий інструмент обрано кінцеву циліндричну фрезу діаметром 6 мм із твердосплавного матеріалу. Такий інструмент є доцільним для формування зовнішнього контуру та внутрішнього паза невеликої ширини. Вибрані параметри інструмента представлені в табл. 3.4

Таблиця 3.4

Вибрані параметри інструмента

Параметр	Значення
Тип інструмента	Кінцева фреза
Діаметр фрези	6 мм
Радіус фрези	3 мм
Кількість зубців	2
Матеріал інструмента	Твердий сплав
Оброблюваний матеріал	Алюмінієвий сплав

Частоту обертання шпинделя визначимо за формулою:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}$$

де n – частота обертання шпинделя, об/хв;

V – швидкість різання, м/хв;

D – діаметр фрези, мм.

Для алюмінієвого сплаву умовно приймаємо швидкість різання $V = 120$ м/хв.

$$n = 120000 / 18,84 = 6369 \text{ об/хв.}$$

Отримане значення округлюємо до стандартного режиму:

$$n = 6400 \text{ об/хв.}$$

Швидкість подачі визначається за формулою:

$$F = fz * z * n$$

де F – швидкість подачі, мм/хв;

fz – подача на зуб, мм/зуб;

z – кількість зубців фрези;

n – частота обертання шпинделя, об/хв.

Приймаємо $fz = 0,03$ мм/зуб, $z = 2$, $n = 6400$ об/хв.

$$F = 0,03 * 2 * 6400 = 384 \text{ мм/хв.}$$

Для забезпечення стабільного режиму оброблення приймаємо: $F = 380$ мм/хв.

Глибина різання за один прохід приймається $ap = 2$ мм. Оскільки товщина заготовки становить 8 мм, необхідна кількість проходів:

$$k = \frac{t}{ap} = \frac{8}{2} = 4 \text{ проходи.}$$

Прийняті технологічні режими оброблення представлено в табл. 3.5

Таблиця 3.5

Прийняті технологічні режими оброблення

Параметр	Позначення	Значення
Швидкість різання	V	120 м/хв
Діаметр фрези	D	6 мм
Частота обертання шпинделя	n	6400 об/хв
Подача на зуб	fz	0,03 мм/зуб
Кількість зубців	z	2
Швидкість подачі	F	380 мм/хв
Глибина різання за прохід	ap	2 мм
Загальна товщина заготовки	t	8 мм

Таким чином, для оброблення контурної деталі обрано кінцеву фрезу діаметром 6 мм, частоту обертання шпинделя 6400 об/хв, швидкість подачі 380 мм/хв та глибину різання 2 мм за один прохід. Зазначені параметри забезпечують можливість послідовного формування зовнішнього контуру і внутрішнього вирізу деталі з урахуванням вимог до точності та якості поверхні.

Отримані геометричні та технологічні параметри є основою для подальшого формування керуючої програми мовою G-code та її перевірки засобами програмної симуляції.

3.2 Формування керуючої програми мовою G-code

Формування керуючої програми є завершальним етапом технологічної підготовки оброблення контурної деталі. На цьому етапі геометричні параметри деталі, координати опорних точок та вибрані режими різання перетворюються у послідовність команд мовою G-code, які забезпечують керування переміщенням інструмента, роботою шпинделя та виконанням технологічного циклу.

У межах прикладу прийнято, що оброблення виконується на трикоординатному фрезерному верстаті з ЧПК. Для оброблення використовується кінцева фреза діаметром 6 мм. Частота обертання шпинделя становить 6400 об/хв, швидкість подачі 380 мм/хв, глибина різання за один прохід 2 мм. Загальна товщина заготовки становить 8 мм, тому оброблення виконується за чотири проходи. Структура керуючої програми включає такі основні частини: ініціалізацію системи, встановлення одиниць вимірювання, вибір абсолютної системи координат, запуск шпинделя, підведення інструмента до початкової точки, виконання зовнішнього та внутрішнього контурів, відведення інструмента у безпечну площину та завершення програми.

Структурні елементи керуючої програми представлено в табл. 3.6

Таблиця 3.6

Структурні елементи керуючої програми

Етап програми	Призначення
Ініціалізація	Встановлення одиниць вимірювання, системи координат та площини оброблення
Підготовчі команди	Запуск шпинделя, задання подачі, підведення інструмента
Оброблення зовнішнього контуру	Формування зовнішньої геометрії деталі
Оброблення внутрішнього контуру	Формування внутрішнього технологічного вирізу
Завершення циклу	Зупинка шпинделя, відведення інструмента, завершення програми

Для реалізації лінійних ділянок траєкторії використовується команда G01. Вона забезпечує переміщення інструмента за прямолінійною траєкторією із заданою швидкістю подачі. Зовнішній контур деталі містить нижню горизонтальну ділянку, похилу праву грань, верхню горизонтальну ділянку та вертикальні переходи. Кожна з цих ділянок описується координатами кінцевої точки переміщення.

Дугові ділянки програмуються командами кругової інтерполяції G02 та G03. Команда G02 використовується для руху за годинниковою стрілкою, а команда G03 для руху проти годинникової стрілки. У даному прикладі зовнішнє заокруглення виконується командою G03, оскільки траєкторія інструмента проходить проти годинникової стрілки. Радіус дуги задається параметром R або через координати центра дуги I та J.

Нижче наведено приклад керуючої програми для геометрії деталі. Координати задані відповідно до опорних точок, визначених у попередньому підрозділі.

```
%
O1001 (OBROBLENNIA DETALI ZIRKA INSPEKTSIINOI MASHYNY)
G21 (METRYCHNA SYSTEMA, MM)
G90 (ABSOLIUTNE PROGRAMUVANNIA)
G17 (PLOSHCHYNA OBROBLENNIA XY)
G40 (SKASUVANNIA KOREKTSII RADIUSA INSTRUMENTA)
G49 (SKASUVANNIA KOREKTSII DOVZHYNKY INSTRUMENTA)
G54 (ROBOCHA SYSTEMA KOORDYNAT)

T1 M06 (VYBIR INSTRUMENTA - KINTSEVA FREZA D6)
S6400 M03 (ZAPUSK SHPYNDELIA ZA HODYNNYKOVOIU STRILKOIU)
G00 Z10 (PIDNIATTIA INSTRUMENTA U BEZPECHNU PLOSHCHYNU)

(OBROBLENNIA ZOVNISHNOHO KONTURU, 1 PROKHID)
```

G00 X0 Y0
G01 Z-2 F120
G01 X120 Y0 F380
G01 X95 Y50
G01 X45 Y50
G03 X0 Y30 R20
G01 X0 Y0
G00 Z10

(OBROBLENNIA ZOVNISHNOHO KONTURU, 2 PROKHID)

G00 X0 Y0
G01 Z-4 F120
G01 X120 Y0 F380
G01 X95 Y50
G01 X45 Y50
G03 X0 Y30 R20
G01 X0 Y0
G00 Z10

(OBROBLENNIA ZOVNISHNOHO KONTURU, 3 PROKHID)

G00 X0 Y0
G01 Z-6 F120
G01 X120 Y0 F380
G01 X95 Y50
G01 X45 Y50
G03 X0 Y30 R20
G01 X0 Y0
G00 Z10

(OBROBLENNIA ZOVNISHNOHO KONTURU, 4 PROKHID)

G00 X0 Y0
G01 Z-8 F120
G01 X120 Y0 F380
G01 X95 Y50
G01 X45 Y50
G03 X0 Y30 R20
G01 X0 Y0
G00 Z10

(OBROBLENNIA VNUTRISHNOHO VYRIZU)

G00 X42 Y0
G01 Z-2 F120
G01 X42 Y20 F380
G03 X48 Y30 R6
G01 X72 Y30
G03 X78 Y20 R6
G01 X78 Y0
G00 Z10

G00 X42 Y0
G01 Z-4 F120
G01 X42 Y20 F380
G03 X48 Y30 R6
G01 X72 Y30
G03 X78 Y20 R6
G01 X78 Y0
G00 Z10

G00 X42 Y0
G01 Z-6 F120

```

G01 X42 Y20 F380
G03 X48 Y30 R6
G01 X72 Y30
G03 X78 Y20 R6
G01 X78 Y0
G00 Z10

G00 X42 Y0
G01 Z-8 F120
G01 X42 Y20 F380
G03 X48 Y30 R6
G01 X72 Y30
G03 X78 Y20 R6
G01 X78 Y0
G00 Z10

M05 (ZUPYNKA SHPYNDELIA)
G00 X0 Y0 (POVERNENNIA U POCHATKOVU TOCHKU)
M30 (ZAVERSHENNIA PROGRAMY)
%
```

Структура G-коду керуючої програми

Керуюча програма

Підготовчі команди (G) |— G17 | |— G21 | |— G90 | |— G54 |
 Команди руху |— G00 | |— G01 | |— G02 | |— G03 |
 Технологічні параметри |— S6400 | |— F380 | |— Z-8 |
 Команди інструмента |— T1 | |— M06 |
 Завершальні команди |— M05 |— M30

У наведеній програмі команди G00 застосовуються для швидкого переміщення інструмента без різання, зокрема під час підведення до початкових точок та відведення у безпечну площину. Команди G01 реалізують прямолінійні ділянки траєкторії зовнішнього та внутрішнього контурів. Команди G03 використовуються для формування радіусних переходів, що відповідають заокругленим ділянкам геометрії деталі.

Завершення технологічного циклу здійснюється за допомогою команд M05 та M30. Команда M05 зупиняє обертання шпинделя, а команда M30 завершує виконання програми та повертає систему керування до початкового стану. Перед завершенням

програми інструмент відводиться у безпечну площину Z10, що запобігає можливому контакту з поверхнею деталі або елементами кріплення.

Таким чином, сформована керуюча програма забезпечує послідовне оброблення зовнішнього та внутрішнього контурів деталі типу. Використання команд лінійної та кругової інтерполяції дозволяє реалізувати геометрію деталі відповідно до заданих координат, а поділ процесу на декілька проходів за глибиною забезпечує зниження навантаження на інструмент і підвищення стабільності технологічного процесу.

Схема оброблення зовнішнього контуру представлена на рис. 3.3

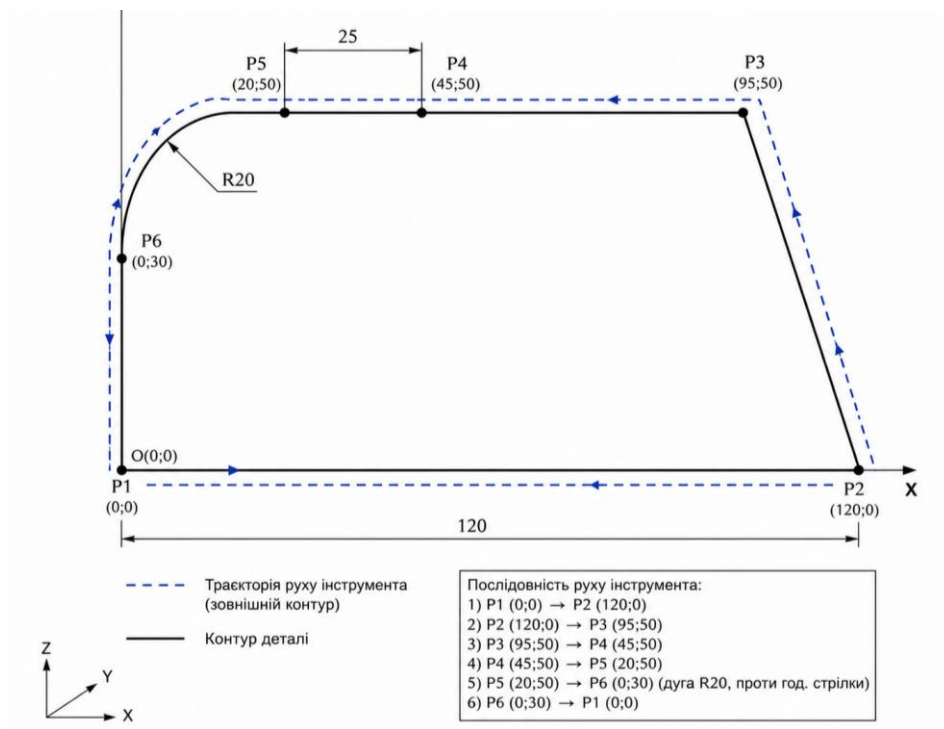


Рис. 3.3 - Схема оброблення зовнішнього контуру

Траекторія: $P1 \rightarrow P2 \rightarrow P3 \rightarrow P4 \rightarrow P5 \rightarrow P6 \rightarrow P1$

де: $P1(0;0);$

$P4(45;50);$

$P2(120;0);$

$P5(20;50);$

$P3(95;50);$

$P6(0;30).$

Алгоритм формування керуючої програми представлений на рис. 3.4



Рис. 3.4 - Алгоритм формування керуючої програми

Проведене моделювання дозволило проаналізувати траєкторію руху інструмента, оцінити коректність виконання команд G-code та перевірити відповідність сформованої траєкторії геометричним параметрам деталі. За результатами симуляції підтверджено правильність побудови зовнішнього та внутрішнього контурів, а також відсутність критичних помилок у логіці роботи керуючої програми. У процесі тестування виконано аналіз можливих програмних помилок, пов'язаних із координатними переміщеннями, формуванням дугових ділянок та переходами між окремими технологічними операціями. Проведена перевірка дозволила своєчасно виявити потенційні неточності та здійснити коригування програмного коду до початку реального оброблення деталі. Використання засобів симуляції забезпечило підвищення надійності керуючої програми та зменшення ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації обладнання.

3.3 Демонстрація функціональних можливостей створеного застосунку

Після завершення розроблення керуючої програми мовою G-code наступним етапом є її перевірка та підготовка до виконання у спеціалізованому програмному середовищі. Для цього використовується програмний редактор G-коду, який забезпечує можливість відкриття, редагування, аналізу та налагодження керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням.

Процес роботи із керуючою програмою розпочинається із завантаження файлу у програмне середовище. Файл містить набір команд G-code, що визначають координати переміщення інструмента, режими різання, параметри роботи шпинделя та допоміжні технологічні операції. Після відкриття програми оператор отримує доступ до її структури та може виконувати перегляд окремих блоків команд. Вікно редагування керуючої програми G-code представлено на рис. 3.5

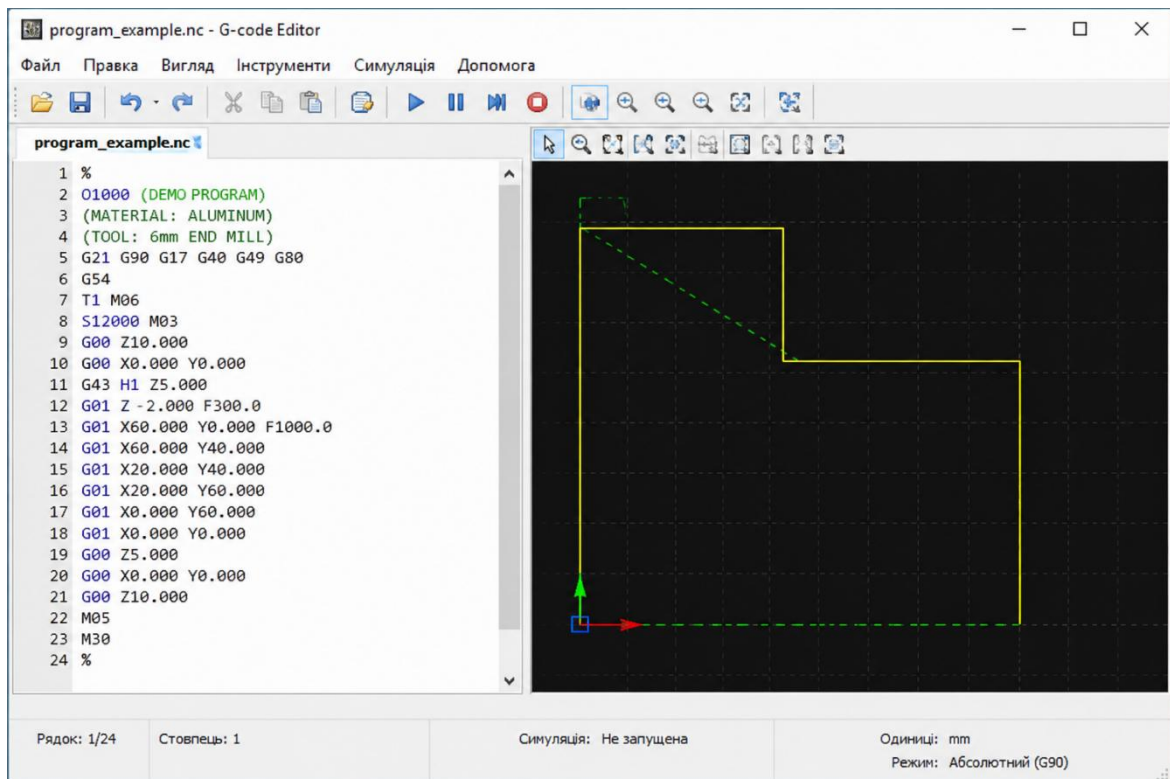


Рис. 3.5 – Вікно редагування керуючої програми G-code

Під час редагування програми користувач має можливість змінювати координати переміщення інструмента, швидкість подачі, параметри обертання шпинделя та інші технологічні характеристики. Необхідність коригування коду може виникати у випадках зміни геометричних параметрів деталі, використання іншого інструмента або оптимізації технологічного процесу.

Особливу увагу приділено автоматичній перевірці синтаксису керуючої програми. Система здійснює аналіз кожного програмного блока та контролює правильність використання команд G-коду. У разі виявлення помилок програма формує відповідні повідомлення та вказує місце їх виникнення.

Основні види синтаксичних помилок представлені в табл. 3.8

Таблиця 3.8

Основні види синтаксичних помилок

Тип помилки	Причина виникнення
Невідома команда	Використання некоректного G-коду
Відсутність координат	Неповне визначення точки переміщення
Помилка параметра R	Невірне задання радіуса дуги
Відсутність завершальної команди	Відсутність M30 або M02
Конфлікт режимів	Однчасне використання несумісних команд

Після завершення перевірки всі внесені зміни зберігаються у файлі керуючої програми та можуть бути використані для подальшого моделювання або запуску на обладнанні.

Одним із найважливіших етапів перевірки керуючої програми є візуалізація траєкторії руху інструмента. Дана функція дозволяє графічно відобразити послідовність виконання команд G-code та оцінити правильність формування геометрії деталі ще до початку реального процесу оброблення.

Після завантаження програми система автоматично будує траєкторію руху інструмента на основі координатних команд. Графічне представлення дозволяє оператору контролювати напрямок переміщення інструмента та перевіряти відповідність отриманої форми кресленню деталі.

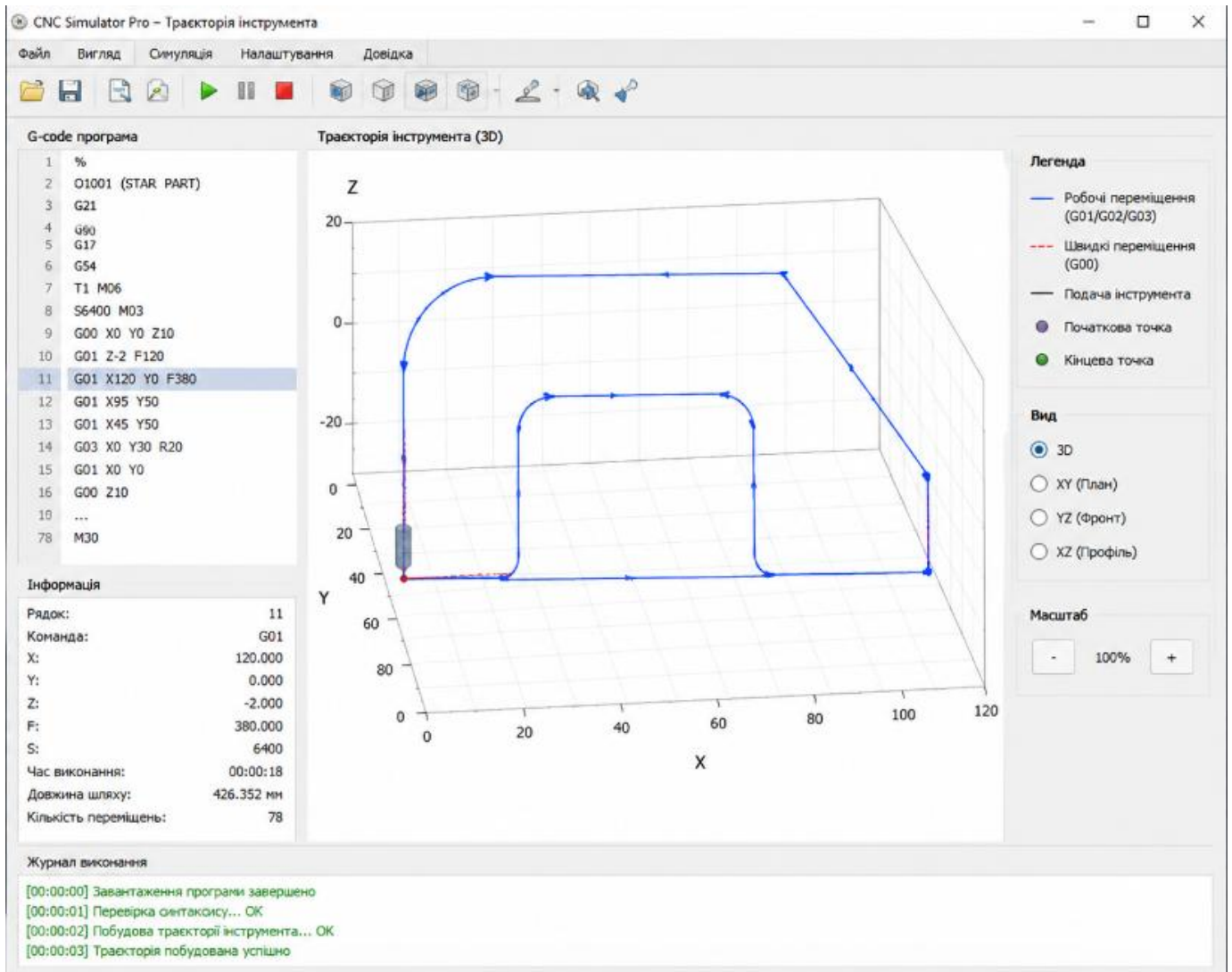


Рис. 3.6 – Візуалізація траєкторії руху інструмента

На першому етапі аналізу здійснюється перевірка зовнішнього контуру деталі. Візуалізація показує послідовність проходження інструментом усіх характерних точок зовнішнього профілю. При цьому контролюється правильність побудови прямих ділянок та радіусних переходів.

Результат симуляції оброблення зовнішнього контуру деталі представлені на рис. 3.7

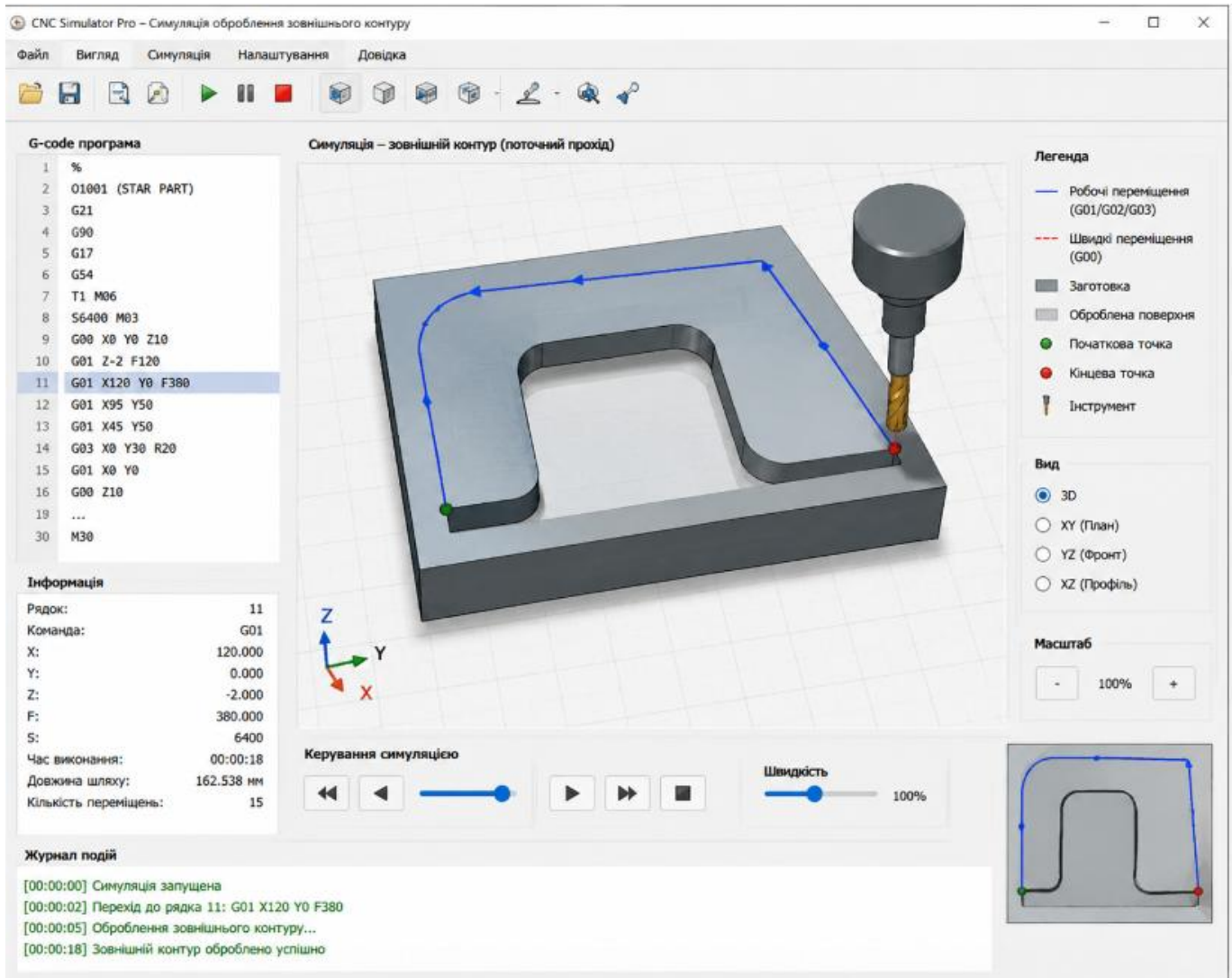


Рис. 3.7 – Результат симуляції оброблення зовнішнього контуру деталі

Після завершення аналізу зовнішнього профілю виконується перевірка внутрішнього контуру. Внутрішній паз повинен відповідати заданим розмірам та забезпечувати коректне формування радіусних переходів.

Результат симуляції оброблення внутрішнього вирізу представлено на рис. 3.8

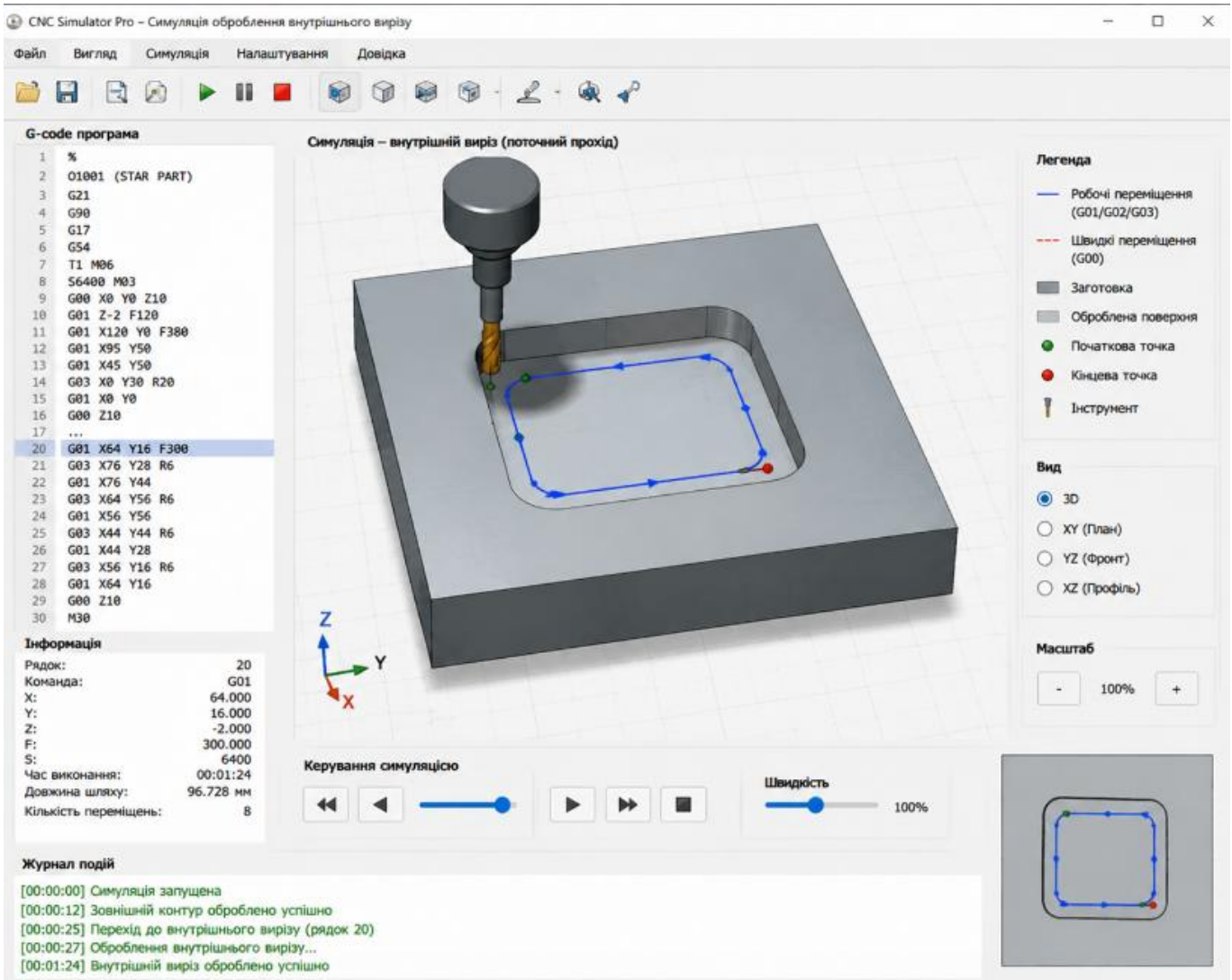


Рис. 3.8 – Результат симуляції оброблення внутрішнього вирізу

Важливою перевагою візуалізації є можливість виявлення надлишкових переміщень інструмента, дублювання окремих ділянок траєкторії та неефективних переходів між зонами оброблення.

Після завершення візуальної перевірки траєкторії виконується повноцінна симуляція процесу оброблення. Режим моделювання дозволяє відтворити роботу верстата з ЧПК у віртуальному середовищі та оцінити коректність виконання всіх команд керуючої програми.

Під час запуску симуляції програмне забезпечення послідовно виконує інтерпретацію команд G-code та відображає рух інструмента у просторі. Користувач

має можливість спостерігати за процесом оброблення в реальному часі або покроково аналізувати виконання кожного програмного блока.

Основними параметрами контролю під час симуляції є координати переміщення по осях X, Y та Z. Для кожного етапу оброблення перевіряється відповідність фактичного положення інструмента координатам, заданим у програмі.

Контрольовані параметри під час симуляції представлені в табл. 3.9

Таблиця 3.9

Контрольовані параметри під час симуляції

Параметр	Призначення
Координата X	Контроль поздовжнього переміщення
Координата Y	Контроль поперечного переміщення
Координата Z	Контроль глибини різання
Швидкість подачі	Контроль режимів оброблення
Частота обертання шпинделя	Контроль режимів різання
Траєкторія інструмента	Аналіз геометрії контуру

У процесі симуляції було підтверджено правильність формування зовнішнього профілю деталі та внутрішнього вирізу відповідно до геометричних параметрів, прийнятих під час розроблення керуючої програми.

Одним із ключових завдань симуляції є виявлення помилок, які можуть призвести до браку продукції або аварійних ситуацій під час роботи обладнання.

На першому етапі здійснюється перевірка синтаксичної правильності команд. Після цього виконується аналіз координатних переходів між окремими точками траєкторії. Особлива увага приділяється перевірці дугових ділянок, оскільки саме під час програмування кругової інтерполяції найчастіше виникають помилки.

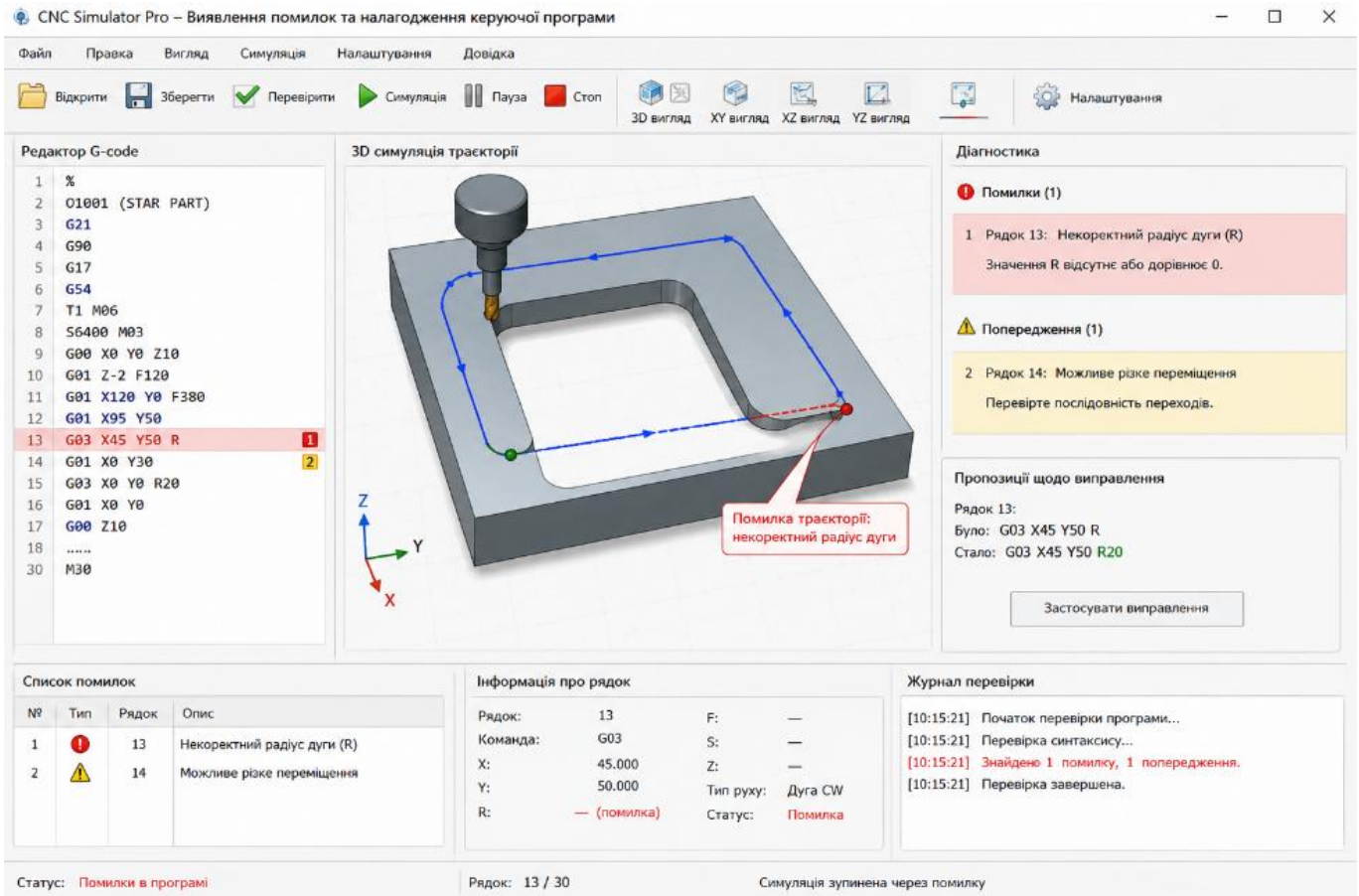


Рис. 3.9 – Виявлення помилок та налагодження керуючої програми

У процесі тестування було виявлено декілька незначних відхилень, пов'язаних із початковими координатами підведення інструмента та надлишковими холостими переміщеннями. Після внесення відповідних коригувань програма була повторно перевірена у режимі симуляції.

Виконане налагодження дозволило забезпечити коректне проходження інструментом усіх ділянок контуру без виникнення помилок позиціонування або перетину траєкторій.

Після завершення моделювання здійснюється оцінювання результатів роботи керуючої програми. Основним критерієм є відповідність сформованого контуру геометричним параметрам деталі.

Порівняння результатів симуляції із кресленням показало повну відповідність зовнішнього та внутрішнього контурів прийнятим геометричним розмірам. Усі координатні точки були досягнуті без перевищення допустимих відхилень.

Додатково було виконано перевірку відсутності колізій між інструментом та заготовкою. Аналіз показав, що всі переміщення здійснюються у межах робочої області без ризику пошкодження обладнання.

Також перевірено наявність холостих переміщень. Після оптимізації керуючої програми кількість непродуктивних переходів була мінімізована, що позитивно вплинуло на загальний час виконання операції.

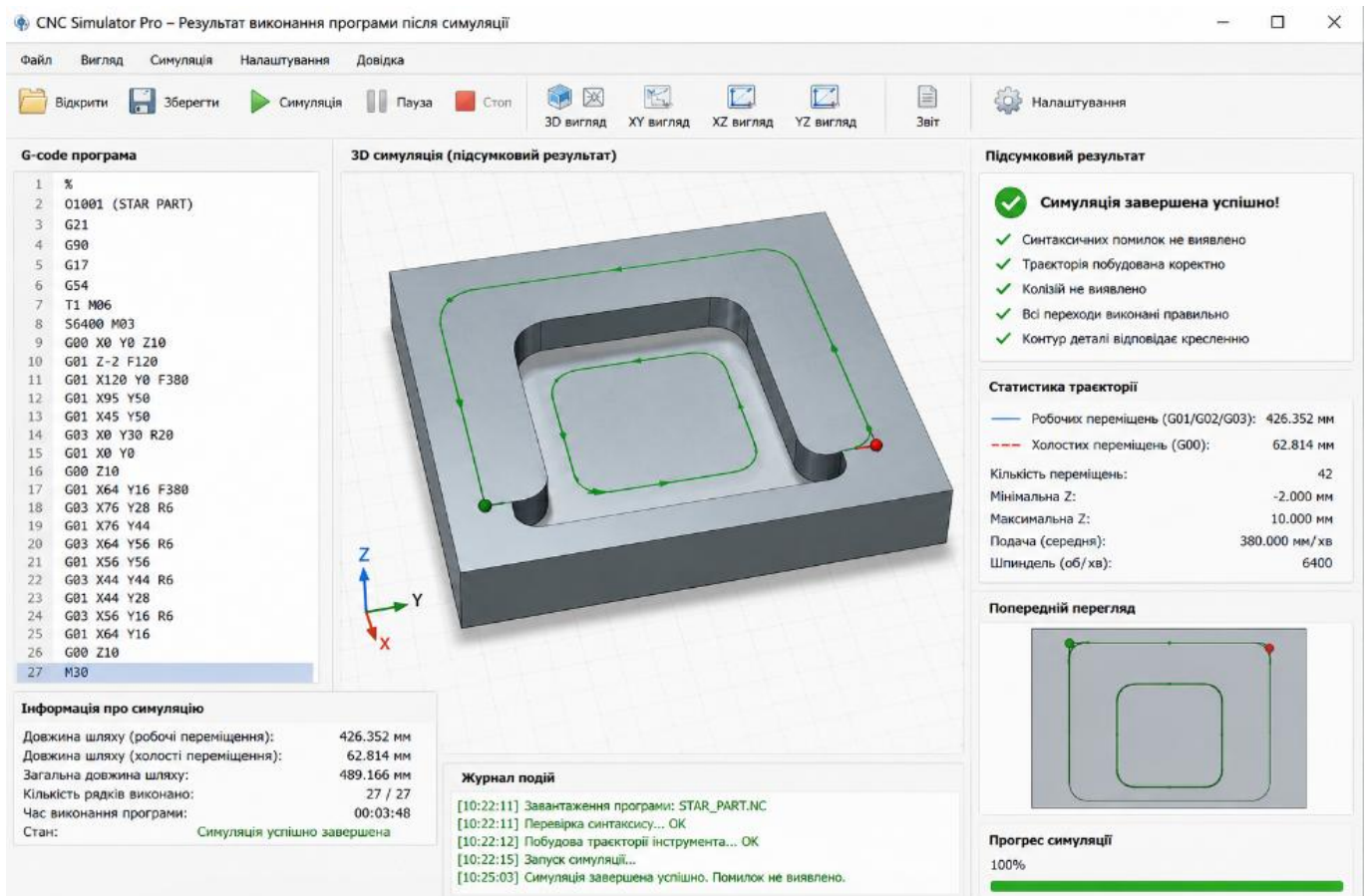


Рис. 3.10 – Загальний результат виконання керуючої програми після симуляції

За результатами моделювання підтверджено працездатність розробленої керуючої програми та можливість її використання для реального оброблення деталі на верстаті з ЧПК.

Заключним етапом дослідження є оцінювання ефективності створеної керуючої програми. Для цього аналізуються основні технологічні показники, що характеризують якість програмного рішення.

Одним із таких показників є довжина траєкторії руху інструмента. За результатами моделювання встановлено, що сумарна довжина робочих переміщень становить приблизно 420 мм, а довжина допоміжних переміщень після оптимізації не перевищує 70 мм.

Основні показники ефективності програми представлені в табл. 3.10

Таблиця 3.10

Основні показники ефективності програми

Показник	Значення
Кількість рядків G-коду	78
Кількість робочих проходів	4
Довжина робочої траєкторії	420 мм
Довжина холостих переміщень	70 мм
Частота обертання шпинделя	6400 об/хв
Швидкість подачі	380 мм/хв
Орієнтовний час оброблення	3,8 хв

Виконані розрахунки показали, що сформована керуюча програма забезпечує ефективне використання обладнання та дозволяє виконувати оброблення деталі за мінімально необхідний час без втрати точності.

Перспективним напрямом подальшого вдосконалення є автоматизація оптимізації траєкторії інструмента, використання адаптивних режимів різання та інтеграція засобів штучного інтелекту для автоматичного формування та коригування G-коду. Застосування зазначених підходів дозволить підвищити продуктивність виробництва та зменшити тривалість підготовки керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням.

Висновки до розділу 3

У підрозділі 3.1 виконано розроблення керуючої програми для оброблення деталі типу «контурна деталь» на верстаті з числовим програмним керуванням. Проведено аналіз геометричних параметрів деталі, визначено координати опорних точок зовнішнього та внутрішнього контурів, розраховано траєкторію руху інструмента та обґрунтовано вибір технологічних режимів оброблення. На основі отриманих розрахунків сформовано керуючу програму мовою G-code, яка містить команди лінійної та кругової інтерполяції, забезпечуючи реалізацію необхідної геометрії виробу відповідно до заданих параметрів.

У підрозділі 3.2 здійснено демонстрацію функціональних можливостей програмного середовища для роботи з керуючими програмами ЧПК. Розглянуто процес завантаження та редагування файлів G-code, виконано візуалізацію траєкторії руху інструмента та проведено комп'ютерне моделювання процесу оброблення деталі. У результаті симуляції підтверджено правильність формування зовнішнього та внутрішнього контурів виробу, а також встановлено відповідність отриманої траєкторії вимогам креслення та технологічного процесу.

У підрозділі 3.3 проведено аналіз результатів моделювання та оцінювання ефективності розробленої керуючої програми. Виконано перевірку відсутності синтаксичних помилок, колізій інструмента та надлишкових переміщень, а також здійснено коригування окремих елементів програмного коду. За результатами дослідження підтверджено працездатність розробленої програми, забезпечення необхідної точності оброблення та можливість її практичного використання для виготовлення деталі на верстаті з ЧПК. Отримані результати свідчать про ефективність застосування засобів симуляції на етапі підготовки виробництва та доцільність використання G-code для автоматизованого керування технологічними процесами.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці

Забезпечення безпечних та нешкідливих умов праці є одним із пріоритетних напрямів державної політики України у сфері охорони праці. В умовах широкого впровадження автоматизованих виробничих систем, роботизованих комплексів та обладнання з числовим програмним керуванням особливого значення набуває створення ефективної системи управління охороною праці, яка забезпечує збереження життя, здоров'я та працездатності працівників під час виконання виробничих завдань. Організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці визначають сукупність законодавчих, нормативно-правових, організаційних та технічних заходів, спрямованих на запобігання виробничому травматизму, професійним захворюванням та аварійним ситуаціям.

Основним нормативно-правовим актом, який регулює відносини у сфері охорони праці в Україні, є Закон України «Про охорону праці». Відповідно до цього закону охорона праці визначається як система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності. Закон встановлює основні права та обов'язки роботодавців і працівників, визначає порядок організації охорони праці на підприємствах та регламентує державний нагляд за дотриманням вимог безпеки праці.

Важливу роль у формуванні правових засад безпеки праці відіграє Конституція України, відповідно до статті 43 якої кожен громадянин має право на належні, безпечні та здорові умови праці. Держава гарантує працівникам реалізацію цього

права шляхом створення системи нормативно-правового регулювання, контролю та відповідальності за порушення вимог охорони праці.

Крім Закону України «Про охорону праці», питання безпеки праці регулюються Кодексом законів про працю України, який визначає обов'язки роботодавця щодо створення безпечних умов праці, проведення інструктажів, навчання працівників та забезпечення їх необхідними засобами індивідуального захисту. Особливе значення мають положення КЗпП щодо режимів праці та відпочинку, умов праці неповнолітніх, жінок та працівників, зайнятих на роботах із шкідливими чи небезпечними умовами праці.

Питання забезпечення безпеки працівників у надзвичайних ситуаціях регламентуються Кодексом цивільного захисту України. Даний нормативний акт визначає порядок організації цивільного захисту населення та територій, функціонування системи оповіщення, евакуації працівників, використання захисних споруд та дій персоналу під час виникнення надзвичайних ситуацій техногенного, природного або воєнного характеру.

В умовах використання верстатів з числовим програмним керуванням важливе значення мають нормативні документи, які регламентують безпечну експлуатацію електрообладнання. До них належать Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів та Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Зазначені документи встановлюють вимоги щодо організації безпечної роботи з електрообладнанням, проведення технічного обслуговування, контролю стану електричних мереж та забезпечення електробезпеки працівників.

На кожному підприємстві повинна функціонувати система управління охороною праці (СУОП), яка являє собою комплекс взаємопов'язаних організаційних заходів, спрямованих на реалізацію державної політики у сфері безпеки праці. Основною метою СУОП є створення умов, за яких ризик виникнення виробничих травм і професійних захворювань буде зведений до мінімально можливого рівня.

Основними елементами системи управління охороною праці є:

- формування політики у сфері охорони праці;

- планування заходів з охорони праці;
- організація виконання вимог безпеки;
- контроль стану умов праці;
- оцінювання професійних ризиків;
- проведення навчання та інструктажів;
- аналіз результативності заходів з охорони праці.

Відповідальність за створення безпечних умов праці покладається на роботодавця. Саме роботодавець зобов'язаний забезпечити функціонування системи управління охороною праці, організувати проведення навчання працівників, забезпечити їх засобами індивідуального та колективного захисту, а також здійснювати контроль за дотриманням вимог нормативно-правових актів.

Одним із ключових напрямів організації безпечної праці є проведення навчання та перевірки знань з питань охорони праці. Відповідно до чинного законодавства усі працівники під час прийняття на роботу та в процесі трудової діяльності повинні проходити навчання, інструктажі та перевірку знань з питань охорони праці. Метою такого навчання є формування у працівників необхідних знань щодо безпечних методів виконання робіт, правил користування обладнанням та дій у разі виникнення аварійних ситуацій.

На підприємствах застосовуються такі види інструктажів:

- вступний;
- первинний на робочому місці;
- повторний;
- позаплановий;
- цільовий.

Особливого значення набуває первинний інструктаж для операторів верстатів з ЧПК та розробників керуючих програм, оскільки їх діяльність пов'язана з використанням складного автоматизованого обладнання та програмно-технічних комплексів.

Важливим складником системи охорони праці є оцінювання професійних ризиків. Згідно із сучасними підходами до управління безпекою праці роботодавець повинен ідентифікувати потенційні небезпеки, оцінювати рівень ризику та впроваджувати заходи щодо його зниження. Для операторів і програмістів верстатів з ЧПК основними ризиками є ураження електричним струмом, травмування рухомими частинами обладнання, вплив шуму та вібрації, зорове перенапруження та нервово-емоційні навантаження.

Окрему увагу законодавство приділяє забезпеченню працівників засобами індивідуального захисту. Роботодавець зобов'язаний безоплатно надавати працівникам спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби захисту відповідно до характеру виконуваних робіт. Під час роботи на верстатах з ЧПК можуть використовуватися захисні окуляри, захисні рукавички, засоби захисту органів слуху та спеціальний робочий одяг.

У сучасних умовах воєнного стану суттєво зростає роль цивільного захисту та підготовки персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях. Відповідно до Кодексу цивільного захисту України роботодавець повинен організовувати оповіщення працівників, забезпечувати наявність планів евакуації, проводити навчання персоналу діям під час повітряної тривоги, пожежі або інших надзвичайних подій. Для підприємств, що використовують високотехнологічне обладнання, додаткового значення набуває захист інформаційних ресурсів, резервне копіювання даних та забезпечення безперебійного функціонування критично важливих виробничих систем.

Таким чином, організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці базуються на комплексі законодавчих та нормативно-правових актів України, які регламентують права та обов'язки учасників трудового процесу, порядок організації системи управління охороною праці, вимоги до безпечної експлуатації обладнання та захисту працівників у надзвичайних ситуаціях. Дотримання вимог чинного законодавства є необхідною умовою створення безпечного виробничого середовища,

зниження рівня професійних ризиків та забезпечення ефективної роботи сучасних автоматизованих виробничих систем.

4.2 Характеристика об'єкта та виявлення потенційних небезпек

У сучасних умовах цифровізації виробничих процесів значна частина робіт, пов'язаних із підготовкою керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), виконується із застосуванням комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення. Розробник керуючих програм здійснює проектування траєкторій руху інструмента, формування G-коду, моделювання процесу оброблення та тестування створених програм у середовищах симуляції. Оператор верстата з ЧПК виконує завантаження програм до системи керування, налаштування технологічних параметрів, контроль процесу оброблення та моніторинг технічного стану обладнання.

З огляду на специфіку виконуваних функцій умови праці таких працівників характеризуються одночасним впливом виробничих факторів інформаційного та технічного середовища. Основна частина робочого часу розробника керуючих програм проходить за персональним комп'ютером, тоді як оператор ЧПК додатково перебуває в зоні функціонування технологічного обладнання.

Аналіз умов праці необхідний для виявлення потенційно небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та розроблення заходів щодо мінімізації їх негативного впливу на здоров'я працівників.

На рисунку 4.1 наведено основні етапи діяльності оператора та розробника керуючих програм для верстатів з ЧПК.

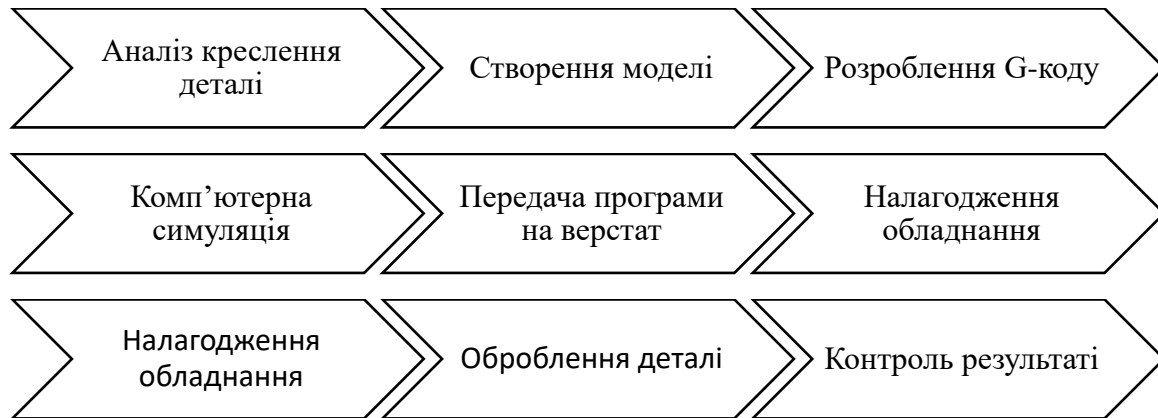


Рис. 4.1 – Основні етапи роботи розробника та оператора верстата з ЧПК

Особливістю роботи розробника програм ЧПК є тривале перебування у сидячому положенні. Практика показує, що тривалість роботи за монітором може становити від 6 до 8 годин протягом робочої зміни. За таких умов суттєво зростає навантаження на органи зору, шийний відділ хребта, плечовий пояс та поперекову ділянку.

Крім фізичного навантаження, значну роль відіграє нервово-емоційне напруження, пов'язане з високою відповідальністю за правильність створення керуючої програми.

Помилки у G-кодi можуть призвести до пошкодження інструмента, заготовки або самого верстата, що обумовлює необхідність постійної концентрації уваги під час роботи.

Для оператора верстата з ЧПК додатковими факторами ризику виступають шум, вібрація, можливість контакту з рухомими елементами обладнання, утворення металевої стружки та пилю, а також вплив електричного струму під час експлуатації обладнання.

Класифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів наведена у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори на робочому місці оператора та розробника програм ЧПК

Фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки
Напруження зору	Монітор ПК	Втома очей, погіршення зору
Статичне навантаження	Тривале сидіння	Захворювання опорно-рухового апарату
Нервово-емоційне навантаження	Контроль програмування	Стрес, перевтома
Шум	Робота верстата	Погіршення слуху, втома
Вібрація	Робота приводів	Порушення роботи нервової системи
Електричний струм	Електрообладнання	Травмування працівника
Металева стружка	Процес різання	Травми очей та шкіри
Недостатнє освітлення	Робоче приміщення	Зниження працездатності

Джерело: [24]

Для визначення безпечності умов праці необхідно провести оцінювання параметрів виробничого середовища. Насамперед важливе значення має мікроклімат робочого приміщення.

Згідно з чинними санітарними нормами температура повітря у приміщеннях, де виконуються роботи категорії 1а (робота за комп'ютером), повинна становити 22-24 °С у холодний період року та 23-25 °С у теплий період року. Відносна вологість повітря повинна підтримуватися в межах 40-60 %, а швидкість руху повітря не перевищувати 0,1-0,2 м/с.

Основні нормативні параметри мікроклімату наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Нормативні параметри мікроклімату робочої зони

Параметр	Нормативне значення
Температура повітря	22–24 °С
Відносна вологість	40–60 %
Швидкість руху повітря	до 0,2 м/с
Атмосферний тиск	84–107 кПа

Джерело: [24]

Важливим чинником забезпечення безпечних умов праці є якісне освітлення робочого місця. Робота із системами автоматизованого проєктування та редакторами G-коду вимагає тривалої концентрації уваги на елементах інтерфейсу, тому недостатній рівень освітленості призводить до швидкої втоми працівника.

Освітлення робочих місць повинно бути комбінованим і включати природне та штучне освітлення. Для робіт високої точності рекомендована освітленість становить 300–500 лк.

Значний вплив на стан працівника має ергономічність робочого місця. Робочий стіл повинен забезпечувати достатній простір для розміщення монітора, клавіатури, технічної документації та допоміжних пристроїв. Висота робочої поверхні повинна знаходитися в межах 680–800 мм.

Відстань від очей користувача до екрана монітора рекомендується підтримувати в межах 600–700 мм. Верхня межа екрана повинна знаходитися приблизно на рівні очей працівника або трохи нижче.

Основні ергономічні параметри наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Ергономічні параметри робочого місця

Параметр	Рекомендоване значення
Висота столу	680–800 мм
Висота сидіння	400–550 мм
Відстань до монітора	600–700 мм
Кут нахилу монітора	10–20°
Простір для ніг	не менше 600 мм

Джерело: [24]

Особливу увагу необхідно приділяти рівню шуму у виробничому приміщенні. Основними джерелами шуму є електродвигуни, приводи подачі, шпindelльні вузли та системи охолодження верстатів. Допустимий рівень шуму для робочих місць операторів не повинен перевищувати 80 дБА.

Для зниження шумового навантаження використовуються:

- шумопоглинальні облицювальні матеріали;

- захисні кожухи обладнання;
- технічне обслуговування приводів;
- раціональне планування виробничих приміщень.

Окремим напрямом аналізу умов праці є оцінювання психофізіологічних навантажень. Робота з програмуванням ЧПК характеризується високою інтелектуальною напруженістю, необхідністю аналізу великого обсягу інформації та прийняття технічних рішень у реальному часі.

Для профілактики професійної втоми рекомендується:

- виконувати перерви тривалістю 10-15 хвилин через кожну годину роботи;
- проводити вправи для очей;
- застосовувати ергономічні меблі;
- використовувати монітори з низьким рівнем мерехтіння;
- дотримуватися режиму праці та відпочинку.

Таким чином, проведений аналіз умов праці свідчить, що діяльність оператора та розробника керуючих програм для верстатів з ЧПК пов'язана з впливом комплексу фізичних, психофізіологічних та технічних факторів. Найбільш значущими серед них є напруження зору, статичне навантаження, виробничий шум, нервово-емоційна напруга та ризик контакту з технологічним обладнанням. Дотримання нормативних вимог щодо мікроклімату, освітлення, ергономіки робочого місця та організації режимів праці створює необхідні умови для забезпечення безпечної та ефективної роботи персоналу.

Важливим етапом аналізу умов праці оператора та розробника керуючих програм для верстатів з ЧПК є оцінювання важкості та напруженості трудового процесу. Відповідно до Гігієнічної класифікації праці, діяльність розробника програм ЧПК належить до робіт переважно розумового характеру, що характеризуються значним інформаційним навантаженням, необхідністю тривалої концентрації уваги, аналізом великої кількості технічної інформації та прийняттям відповідальних рішень щодо побудови траєкторій оброблення.

Під час створення керуючих програм працівник виконує комплекс операцій, серед яких аналіз конструкторської документації, вибір інструмента, розрахунок режимів різання, програмування траєкторій руху та перевірка коректності отриманого G-коду. Помилки на будь-якому етапі можуть призвести до аварійних ситуацій під час роботи обладнання, що обумовлює високий рівень відповідальності та психологічного навантаження.

Напруженість праці розробника керуючих програм характеризується такими показниками:

- високою концентрацією уваги;
- значним обсягом інформації, що обробляється;
- необхідністю прийняття технічних рішень;
- відповідальністю за результати роботи;
- постійним візуальним контролем програмного коду та графічних моделей.

Оператор верстата з ЧПК, окрім контролю роботи обладнання, здійснює налагодження верстата, контроль параметрів оброблення, перевірку якості виготовлених деталей та усунення можливих відхилень технологічного процесу. Тому його діяльність поєднує елементи як фізичної, так і інтелектуальної праці.

Результати оцінювання навантажень наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Характеристика трудового процесу

Показник	Розробник програм ЧПК	Оператор верстата ЧПК
Характер праці	Інтелектуальна	Інтелектуально-фізична
Робоча поза	Сидяча	Стояча та сидяча
Рівень відповідальності	Високий	Високий
Напруження зору	Високе	Середнє
Концентрація уваги	Висока	Висока
Фізичне навантаження	Незначне	Середнє
Нервово-емоційне навантаження	Високе	Високе

Джерело: [25]

Проведений аналіз свідчить, що за показниками напруженості праці найбільш несприятливими факторами є значне навантаження на органи зору та центральну нервову систему, що потребує впровадження спеціальних профілактичних заходів.

Аналіз електромагнітних випромінювань та навантаження на органи зору

Одним із характерних факторів робочого середовища розробника керуючих програм є вплив електромагнітних полів та світлового випромінювання від моніторів персональних комп'ютерів. Незважаючи на те, що сучасні монітори мають низькі рівні випромінювань, тривала робота за екраном може викликати втому органів зору, головний біль, зниження концентрації уваги та загальну перевтому.

Найбільш поширеним професійним захворюванням працівників, діяльність яких пов'язана з використанням комп'ютерної техніки, є комп'ютерний зоровий синдром. Його основними симптомами є:

- почервоніння очей;
- сухість слизової оболонки;
- погіршення фокусування;
- підвищена чутливість до світла;
- швидка зорова втома.

На рисунку 4.3 наведено основні фактори, що впливають на стан органів зору працівника.



Рис. 4.3 – Фактори навантаження на органи зору

Для зменшення навантаження на зоровий аналізатор рекомендується застосовувати правило «20-20-20», згідно з яким кожні 20 хвилин необхідно переводити погляд на об'єкт, розташований на відстані близько 20 футів (6 метрів), протягом не менше ніж 20 секунд.

Також необхідно забезпечувати правильне розташування монітора відносно джерел природного освітлення для виключення появи відблисків на екрані.

Під час роботи верстатів з числовим програмним керуванням виникає ряд небезпечних виробничих факторів, які можуть спричинити травмування персоналу або пошкодження обладнання.

Основними джерелами небезпеки є:

- рухомі елементи верстата;
- різальний інструмент;
- оброблювана заготовка;
- система електроживлення;
- система охолодження;
- стружка та пил.

Особливу небезпеку становить процес оброблення деталі у випадку виникнення програмної помилки. Неправильно задані координати можуть призвести до зіткнення інструмента із заготовкою, робочим столом або елементами конструкції верстата.

Для мінімізації ризиків застосовуються сучасні системи симуляції, які дозволяють перевірити програму до її запуску на обладнанні.

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно дотримуватися нормативних вимог щодо площі та об'єму приміщення.

Згідно з чинними санітарними нормами площа на одного працівника повинна становити не менше 6 м², а об'єм приміщення – не менше 20 м³.

Припустимо, що робоче приміщення має розміри:

- довжина a – 6 м;
- ширина b – 4 м;

– висота h – 3 м.

Тоді площа приміщення становитиме:

$$S = a * b$$

$$S=6 \times 4=24 \text{ м}$$

Об'єм приміщення:

$$V = S * h$$

$$V=24 \times 3=72 \text{ м}$$

Отримані значення перевищують нормативні вимоги для одного працівника, тому приміщення відповідає санітарним нормам.

На підставі проведеного аналізу можна сформулювати комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на підвищення рівня безпеки праці операторів та розробників керуючих програм для верстатів з ЧПК.

До основних заходів належать:

- забезпечення нормативних параметрів мікроклімату;
- використання ергономічних меблів;
- впровадження регламентованих перерв під час роботи за комп'ютером;
- використання моніторів із низьким рівнем мерехтіння;
- регулярний контроль освітленості робочих місць;
- проведення інструктажів з охорони праці;
- використання засобів індивідуального захисту оператором ЧПК;
- застосування програмних засобів симуляції та тестування керуючих програм;
- виконання профілактичних медичних оглядів працівників.

Таким чином, комплексний аналіз виробничого середовища показав, що найбільший вплив на працівників мають психофізіологічні навантаження, напруження зору, шум та ризики, пов'язані з роботою автоматизованого обладнання. Реалізація запропонованих заходів дозволяє забезпечити відповідність умов праці вимогам нормативно-правових актів з охорони праці та підвищити рівень безпеки експлуатації верстатів з числовим програмним керуванням.

4.3 Дослідження ризику реалізації потенційних небезпек на об'єкті проектування та розробка заходів щодо їх попередження

Сучасні виробничі підприємства широко використовують обладнання з числовим програмним керуванням, яке характеризується високим рівнем автоматизації технологічних процесів та значною концентрацією електротехнічного обладнання. Експлуатація верстатів з ЧПК супроводжується впливом низки небезпечних виробничих факторів, серед яких особливе місце займають електричний струм, рухомі механічні елементи, підвищена пожежна небезпека та ризик виникнення аварійних ситуацій унаслідок помилок програмного керування. У зв'язку з цим важливим завданням є розроблення комплексу організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення електробезпеки, пожежної безпеки та безпечної експлуатації обладнання.

Верстати з числовим програмним керуванням належать до категорії електротехнічних установок, робота яких здійснюється від мереж змінного струму напругою 220 В або 380 В. У конструкції такого обладнання використовуються електродвигуни, серводвигуни, системи керування, силові перетворювачі, блоки живлення, датчики та інші електронні компоненти. Наявність великої кількості електротехнічних пристроїв підвищує ризик ураження працівників електричним струмом у разі пошкодження ізоляції, порушення правил експлуатації або виникнення аварійних режимів роботи.

Електричний струм є одним із найбільш небезпечних виробничих факторів, оскільки його дія на організм людини може призвести до тяжких наслідків, включаючи втрату свідомості, опіки, порушення функцій серцево-судинної системи та летальні випадки. Ступінь небезпеки залежить від величини струму, напруги, тривалості впливу, шляху проходження струму через тіло людини та індивідуальних фізіологічних особливостей організму.

Основні наслідки впливу електричного струму на організм людини наведено у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Вплив електричного струму на організм людини

Сила струму, мА	Характер впливу
0,5–1,5	Легке поколювання
2–5	Болісні відчуття
10–15	Судомне скорочення м'язів
25–50	Утруднення дихання
50–100	Порушення роботи серця
Понад 100	Висока ймовірність смертельного ураження

Джерело: [25]

Особливу небезпеку становить дотик людини до струмопровідних частин обладнання, які перебувають під напругою. Причинами таких ситуацій можуть бути механічне пошкодження кабелів, старіння ізоляційних матеріалів, потрапляння вологи до електрообладнання, а також помилки під час виконання ремонтних робіт.

Для забезпечення електробезпеки виробниче обладнання повинно відповідати вимогам Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів та Закону України «Про охорону праці».

Основними заходами електробезпеки є:

- застосування захисного заземлення;
- використання автоматичних вимикачів;
- встановлення пристроїв захисного вимкнення;
- використання подвійної ізоляції;

- виконання профілактичних оглядів електромереж;
- проведення інструктажів працівників.

Одним із найефективніших способів захисту персоналу є застосування захисного заземлення. Його принцип дії полягає у навмисному електричному з'єднанні металевих неструмоведучих частин обладнання із землею. У випадку пошкодження ізоляції та появи напруги на корпусі обладнання електричний струм буде проходити через контур заземлення, а не через тіло людини.

Для виробничих приміщень із верстатами ЧПК опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом. Періодично повинні проводитися вимірювання параметрів заземлювального контуру та перевірка цілісності захисних провідників.

Не менш важливим елементом електробезпеки є використання пристроїв захисного вимкнення (ПЗВ). Такі пристрої здійснюють постійний контроль струмів витоку та автоматично відключають живлення у випадку виникнення небезпечної ситуації. Час спрацювання сучасних ПЗВ становить частки секунди, що дозволяє запобігти травмуванню працівників.

Під час експлуатації верстатів з ЧПК особливу увагу необхідно приділяти стану електричних кабелів та комутаційних пристроїв. Кабелі повинні бути захищені від механічних пошкоджень, дії мастильно-охолоджувальних рідин та високих температур. Забороняється використання кабелів із пошкодженою ізоляцією, а також експлуатація обладнання з відкритими струмопровідними частинами.

Важливим напрямом забезпечення безпеки є організація безпечного технічного обслуговування обладнання. Перед проведенням будь-яких ремонтних або налагоджувальних робіт необхідно виконати повне відключення обладнання від джерел живлення із застосуванням процедури блокування та маркування (Lockout/Tagout). Такий підхід виключає можливість випадкового подавання напруги під час виконання робіт.

Значну роль у системі охорони праці відіграє навчання персоналу правилам електробезпеки. Усі працівники, які обслуговують верстати з ЧПК, повинні проходити вступний, первинний та періодичний інструктажі. Працівники, діяльність

яких пов'язана з експлуатацією електрообладнання, повинні мати відповідну групу допуску з електробезпеки.

Відповідно до чинних нормативних документів працівники повинні знати:

- порядок дій при ураженні людини електричним струмом;
- правила користування засобами захисту;
- способи звільнення потерпілого від дії струму;
- правила надання домедичної допомоги.

На рисунку 4.6 наведено алгоритм дій у разі ураження працівника електричним струмом.



Рис. 4.6 – Послідовність дій при ураженні електричним струмом

Таким чином, електробезпека під час експлуатації верстатів з числовим програмним керуванням забезпечується шляхом застосування комплексу технічних та організаційних заходів, серед яких основне місце займають захисне заземлення, автоматичне вимкнення живлення, використання пристроїв захисного вимкнення, контроль технічного стану обладнання та систематичне навчання персоналу.

Реалізація зазначених заходів дозволяє суттєво знизити ризик виробничого травматизму та забезпечити безпечні умови праці під час експлуатації сучасних автоматизованих виробничих систем.

Одним із найважливіших напрямів забезпечення безпечних умов праці на підприємствах, де використовуються верстати з числовим програмним керуванням, є організація ефективної системи пожежної безпеки. Актуальність даного питання зумовлена наявністю великої кількості електротехнічного обладнання, кабельних мереж, мастильно-охолоджувальних рідин, полімерних матеріалів та інших горючих речовин, які можуть стати джерелом виникнення пожежі.

Пожежа являє собою неконтрольований процес горіння, який завдає матеріальних збитків, створює загрозу життю та здоров'ю людей, а також може призвести до повного знищення виробничого обладнання. Для підприємств машинобудівної галузі пожежна безпека має особливе значення, оскільки аварійне припинення роботи виробничих ліній може спричинити значні економічні втрати. Основними причинами виникнення пожеж під час експлуатації верстатів з ЧПК є:

- короткі замикання в електромережах;
- перевантаження електрообладнання;
- пошкодження ізоляції кабелів;
- перегрів електродвигунів;
- несправність систем охолодження;
- займання мастильно-охолоджувальних рідин;
- порушення правил експлуатації електрообладнання;
- використання несправних подовжувачів та електропроводки.

Крім того, під час механічного оброблення металів можуть утворюватися гарячі частинки стружки, які за певних умов здатні стати джерелом займання горючих матеріалів.

Для виникнення процесу горіння необхідна одночасна наявність трьох складових, відомих як «пожежний трикутник»:

- горюча речовина;
- окисник (кисень повітря);
- джерело запалювання.

Основним способом попередження пожеж є усунення хоча б одного із зазначених елементів. Саме на цьому принципі базуються сучасні системи пожежної безпеки виробничих підприємств.

Відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України виробничі приміщення повинні бути обладнані первинними засобами пожежогасіння, системами пожежної сигналізації та засобами евакуації персоналу.

Під час експлуатації верстатів з ЧПК особливу увагу приділяють технічному стану електрообладнання. Не рідше одного разу на рік повинні проводитися перевірки стану ізоляції електричних мереж, а також контроль справності автоматичних вимикачів та пристроїв захисного відключення.

Категорія приміщення за пожежною небезпекою

Виробничі приміщення з розміщенням верстатів з ЧПК зазвичай відносяться до категорії В за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

Дана категорія характеризується наявністю:

- горючих рідин;
- мастильних матеріалів;
- полімерних виробів;
- ізоляційних матеріалів;
- кабельної продукції.

Незважаючи на відсутність значної кількості легкозаймистих речовин, ризик виникнення пожежі залишається достатньо високим через використання електрообладнання великої потужності.

Основні джерела пожежної небезпеки наведені у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Джерела пожежної небезпеки під час роботи верстатів з ЧПК

Джерело небезпеки	Причина виникнення
Кабельні мережі	Пошкодження ізоляції
Електродвигуни	Перегрів обмоток
Блоки живлення	Коротке замикання
Системи охолодження	Витік мастильної рідини
Шафи керування	Несправність електроніки
Подовжувачі	Перевантаження мережі
Металева стружка	Іскроутворення

Джерело: [25]

Проведений аналіз свідчить, що найбільшу небезпеку становлять електротехнічні причини виникнення пожеж, тому основні профілактичні заходи повинні бути спрямовані саме на забезпечення справності електричного обладнання.

Первинні засоби пожежогасіння

Для ліквідації загорянь на початковій стадії використовуються первинні засоби пожежогасіння. Їх застосування дозволяє локалізувати осередок займання до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів.

У виробничих приміщеннях із верстатами з ЧПК доцільно використовувати:

- порошкові вогнегасники;
- вуглекислотні вогнегасники;
- пожежні щити;
- ящики з піском;
- азбестові полотна.

Особливу увагу необхідно приділяти вибору типу вогнегасника. Оскільки основним джерелом пожеж є електрообладнання, використання водяних вогнегасників забороняється.

Найбільш ефективними є вуглекислотні вогнегасники, які не пошкоджують електронні компоненти систем керування та можуть використовуватися для гасіння електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В.

Для приміщення площею до 100 м² рекомендується встановлювати не менше двох вогнегасників типу ВВК-3 або ВП-5.

Значну роль у системі охорони праці відіграє безпосередня безпека роботи на верстатах з числовим програмним керуванням. Незважаючи на високий рівень автоматизації, обладнання містить значну кількість потенційно небезпечних рухомих елементів.

Основними небезпечними зонами верстата є:

- шпиндельний вузол;
- різальний інструмент;
- приводи подачі;
- рухомий стіл;
- система автоматичної зміни інструмента.

Травмування працівників може виникнути внаслідок:

- контакту з обертовим інструментом;
- вильоту заготовки;
- руйнування різального інструмента;
- защемлення між рухомими елементами;
- помилок програмного керування.

З метою попередження виробничого травматизму сучасні верстати обладнуються системами захисних блокувань.

Перед запуском верстата оператор повинен:

- перевірити справність обладнання;
- перевірити наявність заземлення;
- переконатися у правильності встановлення інструмента;
- перевірити надійність закріплення заготовки;
- виконати тестовий запуск програми.

Особливе значення має використання систем комп'ютерного моделювання та симуляції G-коду, які були застосовані в даній кваліфікаційній роботі. Попередня

перевірка траєкторії руху інструмента дозволяє своєчасно виявити програмні помилки та уникнути зіткнення робочих органів верстата.

У разі виникнення аварійної ситуації оператор зобов'язаний негайно натиснути кнопку аварійного вимкнення та повідомити відповідальну особу.

Таким чином, забезпечення пожежної безпеки та безпечної експлуатації верстатів з числовим програмним керуванням ґрунтується на комплексному застосуванні організаційних, технічних та профілактичних заходів. Використання сучасних систем захисту, своєчасне технічне обслуговування обладнання, дотримання правил пожежної безпеки та попередня симуляція керуючих програм дозволяють мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій, зберегти здоров'я персоналу та забезпечити безперервність виробничого процесу.

Висновки до розділу 4

Проведено комплексний аналіз умов праці оператора та розробника керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням. Встановлено, що основними шкідливими та небезпечними виробничими факторами є тривала робота за комп'ютером, підвищене навантаження на органи зору, статичне навантаження на опорно-руховий апарат, нервово-емоційне напруження, а також шум і вібрація від роботи виробничого обладнання. Визначено вимоги до мікроклімату, освітлення та ергономічної організації робочого місця, дотримання яких забезпечує створення безпечних і комфортних умов праці та сприяє підвищенню продуктивності персоналу. Розглянуто основні заходи з електробезпеки, пожежної безпеки та безпечної експлуатації верстатів з ЧПК. Встановлено, що для мінімізації ризику виробничого травматизму необхідно використовувати захисне заземлення, автоматичні вимикачі, пристрої захисного відключення, системи аварійної зупинки та захисні огороження рухомих елементів обладнання. Доведено, що дотримання вимог пожежної безпеки, оснащення первинними засобами пожежогасіння дозволяють суттєво знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено особливості використання систем числового програмного керування в сучасному машинобудівному виробництві та розглянуто принципи програмування технологічних операцій засобами мови G-code. Проведений аналіз показав, що застосування верстатів з ЧПК забезпечує високий рівень автоматизації виробничих процесів, підвищення точності оброблення деталей, скорочення тривалості виробничого циклу та зменшення впливу людського фактора на якість готової продукції. Встановлено, що використання керуючих програм є основою функціонування обладнання з ЧПК та визначає ефективність виконання технологічних операцій.

У процесі виконання роботи проаналізовано структуру та принципи побудови керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням. Досліджено основні команди мови G-code, особливості використання лінійної та кругової інтерполяції, а також принципи формування траєкторії руху інструмента. Виконано аналіз сучасних програмних засобів для створення, редагування та перевірки керуючих програм, що дозволило обґрунтувати вибір інструментів для подальшої реалізації поставлених завдань.

У практичній частині роботи здійснено розроблення керуючої програми для оброблення контурної деталі. Проведено аналіз геометричних параметрів деталі, визначено координати характерних точок контуру, побудовано траєкторію руху інструмента та виконано розрахунок основних технологічних режимів оброблення. На основі отриманих даних сформовано керуючу програму мовою G-code, яка забезпечує оброблення зовнішнього та внутрішнього контурів деталі відповідно до заданих геометричних характеристик.

Для перевірки коректності розробленої програми виконано її тестування із використанням засобів комп'ютерної симуляції. У процесі моделювання проведено візуалізацію траєкторії руху інструмента, аналіз послідовності виконання команд та

контроль відповідності сформованого контуру параметрам креслення. Результати симуляції підтвердили правильність роботи програми, відсутність критичних помилок, колізій та некоректних координатних переходів.

У ході дослідження виконано аналіз ефективності створеної керуючої програми. Встановлено, що сформована траєкторія забезпечує раціональне використання робочого часу обладнання та мінімізує кількість холостих переміщень інструмента. Проведене моделювання підтвердило можливість практичного використання розробленої програми для виготовлення деталі на верстаті з числовим програмним керуванням.

Таким чином, поставлена мета роботи розроблення та дослідження керуючої програми для оброблення контурної деталі на верстаті з ЧПК із використанням засобів симуляції досягнута в повному обсязі. Усі визначені завдання виконано, а отримані результати можуть бути використані під час підготовки керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням та вдосконалення процесів технологічної підготовки виробництва.

У результаті виконання розділу 4 проведено комплексне дослідження питань охорони праці, виробничої безпеки та цивільного захисту під час розроблення і тестування керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням. Встановлено основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори, що впливають на оператора та розробника програм ЧПК, зокрема підвищене навантаження на органи зору, статичні фізичні навантаження, нервово-емоційне напруження, виробничий шум та ризики, пов'язані з експлуатацією електротехнічного обладнання. Обґрунтовано необхідність дотримання вимог щодо мікроклімату, освітлення та ергономічної організації робочого місця. Розглянуто комплекс заходів з електробезпеки, пожежної безпеки та безпечної експлуатації верстатів з ЧПК, який передбачає використання захисного заземлення, автоматичних систем відключення, засобів пожежогасіння, захисних огорожень і систем аварійної зупинки обладнання.

Список використаних джерел:

1. Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням: Навч. посіб. / Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. –[Електронний ресурс] / - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 158с
2. ДСТУ ISO 6983-1:2004. Автоматизація промислового виробництва. Програмування верстатів з числовим програмним керуванням. Формат програм керування. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 48 с.
3. ДСТУ ISO 14649-1:2018. Системи промислової автоматизації та інтеграція. Модель даних для числового програмного керування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 64 с.
4. Fanuc CNC Custom Macros. Programming Resources Manual. Fanuc Corporation, 2022. 412 p.
5. Haas CNC Programming Workbook. Oxnard : Haas Automation Inc., 2023. 296 p.
6. LinuxCNC Documentation. User Concepts Manual. Version 2.9. LinuxCNC Development Team, 2024. 568 p.
7. Smid P. CNC Programming Handbook. 4th ed. New York : Industrial Press Inc., 2021. 832 p.
8. Колодій О.С., Кюрчев С.В., Сушко О.В., Ковальов О.О. «Автоматичне управління процесами обробки металів різанням»: Методичний посібник з виконання лабораторних робіт. Мелітополь: ТПЦ «Forward press», 2020. С. 136.
9. Шалугін В.С. Процеси та апарати промислових технологій [Текст] : навчальний посібник / В. С. Шалугін, В. М. Шмандій. – Київ : Центр учбової літератури, 2008. – 392 с.
10. 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

11. Колодий А.С., Парахин А.А. Анализ процесса стружкообразования. Праці ТДАТУ, ТДАТУ. Мелітополь, 2019 Вип. 19. Том 4. С. 253-259.

12. Системи автоматизованого програмування верстатів з ЧПК : навчальний посібник / С. Л. Міранцов, В. І. Тулупов, С. Г. Онищук, Ю. Б. Борисенко, Є. В. Мішура, О. С. Ковалевська. Краматорськ : ДДМА, 2011. 152 с.

13. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Vershkov O., Naidysh A. Development of the method for the formation of one-dimensional contours by the assigned interpolation accuracy. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 1.1(4(91)). P. 76-82.

14. Корчинський В. М., Свиначенко Д. М., Мацулевич О. Є. Методи підвищення інформаційних показників багатоспектральних зображень на основі ортогоналізації даних. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2014. Вип. 14, т. 2. С. 264-270

15. Гавриленко Є. А., Чаплінський А. П., Тетервак І. Р. Розробка функціональної моделі процесу створення САПР геометричних поверхонь зубозаточувального інструменту. Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 29-31 травня 2023 р.). Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. С. 48-56

16. Івженко О. В., Антонова Г. В., Чаплінській А. П., Михайленко О. Ю. Спеціалізований програмний модуль розрахунку операційних норм часу обробки деталей сільськогосподарської техніки за умов індивідуальної організації праці. Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології: матеріали III Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (Запоріжжя, 12-19 грудня 2022 р.) Запоріжжя: ТДАТУ, 2022. С. 361-368

17. Havrylenko Ye., Kholodniak Yu., Halko S., Vershkov O., Miroshnyk O., Suprun O., Dereza O., Shchur T. AndŚrutek M. Representation of a Monotone Curve by a Contour with Regular Change in Curvature. Entropy (Basel). 2021. Vol. 23(7). P. 923. <https://doi.org/10.3390/e23070923>

18. Колодий О.С., Сушко О.В. Аналіз плоского пластичного плину матеріалу при оцінюванні оброблюваності на металорізальних верстатах. Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. Вип. 10, т.1

19. Iżol, 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. – 28 p.

20. Мацулевич О. Є., Вершков О. О. Вдосконалення методики контролю якості розробки управляючої програми із застосуванням симулятора роботи токарного верстата з ЧПУ. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 2. С. 140-149. URI <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/17893>

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

22. STL to G-Code API. Postman. URL: <https://www.postman.com/slicegenius/workspace/slicegenius/collection/31963153-e30a125f-c968-4a34-8220-0caaf690c75a>

23. G-Code Simulator. Git Hub Pages. URL: <https://nraynaud.github.io/webgcode/>

24. Про затвердження Вимог щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Офіційни сайт Верховної Ради України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18#Text>

25. Безпека життєдіяльності : опорний конспект / за ред. В. М. Заплатинського. Київ : Центр учбової літератури, 1999. 456 с. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2020/Zaplatinskij_1999_208.pdf

Научні матеріали

Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова
ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)
на тему

«Розроблення та тестування керуючої програми для верстата з ЧПК»

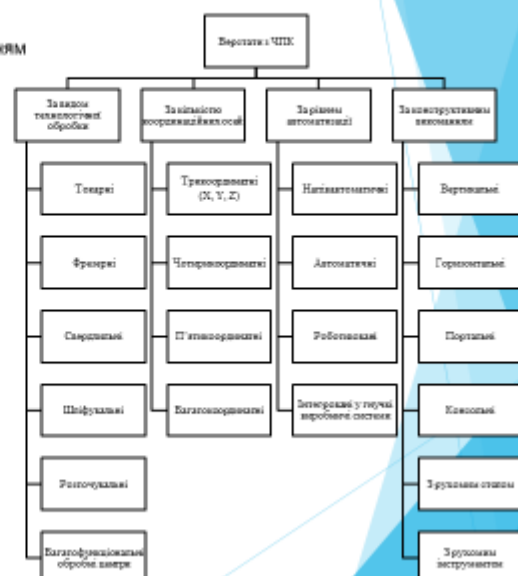
Виконав здобувач 3 курсу
Групи СІНЖ2023-1у
Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні
комунікації
Спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка
Освітня програма «Системна інженерія»
Буткевич Євген Вікторович
Керівник к.т.н., доцент Цегельник Євген Володимирович

Харків – 2026

Характеристика та сфери застосування верстатів із
числовим програмним керуванням

Основні характеристики верстатів з числовим програмним керуванням

Характеристика	Опис	Вплив на технологічний процес
Точність позиціонування	Здатність верстата переміщувати інструмент або заготовку до заданих координат з мінімальним відхиленням.	Забезпечує відповідність геометричних параметрів виробу технічним вимогам.
Повторюваність позиціонування	Здатність багаторазово відтворювати однієї координати переміщення.	Гарантує стабільність якості серійної продукції.
Потужність шпинделя	Максимальна потужність приводу різального інструмента.	Визначає можливість оброблення різних матеріалів та режимів різання.
Частота обертання шпинделя	Кількість обертів шпинделя за одиницю часу.	Впливає на продуктивність і якість поверхні оброблення.
Швидкість подачі	Швидкість переміщення інструмента або заготовки під час оброблення.	Визначає тривалість виробничого циклу та ефективність роботи.
Кількість координатних осей	Число напрямків неробочого переміщення інструмента.	Розширяє можливості виготовлення деталей складної форми.
Розмір робочої зони	Максимальні габарити заготовки, що може бути оброблена.	Обмежує розміри виробів, які можуть виготовлятися на верстаті.
Тип системи ЧПК	Програмно-апаратний комплекс керування верстатом.	Визначає функціональні можливості та точність керування.
Тип приводу	Середня швидкість або кроковий двигун.	Впливає на точність позиціонування та динаміку роботи.
Автоматизація змін інструмента	Наявність систем автоматичної зміни інструмента.	Зменшує допоміжну частку під час продуктивності.
Максимальне навантаження на стіл	Гранично дозволена вага заготовки, що допущена до оброблення.	Визначає сферу застосування обладнання.
Споживана потужність	Енергетичні витрати верстата під час роботи.	Впливає на економічну ефективність виробництва.



Аналіз сучасних програмних і технічних рішень-аналогів

Порівняльна характеристика програмних середовищ для роботи з G-кодом

Загальна схема підготовки керуючої програми



Програмне забезпечення	Редагування G-коду	Симуляція	Керування верстатом	CAD/CAM-функції
NC Viewer	Так	Так	Ні	Ні
CIMCO Edit	Так	Так	Ні	Ні
Mach3	Частково	Так	Так	Ні
LinuxCNC	Так	Так	Так	Ні
Fusion 360 Manufacture	Автоматична генерація	Так	Ні	Так

Переваги та недоліки основних програмних засобів

Програмний продукт	Переваги	Недоліки
NC Viewer	Простота використання, доступність	Обмежена функціональність
CIMCO Edit	Потужні засоби аналізу коду	Комерційна ліцензія
Mach3	Безпосереднє керування обладнанням	Обмежені можливості CAD/CAM
LinuxCNC	Відкритий код, гнучкість налаштувань	Складність налаштування
Fusion 360 Manufacture	Повна інтеграція CAD/CAM	Високі вимоги до апаратних ресурсів

Формування вимог до програмного продукту

Основні функціональні вимоги до системи

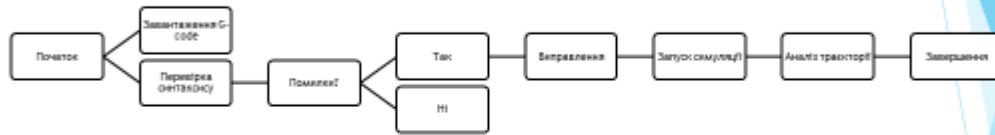
№	Функціональна вимога	Призначення
1	Створення та редагування G-коду	Формування керуючих програм
2	Перевірка синтаксису команд	Виявлення помилок програмування
3	Візуалізація траєкторії інструмента	Контроль правильності оброблення
4	Симуляція процесу оброблення	Попередня перевірка програми
5	Моніторинг виконання команд	Контроль роботи системи
6	Формування звітів	Аналіз результатів роботи
7	Імпорт та експорт файлів	Забезпечення сумісності даних

Основні нефункціональні вимоги до системи

Категорія вимог	Характеристика
Продуктивність	Висока швидкість оброблення даних та мінімальний час відгуку
Надійність	Стабільне функціонування та мінімізація відмов
Безпека	Захист інформації та контроль доступу
Масштабованість	Можливість розширення функціональності та кількості користувачів
Зручність використання	Інтуїтивний інтерфейс та багатомовна підтримка
Підтримка та супровід	Наявність документації та регулярних оновлень
Кросплатформність	Підтримка різних операційних систем та вебдоступу

Моделювання взаємодії користувача із системою засобами UML

Діаграма діяльності процесу симуляції



Основні функціональні можливості системи



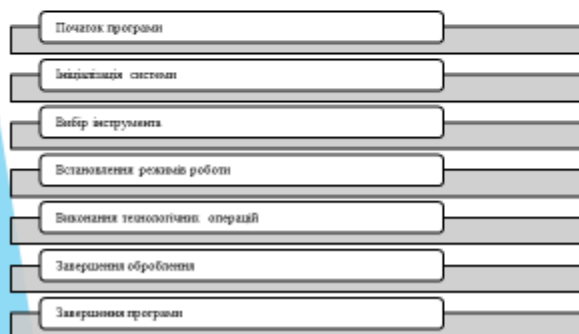
Основні конструкції та принципи використання мови G-code

Загальна структура програмного блоку має вигляд:

N10 G01 X50 Y20 Z-5 F200

де: N10 – номер блока;
G01 – команда лінійного переміщення;
X50 Y20 Z-5 – координати кінцевої точки;
F200 – швидкість подачі.

Загальна структура керуючої програми



Приклад роботи G-коду



Розроблення програмного рішення для підтримки процесів

Вихідні геометричні параметри деталі

Параметр	Позначення	Значення, мм
Загальна довжина деталі	L	120
Загальна висота деталі	H	70
Висота основи	h1	20
Радіус зовнішнього заокруглення	R1	20
Ширина внутрішнього вирізу	b	30
Висота внутрішнього вирізу	h2	30
Радіус заокруглення внутрішнього вирізу	R2	6
Товщина заготовки	t	8

Прийняті технологічні режими оброблення

Параметр	Позначення	Значення
Швидкість різання	V	120 м/хв
Діаметр фрези	D	6 мм
Частота обертання шпинделя	n	6400 об/хв
Подача на зуб	fz	0,03 мм/зуб
Кількість зубців	z	2
Швидкість подачі	F	380 мм/хв
Глибина різання за прохід	ap	2 мм
Загальна товщина заготовки	t	8 мм
Кількість проходів	k	4

Формування керуючої програми мовою G-code

Структурні елементи керуючої програми

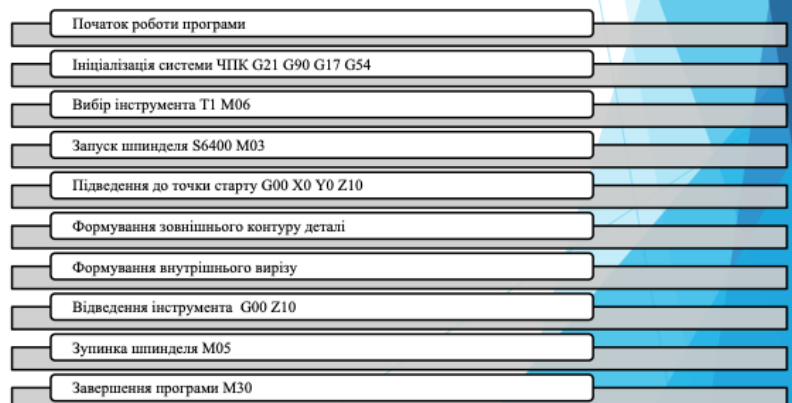
Етап програми	Призначення
Ініціалізація	Встановлення одиниць вимірювання, системи координат та площини оброблення
Підготовчі команди	Запуск шпинделя, задання подачі, підведення інструмента
Оброблення зовнішнього контуру	Формування зовнішньої геометрії деталі
Оброблення внутрішнього контуру	Формування внутрішнього технологічного вирізу
Завершення циклу	Зупинка шпинделя, відведення інструмента, завершення програми

Структура G-коду керуючої програми

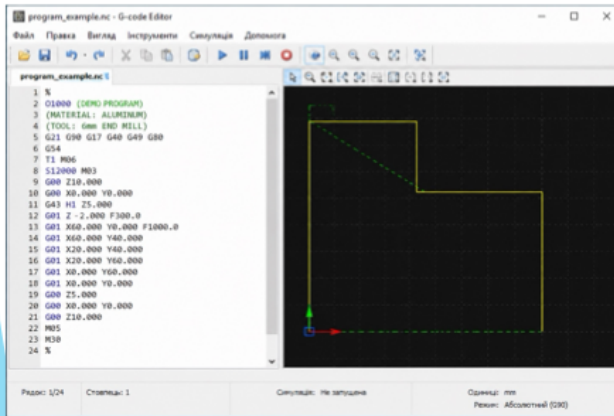
Керуюча програма
 Підготовчі команди (G) |— G17 | |— G21 | |— G90 | |— G54 |
 Команди руху |— G00 | |— G01 | |— G02 | |— G03 |
 Технологічні параметри |— S6400 | |— F380 | |— Z-8 |
 Команди інструмента |— T1 | |— M06 |
 Завершальні команди |— M05 |— M30

Траєкторія: P1 → P2 → P3 → P4 → P5 → P6 → P1
 де: P1(0;0);
 P2(120;0);
 P3(95;50);
 P4(45;50);
 P5(20;50);
 P6(0;30).

Алгоритм формування керуючої програми



Демонстрація функціональних можливостей створеного застосунку

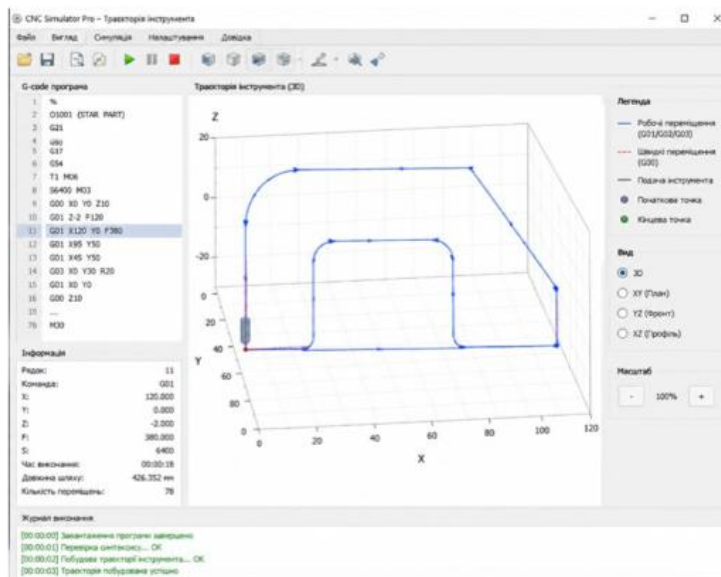


Вікно редагування керуючої програми G-code

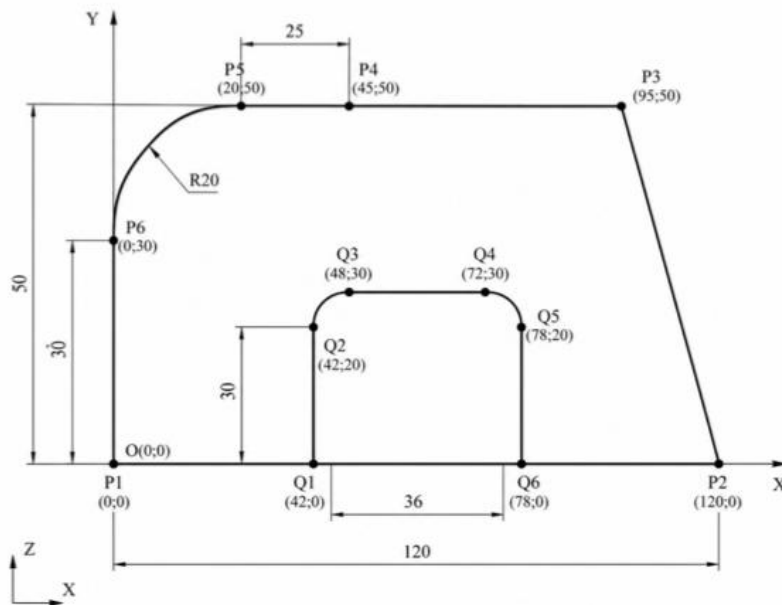
Основні види синтаксичних помилок

Тип помилки	Причина виникнення
Невідома команда	Використання некоректного G-коду
Відсутність координат	Неповне визначення точки переміщення
Помилка параметра R	Невірне задання радіуса дуги
Відсутність завершальної команди	Відсутність M30 або M02
Конфлікт режимів	Однотимчасне використання несумісних команд

Візуалізація траєкторії руху інструмента



Розміри деталі



Умовна схема опорних точок деталі

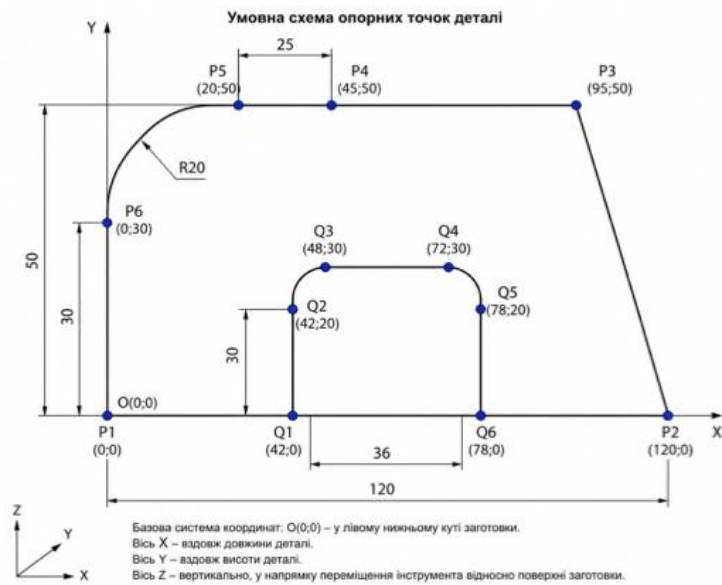
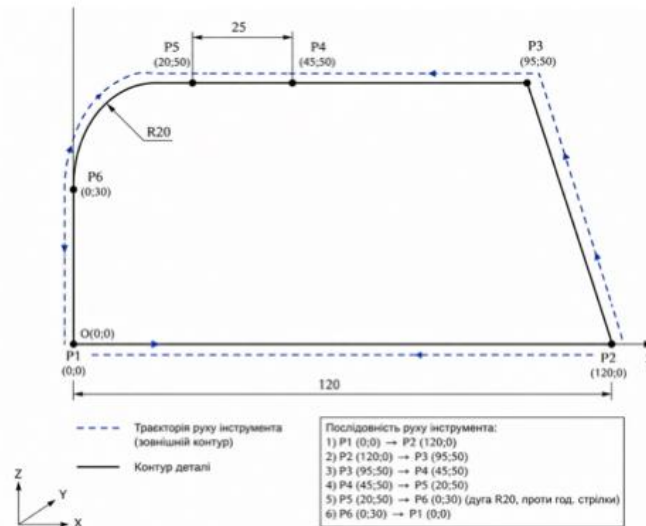


Схема оброблення зовнішнього контуру



Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

Небезпечний або шкідливий фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Заходи захисту
Напруження органів зору	Тривала робота за монітором	Втома очей, погіршення зору, головний біль	Ергономічне розташування монітора, регламентовані перерви, нормативне освітлення
Статичне навантаження	Тривале перебування у сидячому положенні	Захворювання опорно-рухового апарату, перевтома	Ергономічне робоче місце, виробнича гімнастика, перерви
Нервово-емоційне напруження	Розроблення та перевірка G-коду	Стрес, зниження концентрації уваги	Раціональний режим праці та відпочинку, автоматизація перевірки програм
Виробничий шум	Робота приводів та електродвигунів верстата	Втома, погіршення слуху	Використання шумопоглинальних матеріалів, технічне обслуговування обладнання
Ураження електричним струмом	Електричні мережі та електрообладнання верстата	Травмування або загибель працівника	Захисне заземлення, ПЗВ, автоматичні вимикачі, інструктажі
Травмування рухомими частинами	Шпиндель, приводи подачі, інструмент	Механічні травми різного ступеня тяжкості	Захисні огороження, блокування дверцял, аварійна зупинка
Пожежа	Коротке замикання, перегрів обладнання	Матеріальні збитки, загроза життю людей	Вогнегасники, пожежна сигналізація, контроль стану електромереж
Помилки керуючої програми	Некоректний G-код	Пошкодження інструмента або верстата	Комп'ютерна симуляція, тестовий запуск, перевірка програми
Відключення електроенергії	Аварії енергомереж, воєнні дії	Зупинка виробництва, втрата даних	Джерела безперебійного живлення, резервні генератори
Повітряна тривога	Воєнний стан	Загроза життю та здоров'ю працівників	Система оповіщення, евакуація до укриття

ВИСНОВКИ

- ▶ У кваліфікаційній роботі досліджено особливості використання систем числового програмного керування в сучасному машинобудівному виробництві та розглянуто принципи програмування технологічних операцій засобами мови G-code. Проведений аналіз показав, що застосування верстатів з ЧПК забезпечує високий рівень автоматизації виробничих процесів, підвищення точності оброблення деталей, скорочення тривалості виробничого циклу та зменшення впливу людського фактора на якість готової продукції. Встановлено, що використання керуючих програм є основою функціонування обладнання з ЧПК та визначає ефективність виконання технологічних операцій.
- ▶ У процесі виконання роботи проаналізовано структуру та принципи побудови керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням. Досліджено основні команди мови G-code, особливості використання лінійної та кругової інтерполяції, а також принципи формування траєкторії руху інструмента. Виконано аналіз сучасних програмних засобів для створення, редагування та перевірки керуючих програм, що дозволило обґрунтувати вибір інструментів для подальшої реалізації поставлених завдань.
- ▶ У практичній частині роботи здійснено розроблення керуючої програми для оброблення деталі типу «зірка інспекційної машини». Проведено аналіз геометричних параметрів деталі, визначено координати характерних точок контуру, побудовано траєкторію руху інструмента та виконано розрахунок основних технологічних режимів оброблення. На основі отриманих даних сформовано керуючу програму мовою G-code, яка забезпечує оброблення зовнішнього та внутрішнього контурів деталі відповідно до заданих геометричних характеристик.
- ▶ Для перевірки коректності розробленої програми виконано її тестування із використанням засобів комп'ютерної симуляції. У процесі моделювання проведено візуалізацію траєкторії руху інструмента, аналіз послідовності виконання команд та контроль відповідності сформованого контуру параметрам креслення. Результати симуляції підтвердили правильність роботи програми, відсутність критичних помилок, колізій та некоректних координатних переходів.
- ▶ У ході дослідження виконано аналіз ефективності створеної керуючої програми. Встановлено, що сформована траєкторія забезпечує раціональне використання робочого часу обладнання та мінімізує кількість холостих переміщень інструмента. Проведене моделювання підтвердило можливість практичного використання розробленої програми для виготовлення деталі на верстаті з числовим програмним керуванням.
- ▶ Таким чином, поставлена мета роботи розроблення та дослідження керуючої програми для оброблення деталі типу «зірка інспекційної машини» на верстаті з ЧПК із використанням засобів симуляції досягнута в повному обсязі. Усі визначені завдання виконано, а отримані результати можуть бути використані під час підготовки керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням та вдосконалення процесів технологічної підготовки виробництва.