

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

(повне найменування факультету)

Кафедра робототехніки

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТОКАРНОЇ
ОБРОБКИ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПУ ЕМСО
ОСНАЩЕНИХ СИСТЕМОЮ FANUC**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Металообробне обладнання та
роботизовані виробничі системи»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМ(МОРВС)-42

Мирончук Євгеній Федорович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«___» _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Придальний Борис Іванович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Транспорту та механічної інженерії

Кафедра Прикладної механіки та мехатроніки

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітня програма: «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____ Р. РЕДЬКО

“ _____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Миرونчуку Євгенію Федоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Підвищення ефективності токарної обробки на верстатах з ЧПУ EMCO оснащених системою FANUC*

Керівник роботи: *Четвержук Тарас Іванович, к.т.н., доцент,*

затверджена наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 р., № 962/01-07

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «01» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: Конструкторсько-технологічна документація, відгуки підприємства про роботу обладнання, загальні креслення деталей, нормативні дані _____ та _____ державні стандарти _____

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити)

Вступ, оглядовий розділ, технологічний розділ, програмування токарної обробки, _____ охорона _____ праці, висновки _____

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 3.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	<i>Оглядовий розділ</i>	<i>01.04.2026</i>	
2.	<i>Технологічний розділ</i>	<i>28.04.2026</i>	
3.	<i>Програмування токарної обробки</i>	<i>05.05.2026</i>	
4.	<i>Охорона праці</i>	<i>20.05.2026</i>	
5.	<i>Оформлення графічної частини та презентації</i>	<i>30.05.2026</i>	
6.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>		
7.	<i>Представлення роботи до захисту</i>	<i>08.06.2026</i>	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Мирончук Є.Ф..
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Четвержук Т.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

МИРОНЧУК Є.Ф. Підвищення ефективності токарної обробки на верстатах з ЧПУ EMCO оснащених системою FANUC. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літературних джерел, додатків (згідно структури кваліфікаційної роботи, затвердженої кафедрою).

Робота включає в себе оглядовий розділ, технологічну і конструкторську частини, а також питання охорони праці. В оглядовому розділі проведено аналіз сучасного стану виробництва та виявлено, що основними резервами підвищення продуктивності верстатів EMCO є оптимізація режимів різання, скорочення допоміжного часу, а також максимальне використання технологічних можливостей системи ЧПУ Fanuc.

В технологічному розділі досліджено архітектуру, програмне забезпечення та практичні аспекти експлуатації систем числового програмного керування токарним обладнанням з ЧПУ фірми EMCO

В конструкторській частині проекту розглянуто практичні та алгоритмічні аспекти розробки управляючих програм для токарного оброблення на верстатах з ЧПУ та наведено рекомендації з їх оптимізації. Використання розширеного функціоналу програмування стійки EMCO/Fanuc (цикли, компенсації, пряме введення) дозволяє мінімізувати ручні розрахунки, виключити людські помилки, суттєво скоротити час на підготовку виробництва та забезпечити повну відповідність виготовленої деталі вимогам креслення.

Виконано розділ з охорони праці, в якому проаналізовані шкідливі та небезпечні виробничі фактори при роботі на верстатах з ЧПУ.

Ключові слова: верстат з ЧПУ, EMCO, механічна обробка, оптимізація, програмування, режими різання, технологічне оснащення.

ABSTRACT

MYRONCHUK Ye. Increasing the efficiency of turning on EMCO CNC machines equipped with FANUC system. Manuscript.

Bachelor's qualification work of EP «Applied Mechanics» specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The bachelor's qualification work consists of an introduction, 4 sections, conclusions, a list of literature sources, appendices (according to the structure of the qualification work approved by the department).

The work includes a review section, technological and design parts, as well as labor protection issues. The review section analyzed the current state of production and found that the main reserves for increasing the productivity of EMCO machines are the optimization of cutting modes, reduction of auxiliary time, and maximum use of the technological capabilities of the Fanuc CNC system.

The technological section examined the architecture, software, and practical aspects of operating numerical program control systems for CNC turning equipment from EMCO

The design part of the project considered practical and algorithmic aspects of developing control programs for turning on CNC machines and provided recommendations for their optimization. The use of the extended programming functionality of the EMCO/Fanuc rack (cycles, compensations, direct input) allows you to minimize manual calculations, eliminate human errors, significantly reduce the time for preparing production, and ensure full compliance of the manufactured part with the requirements of the drawing. A section on occupational safety has been completed, which analyzes harmful and dangerous production factors when working on CNC machines.

Keywords: CNC machine, EMCO, machining, optimization, programming, cutting modes, technological equipment.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1. Огляд можливостей застосування верстатів з ЧПУ.....	8
1.2. Основні переваги використання верстатів з ЧПУ.....	11
1.3. Огляд систем керування верстатами ЕМСО.....	13
1.4. Вимоги до конструкції верстатів з ЧПУ.....	15
1.5. Обробка деталей на верстатах з ЧПУ.....	16
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	19
2.1. Класифікація систем ЧПУ для металообробних верстатів.....	19
2.2. Мови програмування обробки заготовок на верстатах з ЧПУ.....	22
2.3. Опис стійки ЧПУ ЕМСО.....	24
2.4. Робота на стійці верстата з ЧПУ ЕМСО із системою FANUC.....	25
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМУВАННЯ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ.....	29
3.1. Структура програми та опис команд.....	29
3.2. Обробка фасок та скруглень	32
3.3. Пряме введення креслення.....	33
3.4. Цикл поздовжнього токарного оброблення.....	34
3.5. Цикл торцевого точіння та нарізування різей.....	35
3.6. Компенсація радіуса різця.....	26
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	38
4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при роботі на верстатах з ЧПУ ЕМСО.....	38
4.2. Безпека під час виконання технологічних процесів.....	39
4.3. Інженерні розрахунки забезпечення безпечних умов праці.....	41
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48
ДОДАТКИ	51

ВСТУП

У сучасних умовах динамічного розвитку промислового сектору для підприємств, які спеціалізуються на механічній обробці деталей, пріоритетними завданнями є радикальне зниження трудомісткості виробничих операцій та мінімізація собівартості готової продукції. При цьому ключовою вимогою залишається безумовне збереження, а в багатьох випадках – і суттєве підвищення заданих параметрів якості та точності. З огляду на це, технологічно-конструкторські бюро підприємств та профільні науково-дослідні відділи перебувають у стані безперервного пошуку інноваційних шляхів модернізації існуючих технологічних процесів. Цей процес безпосередньо спирається на інтеграцію передового високопродуктивного ріжучого інструменту, новітніх матеріалів та прогресивного інформаційно-програмного забезпечення, що дозволяє оптимізувати режими різання та скоротити допоміжний час.

Визначальною рисою поточного етапу еволюції світового машинобудування є масове впровадження та глибока інтеграція у виробничі цикли багатофункціональних металообробних верстатів із числовим програмним управлінням (ЧПУ). Використання обладнання такого класу дає змогу не лише багаторазово підвищити продуктивність роботи завдяки концентрації операцій, а й мінімізувати вплив людського фактора, гарантуючи стабільно високу якість геометричних параметрів деталей. Фундаментальна особливість і головна технологічна перевага цих комплексів полягає в тому, що просторове переміщення виконавчих органів та інструменту відносно оброблюваної заготовки повністю автоматизовано: воно заздалегідь розраховується, кодується та записується у вигляді спеціалізованих керуючих програм у числовій формі.

На сьогоднішній день автоматизоване обладнання з ЧПУ інтегроване в усі рівні промисловості: від невеликих приватних інноваційних майстерень

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та стартапів до масштабних автоматизованих заводів, розташованих у найбільших світових індустріальних парках. Нині практично неможливо знайти галузь машинобудування – будь то авіакосмічний комплекс, автомобільна промисловість чи енергетичне машинобудування – де б не експлуатувалися унікальні технологічні можливості цих систем. У зв'язку з цим виникає жорстка потреба: кожен сучасний фахівець інженерного (машинобудівного) профілю повинен володіти глибокими фундаментальними знаннями про принципи функціонування та економічні переваги цього високотехнологічного устаткування. Так, конструктору необхідно мати знання про ЧПУ з метою застосування більш ефективної техніки призначення розмірів або допусків при проектуванні деталей, поверхні яких оброблятимуться на верстатах з ЧПУ. Технологу ж необхідно розуміти сутність ЧПУ для оптимального проектування оснастки та ріжучого інструменту.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯДОВИЙ РОЗДІЛ

1.1. Огляд можливостей застосування верстатів з ЧПУ

Модернізація промислового комплексу та перехід до концепції Індустрії 4.0 (Industry 4.0) обумовлюють необхідність інтенсивної цифровізації технологічних процесів. Ключовим інваріантом цього процесу є впровадження гнучких автоматизованих верстатних систем із числовим програмним управлінням (ЧПУ) [15]. На сучасному етапі розвитку машинобудування та суміжних галузей, верстати з ЧПУ трансформувалися зі звичайних засобів механізації у складні кіберфізичні системи, які інтегрують прецизійну механіку, адаптивне мікропроцесорне керування та інтелектуальне програмне забезпечення. Це дозволяє суттєво підвищити продуктивність праці та мінімізувати вплив людини у високотехнологічні процеси механічного оброблення. На рисунку 1.1 представлено різні типи промислових металообробних верстатів з ЧПУ.



Рисунок 1.1 – Різновиди металообробних верстатів з ЧПУ

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Відмінність верстатів із ЧПУ від верстатів із ручними системами управління полягає не тільки в принципі побудови програмного управління. Реалізація ідеї ЧПУ висунула низку вимог до конструкції самого верстата, без виконання яких застосування системи ЧПУ залишається малоефективним. Так, система ЧПУ дозволяє забезпечити високу точність переміщення виконавчих органів верстата (до 10 нм). Для створення можливості отримання високої точності розмірів деталі під час обробки необхідно, щоб механічні вузли верстата задовольняли відповідним вимогам. Тому оснащення верстатів системами ЧПУ, що інтегрує комп'ютерне проєктування (CAD/CAM) [14] з механічною обробкою матеріалів вимагає перегляду вимог до їхньої конструкції.

Сучасне металообробне обладнання з ЧПУ реалізує високоточні методи формоутворення завдяки наступним характеристикам [2]:

- Багатоосьова обробка (від 3 до 5+ координат). Одночасне переміщення інструмента по осях X, Y, Z, а також обертання навколо них (осі A, B, C) дозволяє створювати деталі складної геометричної форми без зміни позиціонування;
- Висока точність та повторюваність. Досягнення допусків на рівні мікрометрів ($\pm 0,001$ мм.);
- Високошвидкісне фрезерування (HSM) та точіння (HST). Швидкість обертання шпинделя понад 20000 об/хв знижує термічне навантаження на деталь та покращує якісні характеристики обробленої поверхні.

Верстати з ЧПУ застосовують не лише для механічного різання матеріалів, а й можуть реалізовувати інші фізичні процеси [13]:

- Субтрактивні (механічні). Виконують фрезерні, токарні, свердлильні операції з видалення матеріалу, зазвичай стружкою;
- Ерозійні (EDM). Це електроіскрова обробка струмом високоміцних сталей у діелектричному середовищі;

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

– Променеві. Включає лазерне, плазмове та гідроабразивне різання матеріалів будь-якої твердості за складним контуром;

– Адитивні (3D-друк). Відбувається нарощування (нашаровування) матеріалу (пластик, металевий порошок) шар за шаром, що також контролюється кодами ЧПУ, а саме G-кодами.

Гнучкість переналагодження дозволяє ефективно використовувати даний вид верстатів як у дрібносерійному, так і в масовому виробництві. Сучасні промислові сфери застосування верстатів з ЧПУ представлена на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Сфери застосування верстатів з ЧПУ

На світовому та українському ринках систем ЧПУ домінують кілька світових лідерів із розробки систем ЧПУ [15]:

– Fanuc (Японія) – найчастіше встановлюється на японські (наприклад, Mazak, Okuma);

– Siemens/Sinumerik (Німеччина) – переважно застосовується на європейському обладнанні, наприклад DMG Mori, Hermle;

– Heidenhain (Німеччина) – вважаються найкращими для складного фрезерування та встановлюються на верстати цієї ж фірми;

– Haas (США) – власна розробка однойменного американського виробника верстатів.

Виходячи з проведеного аналізу, можна стверджувати, що подальший розвиток верстатних систем із ЧПУ лежить у площині їхньої інтеграції зі штучним інтелектом (нейромережеве прогнозування зносу інструмента) та поєднання в межах одного робочого простору субтрактивних (видалення матеріалу) та адитивних (3D-друк) технологічних методів одержання готових деталей та виробів.

1.2. Основні переваги використання верстатів з ЧПУ

Фундаментальною функцією технологічного верстатів з ЧПУ є автоматизоване високоточне позиціонування його виконавчих елементів. Кінематика сучасних верстатів передбачає наявність двох або більше просторових координат (осей переміщення), за якими автоматично реалізуються задані параметри руху з регламентованим рівнем похибки.

На відміну від універсальних металорізальних верстатів, де формоутворення та керування траєкторією інструмента або заготовки здійснюються дискретно шляхом ручного впливу оператора, системи з ЧПК автоматизують цей процес. Залежно від конфігурації обладнання, переміщення детермінуються за лінійними осями (ортогональні координати) або осями обертання (ротаційні координати).

Аплікація управляючих імпульсів здійснюється через інтеграцію сервоприводів та крокових двигунів, які функціонують від безпосередньо контролера процесора ЧПУ відповідно до алгоритмів управляючої програми. Програмуванню підлягають такі релевантні параметри, як вектор і характер кінематики (прискорене позиціонування, лінійна чи кругова інтерполяція), просторові координати, а також вектори швидкості й дискретність подачі [2].

Динамічний цикл передбачає генерацію системою ЧПУ серії дискретних електричних імпульсів, що передаються на кроковий двигун.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обертальний момент ротора конвертується в лінійне переміщення робочого столу за допомогою кулько-гвинтової передачі (КГП) з мінімальним люфтом. Замкнутий контур керування реалізується за рахунок пристрою зворотного зв'язку (енкодера), інтегрованого у кінематичну схему. Цей давач забезпечує моніторинг кутового переміщення осі у реальному часі, дозволяючи системі ЧПУ верифікувати кількість фактично відпрацьованих імпульсів та динамічно коригувати похибку позиціонування.

В умовах нормальної експлуатації один верстат із ЧПУ може замінити від 2 до 6 одиниць універсального обладнання, крім того, значно скорочується термін підготовки виробництва та тривалість циклу виготовлення продукції. Економічна доцільність використання верстатів із ЧПУ виправдовується, як правило, при обробці заготовок серійними партіями. З метою збільшення ефективності використання дороговартісних верстатів із ЧПУ, особливо обробних центрів (ОЦ), рекомендується їх експлуатувати в режимі дво-, три- та чотиризмінної роботи. Модернізація верстатного парку машинобудівних підприємств шляхом впровадження систем із ЧПК забезпечує три ключові детермінанти ефективності [19]:

- Інтенсифікація автоматизації виробничих процесів. Максимальне делегування функцій контролю керуючому алгоритму мінімізує деструктивний вплив людського фактора. Процес технологічної підготовки виробництва повністю керується інженером-технологом. Передача етапу технологічної підготовки на рівень інженерного проектування дозволяє забезпечити автономність робочого циклу. Це вивільняє часовий ресурс персоналу для паралельного виконання суміжних операцій, оптимізує коефіцієнт завантаження обладнання та знижує вимоги до кваліфікації безпосереднього оператора порівняно з роботою верстатника.

- Прецизійність та стабільність геометричних параметрів. Сучасні стандарти верстатобудування гарантують високу відтворюваність результатів. Інваріантність відлагодженого програмного коду забезпечує

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

абсолютну ідентичність і точність виробів у межах будь-яких обсягів промислових партій.

– Кінематична гнучкість та мінімізація часу на переналагодження. Переорієнтація технологічної лінії на випуск альтернативної номенклатури виробів реалізується шляхом диверсифікації (заміни) програмного забезпечення та ієколи зміни різального інструменту, що дозволяє раціонально використовувати алгоритми переналагодження обладнання без часових обмежень.

1.3. Огляд систем керування верстатами EMCO

Провідне місце в сегменті високотехнологічного токарного обладнання посідає австрійська компанія EMCO Group [1]. Ефективність функціонування вказаних верстатів безпосередньо залежить від архітектури та функціональних можливостей інтегрованих систем ЧПУ. У токарному обладнанні EMCO реалізовано двовекторний підхід до автоматизації: використання промислових стійок ЧПУ світових лідерів для серійного виробництва та впровадження спеціалізованих модульних систем для гнучкого промислового навчання, що є саме їхньою унікальною особливістю.

На верстатах EMCO переважно застосовуються стійки серій Fanuc 31i-B та 0i-TD [1]. Системи Fanuc орієнтовані на швидкісну та стабільну обробку складних геометричних поверхонь за рахунок використання оптимізованого G-коду. Системи Fanuc відомі високим коефіцієнтом надійності апаратної частини, швидким часом обробки кадрів програми (Block Processing Time) та ефективними алгоритмами компенсації похибок інструменту. Тому в даній роботі ми розглянемо підвищення ефективності токарної обробки на верстатах з ЧПУ EMCO оснащених системою Fanuc.

Серії токарних верстатів EMCO (зокрема, серії EMCOTURN, MAXXTURN та багатоцільові токарно-фрезерні центри HYPERTURN) комплектуються стійками ЧПУ від Siemens (Sinumerik). На сучасних

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

верстатах інтегруються високопродуктивні стійки Sinumerik ONE та Sinumerik 828D [7]. Системи Sinumerik ONE також забезпечують підтримку концепції «цифрового двійника» (Digital Twin) верстата для попередньої симуляції обробки.

Для спеціалізованих циклічних верстатів (наприклад, серії EMCOMAT) виробником передбачено встановлення систем Fagor (зокрема серії 8055T) або Heidenhain, що забезпечує гнучкість конфігурації під конкретні вимоги замовника.

Ще одним унікальним інженерним рішенням EMCO для навчально-виробничих центрів та гнучких лабораторій (лінійка верстатів Concept TURN) є технологія змінного керування на базі програмного забезпечення WinNC [1]. Це ПЗ повністю дублює програмну логіку, екранні форми, параметри інтерфейсу, структуру меню та алгоритми відпрацювання технологічних команд оригінальної стійки. Традиційний підхід до навчання операторів верстатів з ЧПУ вимагає придбання окремого верстата під кожну промислову систему ЧПУ, що економічно недоцільно. Технологія EMCO вирішує цю проблему шляхом програмно-апаратної емуляції. На одному фізичному верстаті можливе моделювання роботи до 9 різних промислових стійок ЧПУ (включаючи Siemens Sinumerik, Fanuc, Heidenhain, Fagor, Mitsubishi).

У межах реалізації концепції «Індустрія 4.0» (Smart Factory), сучасні системи керування токарних верстатів EMCO оснащуються відкритим цифровим асистентом EMCONNECT. Це програмно-апаратний комплекс, що функціонує паралельно з основним ядром ЧПУ (в нашому випадку Fanuc) та виводиться на головну сенсорну панель керування.

Аналіз систем керування токарними верстатами EMCO показав, що використання модульного принципу побудови ЧПУ дозволяє досягти оптимального балансу між експлуатаційними характеристиками та гнучкістю обладнання. Для задач серійного виробництва обґрунтованим є застосування

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

промислових стійок Fanuc, які забезпечують високу швидкість обчислень та надійність при експлуатації.

1.4. Вимоги до конструкції верстатів з ЧПУ

Для точної обробки заготовок деталей на верстатах з ЧПУ необхідна висока точність виготовлення всіх деталей та вузлів і верстата в цілому. Точність верстата визначається точністю виготовлення його деталей і вузлів (особливо напрямних корпусних деталей, що утримують інструмент та задають рух заготовці), точністю виготовлення приводів механізмів, якістю складання верстата, жорсткістю його елементів, зазорами в з'єднаних деталях, умовами тертя в направляючих при переміщенні робочих органів та інших вузлів, призначених для традиційних верстатів [4].

При запуску з місця виконавчий орган починає рух не одночасно з дією керуючого сигналу, а тільки після того, як будуть обрані зазори в передачах, станеться деяка пружна деформація елементів, а зусилля, що впливає на керований орган, перевершить опір сил тертя і різання сил. Дію зазначених факторів особливо важливо враховувати при конструюванні ходових гвинтів – найважливіших ланок передачі до виконавчих органів команд на переміщення. Саме тому в верстатах з ЧПУ використовують кулько-гвинтові пари, які відрізняються високими точністю, зносостійкістю та жорсткістю завдяки застосуванню гайок з попереднім натягом і більшим діаметром ходового гвинта. Останній жорстко кріпиться в осьовому напрямку, для чого використовують опорні підшипники з попереднім натягом.

У верстатах з ЧПУ, порівняно з традиційними верстатами, кінематичні ланцюги, які передають рух від двигуна до виконавчого механізму, значно коротші завдяки застосуванню автономних приводів для всіх робочих рухів. Ці конструктивні особливості дозволяють значно збільшити статичну та динамічну жорсткість приводу. Точність переміщення робочих органів також залежить від точності спрацьовування за часом механізмів зупинки:

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромагнітних муфт, електродвигунів, гальмівних пристроїв. Для зменшення часу гальмування і пуску конструктори прагнуть зменшити махові маси деталей, що обертаються, і електромеханічну постійну часу приводу. Дискретність (кратність імпульсу) – це переміщення механізму, що відповідає одному імпульсу управляючої програми [7]. Дискретність переміщення визначає значення помилки, зумовленої поданням траєкторії руху у цифровій формі. Щоб зменшити цю похибку, доцільно зменшити дискретність. Однак це призводить до збільшення частоти керування для забезпечення необхідної швидкості переміщення. У разі зростання частоти ускладнюється система ЧПУ, привід подач та вимірювальні перетворювачі зворотного зв'язку. Крім того, зниження дискретності не скрізь є виправданим, оскільки система верстат-деталь може вносити суттєво більші похибки. Виходячи з вимог точності та продуктивності у верстатах фрезерної та свердлильної груп у більшості випадків приймається дискретність 10 мкм, для багатоцільових, координатно-розточувальних, шліфувальних, електроерозійних вирізних верстатів 0,5-1 мкм. У токарних та фрезерних верстатах підвищеної точності дискретність не повинна перевищувати 1 мкм.

1.5. Обробка деталей на верстатах з ЧПУ

Сьогодні практично кожне машинобудівне підприємство, що займається механічною обробкою, має у своєму розпорядженні верстати з числовим програмним керуванням – ЧПУ. Верстати з ЧПУ виконують усі ті ж функції, що й звичайні верстати з ручним керуванням, проте переміщення виконавчих органів цих верстатів керуються електронікою [15]. У чому ж основна перевага верстатів з ЧПУ і чому дедалі більше підприємств воліє вкладати гроші саме в сучасне обладнання з автоматичним керуванням, а не купувати відносно дешевші універсальні верстати?

Першим очевидним плюсом від використання верстатів з ЧПУ є вищий рівень автоматизації виробництва. Випадки втручання оператора верстата в

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

процес виготовлення деталі зведені до мінімуму. Верстати з ЧПУ можуть працювати практично автономно, день за днем, тиждень за тижнем, випускаючи продукцію з незмінно високою якістю. При цьому головною турботою верстатника-оператора є переважно підготовчо-заклучні операції: встановлення та зняття деталі, налагодження інструменту тощо. В результаті один працівник може обслуговувати одразу кілька верстатів.

Другою перевагою є виробнича гнучкість [16]. Це означає, що для обробки різних деталей потрібно всього лише замінити програму. А вже перевірена та відпрацьована програма може бути використана в будь-який момент і будь-яку кількість разів.

Третім плюсом є висока точність і повторюваність обробки. За однією і тією ж програмою ви зможете виготовити з необхідною якістю тисячі практично ідентичних деталей. Ну і нарешті, числове програмне управління дозволяє обробляти такі деталі, які неможливо виготовити на звичайному обладнанні. Це деталі зі складною просторовою формою, наприклад, штампи та прес-форми. Варто зазначити, що сама методика роботи за програмою дозволяє точніше передбачати час обробки певної партії деталей і, відповідно, більше завантажувати обладнання. Верстати з ЧПУ коштують досить дорого і вимагають більших витрат на встановлення та обслуговування, ніж звичайні верстати. Проте їхня висока продуктивність може легко перекрити всі витрати за грамотного використання та відповідних обсягів виробництва.

За своєю конструкцією та зовнішнім виглядом верстати з ЧПУ схожі на звичайні універсальні верстати. Єдина зовнішня відмінність цих двох типів верстатів полягає в наявності у верстата з ЧПУ пристрою числового програмного управління, який часто називають стійкою ЧПУ [20]. Числове програмне керування (ЧПУ) – це автоматичне управління верстатом за допомогою комп'ютера (який знаходиться всередині верстата) та програми обробки (управляючої програми).

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Осьовими переміщеннями верстата з ЧПУ керує комп'ютер, який зчитує управляючу програму (УП) і видає команди відповідним двигунам. Двигуни змушують переміщатися виконавчі органи верстата – робочий стіл або колону зі шпинделем. В результаті здійснюється механічна обробка деталі. Давачі, встановлені на напрямних, надсилають інформацію про фактичну позицію виконавчого органу назад у комп'ютер. Це називається зворотним зв'язком. Щойно комп'ютер дізнається про те, що виконавчий орган верстата перебуває в потрібній позиції, він виконує наступне переміщення. Такий процес триває, поки зчитування УП не підійде до кінця.

Отже, підсумовуючи попередні підрозділи, у даній бакалаврській роботі буде розглядатися програмування обладнання на прикладі систем з ЧПУ NC-201 та FANUC 21i та застосування управляючих програм, з можливостями розробки та використання віртуальних моделей токарного обладнання з ЧПУ фірми EMCO [1].

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1. Класифікація систем ЧПУ для металообробних верстатів

Пристрій ЧПУ є центральним вузлом, який координує роботу всіх автоматичних механізмів верстата [3]. Конструктивно це автономний електронний блок, що складається з модуля введення управляючих програм (УП), обчислювального процесора та електричних каналів зв'язку безпосередньо з обладнанням. Ергономіка та зовнішній системи ЧПУ (рисунок 2.1) базуються на його панелі керування (пульті). Вона дозволяє:

- Обирати режими роботи верстата (ручний, налагоджувальний, напіваавтоматичний або автоматичний).
- Редагувати й підлагоджувати програми, а також вводити корекції.
- Моніторити виконання команд, контролювати справність верстата та самої системи ЧПК.

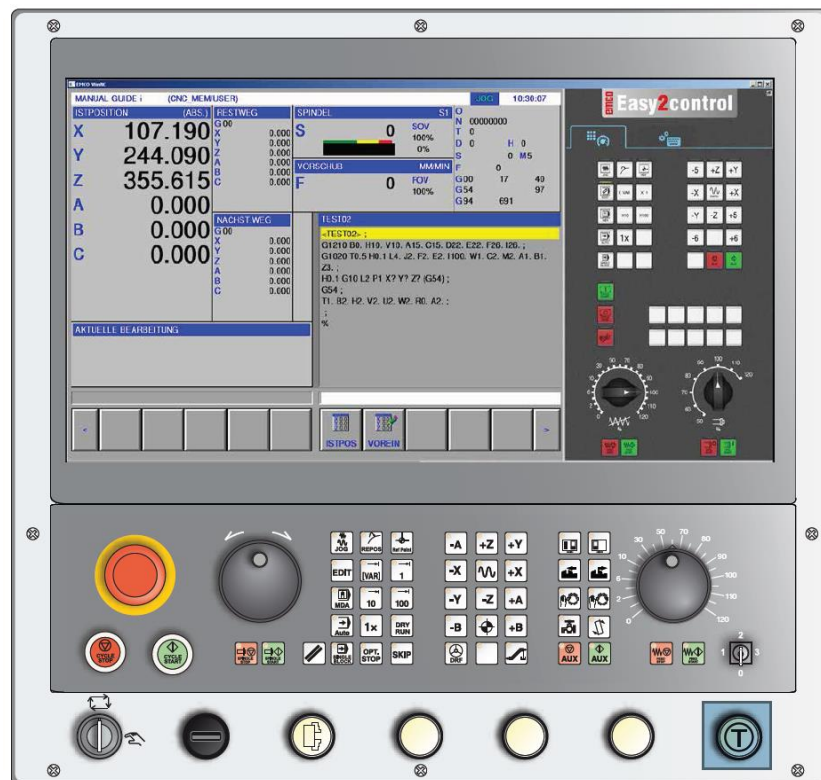


Рисунок 2.2 – Монітор системи ЧПУ токарного верстату

Архітектура пульта залежить від обраної системи програмування, специфіки програмного керування та класу системи ЧПУ. За міжнародними стандартами ЧПУ класифікують за рівнем технічних можливостей на такі базові типи: NC, SNC, CNC, DNC, HNC, VNC та PCNC [7].

Попри складність структурно-інформаційного аналізу таких систем, у них завжди чітко простежуються конкретні функціональні блоки та канали зв'язку. Проте чітка класифікація сучасного обладнання є умовною. На практиці функції різних систем часто інтегруються, утворюючи гібридні комплекси (наприклад, комбінації на базі DNC: DNC-NC, DNC-CNC, або на базі CNC: CNC-HNC тощо).

Верстати, оснащені ЧПУ класів NC і SNC, на сьогодні ще є в практиці підприємств, але випуск систем цих класів уже припинено. Це найпростіші системи керування з обмеженою кількістю інформаційних каналів. У комплектації цих систем відсутня оперативна ЕОМ, і весь об'єм інформації зазвичай замикається на рівні 3-го рангу. Зовнішньою ознакою систем ЧПУ класів NC і SNC є спосіб зчитування та відпрацювання УП.

Головною перевагою систем класу CNC (Комп'ютеризоване числове програмне керування) є їхня висока адаптивність під час експлуатації. Вони дозволяють оперативно редагувати:

- Управляючі програми (УП) для обробки конкретних деталей.
- Внутрішні алгоритми функціонування самої системи ЧПУ для максимального врахування конструктивних та технологічних особливостей верстата.

Програмне забезпечення таких систем має модульну структуру – кожна функція реалізується через окремий комплекс підпрограм. Інтеграцію та гнучку взаємодію всіх апаратних і програмних блоків забезпечує спеціалізоване ядро – загальна координуюча програма-диспетчер.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльна таблиця усіх поколінь систем ЧПУ (таблиця 2.1) чітко показує технічну еволюцію від найпростіших пристроїв до сучасних комп'ютеризованих комплексів [15].

Таблиця 2.1 – Порівняльна таблиця систем ЧПУ

	Повна назва та сутність класу	Технічна база та обробка інформації	Спосіб роботи з програмами (УП)	Стан і сфера застосування
NC (Numerical Control)	Базове числове керування. Перше покоління апаратних систем ЧПК без комп'ютерної пам'яті.	Апаратна логіка (схеми, реле). Оперативна ЕОМ відсутня. Дані замикаються на 3-му ранзі.	Код зчитується з перфострічки кадр за кадром безпосередньо під час обробки. Правки внести неможливо.	Застарілий. Випуск припинено, але рідко ще зустрічаються на підприємствах.
SNC (Stored Numerical Control)	Числове керування з пам'яттю. Модернізація NC з можливістю зберігати дані.	Апаратні блоки з додаванням буферної пам'яті. Повноцінної ЕОМ все ще немає.	Програма зчитується з носія повністю в пам'ять перед пуском. Можливе мінімальне редагування коду.	Застарілий. Більше не випускаються, подекуди досі експлуатуються.
CNC (Computer Numerical Control)	Комп'ютеризоване числове керування. Сучасний стандарт автономного керування.	Повноцінна вбудована оперативна ЕОМ (мікропроцесор). Модульна архітектура під керуванням програми-диспетчера.	Повна свобода дій: написання, тестування, відпрацювання та оперативне внесення корекцій прямо на панелі верстата.	Основний стандарт. Активно виготовляються, є базою для сучасного машинобудування.
DNC (Direct Numerical Control)	Пряме числове керування. Система керування групою верстатів із єдиного центру.	Мережева архітектура. Група верстатів підключається до одного потужного центрального сервера/ЕОМ.	Програми зберігаються на сервері й розподіляються мережею на окремі стійки верстатів (DNC-NC, DNC-CNC тощо).	Актуальний. Використовується на великих автоматизованих підприємствах і цехах.

Продовження таблиці 2.1

HNC (Handled Numerical Control)	Ручне комп'ютеризоване керування. Оперативні системи для спрощеного програмування.	Спеціалізована ЕОМ, орієнтована на швидке введення даних оператором біля верстата.	Програма вводиться вручну безпосередньо на робочому місці у вигляді діалогу (спрощені цикли обробки без складного кодування).	Актуальний. Застосовується на універсальних верстатах у дрібносерійному виробництві.
VNC (Voice Numerical Control)	Голосове числове керування. Експериментальні та спеціальні інтерфейси керування.	Комп'ютерна система розпізнавання мовних команд (може інтегруватися як надбудова над CNC).	Введення команд та коригування параметрів роботи верстата може здійснюватися голосом оператора.	Специфічний. Має обмежене або експериментальне застосування для полегшення праці.
PCNC (Personal Computer Numerical Control)	Керування на базі персонального комп'ютера. Відкрита архітектура.	Звичайний промисловий або ПК загального призначення зі спеціальними платами розширення та ПЗ.	Керування відбувається через стандартні ОС та CAD/CAM-інтерфейси комп'ютера. Максимальна гнучкість оновлення ПЗ.	Дуже популярний. Використовується як на малих виробництвах, так і у високотехнологічних гнучких лініях.

В даній кваліфікаційній роботі буде розглядатися система ЧПУ Fanuc 21 на верстатах з ЧПУ EMCO для підвищення ефективності токарної обробки.

2.2. Мови програмування обробки заготовок на верстатах з ЧПУ

З моменту появи перших верстатів з ЧПУ до впровадження нових багатокординатних обробних центрів з'явилися різні мови для програмування обробки. Сьогодні програмування в G- і M-кодах [20] є найбільш популярним. Мова G- та M-кодів ґрунтується на положеннях «Міжнародної організації зі стандартизації (ISO)» та «Асоціації електронної промисловості (EIA)». Офіційно ця мова вважається стандартом для

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

американських і європейських виробників обладнання з ЧПУ, а іноді його називають «ISO 7 bit». Але деякі виробники систем ЧПУ хоч і дотримуються цих стандартів для опису основних функцій, проте допускають відхилення від правил, коли йдеться про які-небудь спеціальні можливості своєї системи.

Системи ЧПУ Fanuc (Японія) [2] були одними з перших адаптовані під роботу з G- і M-кодами ISO і користуються цим стандартом найбільш повно на сьогоднішній день. В даний час стійки Fanuc є дуже популярними і найбільш розповсюдженими як на світовому ринку, так і в Україні. Стійки ЧПУ інших відомих виробників, наприклад Heidenhain (Німеччина) і Sinumerik (Siemens) (Німеччина), також мають можливість працювати з G- і M-кодами, але деякі коди все ж можуть відрізнятися, хоча не варто цього лякатися. Немає ніякої необхідності знати всі коди всіх систем ЧПУ. Достатньо знати основний набір G- і M-кодів, а про наявну різницю в програмуванні специфічних функцій можна дізнатися з документації до конкретної системи. Оволодівши методиками програмування на Fanuc, швидше за все, можна буде працювати з легкістю працювати на будь-якому іншому обладнанні з ЧПУ. На рисунку 2.3 зображено приблизно оснащення систем ЧПУ для різних верстатів, представлених на світовому ринку.

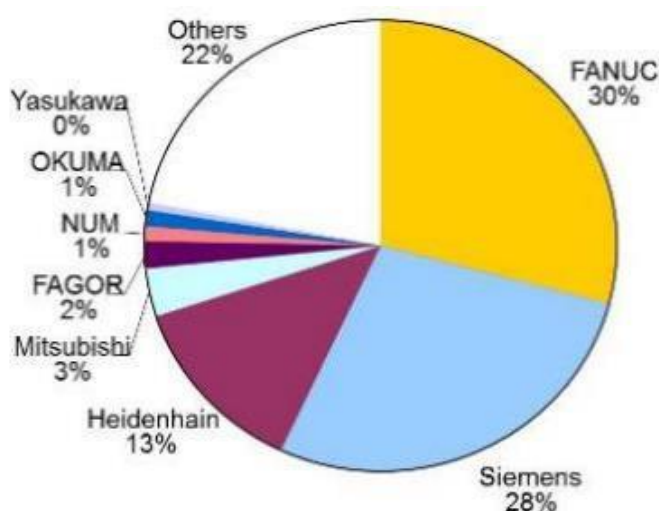


Рисунок 2.3 – Орієнтовна частка верстатів з ЧПУ, оснащених стійками ЧПУ

2.3. Опис стійки ЧПУ EMCO

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Система ЧПУ EMCO є високотехнологічним інтегрованим рішенням, створеним на базі мікропроцесорної архітектури та адаптованим компанією для навчальних і промислових токарних верстатів (серій Concept Turn та PC Turn). Дана стійка (рисунок 2.4) керування забезпечує високу точність обробки, підтримує одночасне керування двома осями (X та Z) у базовій конфігурації з дискретністю до 0.001 мм та опціонально дозволяє управляти додатковими осями (наприклад, віссю C та приводним інструментом) за допомогою РМС-контролера. Апаратна частина стійки ЧПУ EMCO для токарної обробки побудована на базі промислового мікропроцесора та SMD-технологій [12], що гарантує високу надійність обчислень та високу безвідмовність.

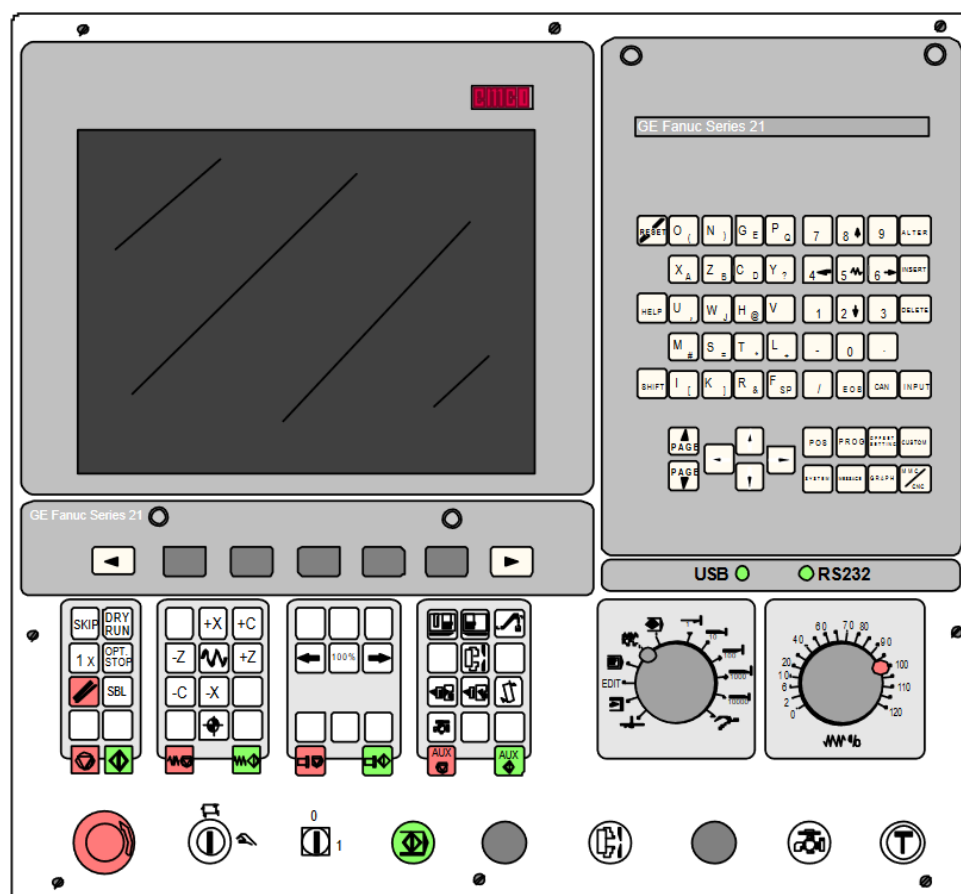


Рисунок 2.4 – Стійка Fanuc верстата з ЧПУ фірми EMCO

Основними компонентами інтерфейсу стійки оператора є [2]:

– Головний екран візуалізації. Це чорно-білий або кольоровий TFT/CRT-дисплей для відображення графічної траєкторії, координат, тексту УП та інших параметрів.

– Основна клавіатура CNC. Представляє алфавітно-цифрову панель для введення G-кодів, модифікації параметрів та навігації системи.

– Панель оператора. Це блок перемикачів для ручного керування верстатом (старт/стоп шпинделя, переміщення по різних осях, тумблери корекції подачі Feed Rate та обертів Spindle Override).

У виконанні від EMCO система ЧПУ функціонує за технологією інтерактивного симулятора програмного забезпечення WinNC [1], який повністю дублює інтерфейс та логіку оригінального промислового контролера.

2.4. Робота на стійці верстата з ЧПУ EMCO із системою FANUC

Для забезпечення повного циклу підготовки, налаштування та виконання обробки в системі реалізовано шість базових режимів роботи [1]:

– EDIT (Редагування). Служує для створення, введення з зовнішніх носіїв та модифікація управляючих програм.

– MEM/AUTO (Автоматичний режим). В ньому відпрацювання УП відбувається в автоматичному циклі з пам'яті системи ЧПУ.

– MDI (Ручне введення даних). Існує для введення та одноразове виконання окремих кадрів або команд (наприклад, запуск шпинделя M03 S1000 або зміна інструменту T0101).

– JOG (Ручне керування). Здійснюється переміщення супорта верстата вздовж робочих осей за допомогою клавіш або джойстика на панелі оператора.

– HND/INC (Електронний маховичок). Відтворює точне позиціонування виконавчих органів з кроком 1, 10 або 100 мікрон за допомогою ручного генератора імпульсів.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– REF (Вихід у нуль). Відбувається автоматичне переміщення робочих органів верстата у вихідну (референтну) точку верстата (Machine Zero) для ініціалізації системи координат.

На рисунку 2.5. представлено опорні точки в робочій зоні токарного верстата з ЧПУ EMCO.

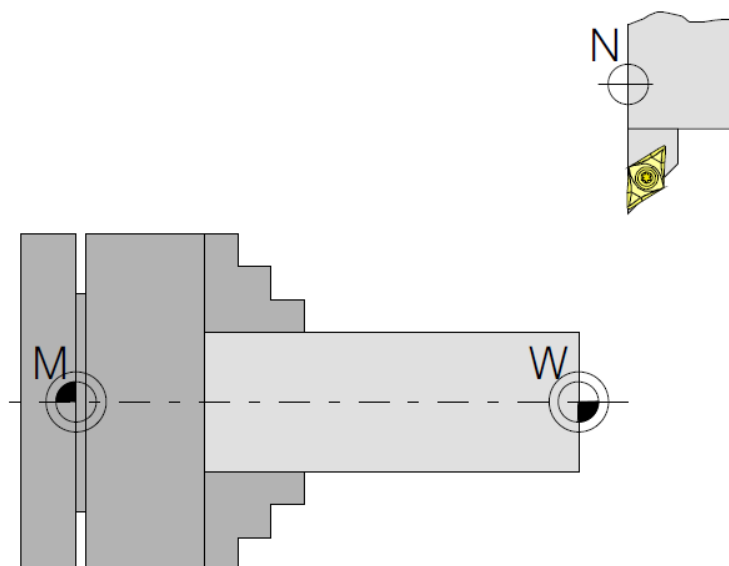


Рисунок 2.5 – Опорні точки при обробці токарних верстата з ЧПУ EMCO

М – нульова точка верстата Незмінна опорна точка, установлена виробником верстата. Виходячи з цієї точки, вимірюються увесь робочий простір верстата. Одночасно точка М є початком системи координат. R – опорна точка. Положення в робочій зоні верстата, яке точно визначається кінцевими давачами. Положення рухомих елементів повідомляються системі керування, коли рухомі елементи наближаються до R. Необхідно також після кожного відключення живлення переводити верстат у цю точку. N – опорна точка закріплення інструменту. Початкова точка відліку для вимірювання інструментів. N знаходиться у відповідній точці на системі тримачів інструменту та установлюється виробником верстата.

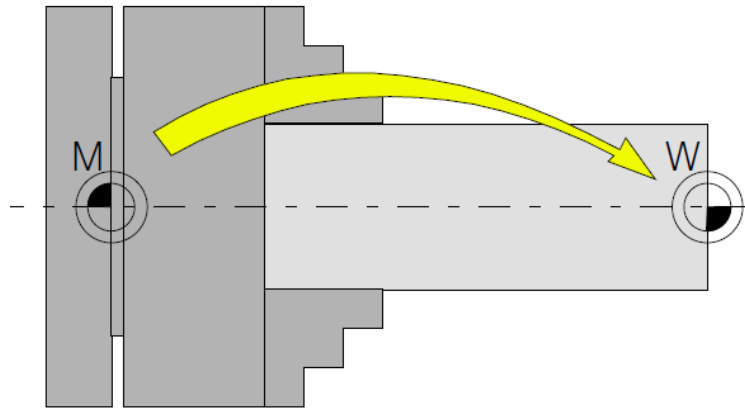


Рисунок 2.6 – Зміщення нуля від початкової точки верстата М до нульової точки заготовки W

У токарних верстатах EMCO нуль верстата М знаходиться на осі обертання та на торці фланця шпинделя. Це положення не підходить як початкова точка для визначення розмірів. За допомогою так званого зміщення нуля (рисунок 2.6) систему координат можна перемістити у відповідну точку в робочій зоні верстата. Регістр зміщення пропонує одне регульоване зміщення нуля. Коли ми визначаємо значення в регістрі зміщення, це значення буде враховано під час запуску програми, і нульова точка координат буде зміщена від нульової точки верстата М до нульової точки заготовки W. Нульову точку заготовки можна змістити в програмі за допомогою коду G92 – «Налаштування системи координат» на будь-яке значення. На роботі це часто можна зробити за допомогою команди G10 – «Налаштування даних».

Абсолютні координати відносяться до фіксованого положення, приростні координати – до положення токарного верстата. Значення в дужках для Z, -Z, U, -U є дійсними для PC TURN, оскільки ріжучий інструмент знаходиться перед токарним центром на верстатах такого типу. Координата X лежить у напрямках поперечного переміщення, а координата Z – у напрямку поздовжнього переміщення. Значення координат у мінусових

напрямках описують рухи інструментальної системи до заготовки. Значення в плюсовому напрямку від заготовки.

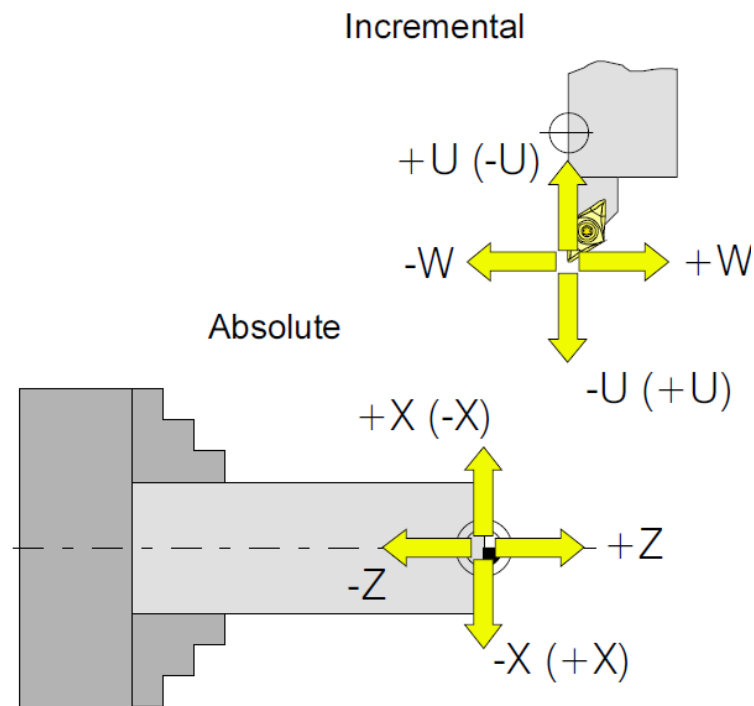


Рисунок 2.7 – Система координат верстата

У системі координат для програмування абсолютних значень початок лежить у нульовій точці верстата М або в нульовій точці заготовки W після запрограмованого зміщення нуля. Усі цільові точки описуються з початку системи координат шляхом введення відповідних відстаней X та Z. Відстані X позначені як діаметр. Це показано на рисунку 2.7

Вбудований модуль GRAPH у системі EMC0 Fanuc 21 відповідає за попереднє графічне тестування програм. Завдяки візуалізації траєкторії різання в координатах X-Z, оператор може виявити синтаксичні та геометричні помилки перед початком роботи. Чітке розмежування швидкого ходу (G00) і робочої подачі лініями різного типу допомагає уникнути аварій та пошкодження обладнання.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМУВАННЯ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ

3.1. Структура програми та опис команд

Робота верстатів із ЧПУ, в нашому випадку EMCO CONCEPT TURN з системою ЧПУ Fanuc (рисунок 3.1), програмується за стандартами «ISO 6983» та «DIN 66025 (ISO-7bit)». Управляюча програма зберігається в пам'яті системи як послідовність кодів. Комп'ютер покроково зчитує та перевіряє ці кадри, автоматично надсилаючи відповідні сигнали на виконавчі органи верстата для обробки заданої деталі. УП ЧПУ складається з [6]: номера програми; кадрів УП; слів; адрес; комбінацій чисел (для адрес осей, частково зі знаком «+» або «-») Таблиця основних G та M кодів, а також основних адрес представлена в додатку А.



Рисунок 3.1 – Багатофункціональний токарний верстат з ЧПУ EMCO CONCEPT TURN

Під час встановлення програмного забезпечення ми можемо вибрати визначення команди А, В або С. Різниця різними між версіями ПЗ полягає лише в коді команди, а не у функції команди. Зазвичай описується лише визначення команди С (європейський стандарт). Якщо ми використовуємо

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

визначення команди A або B, то коди в описі команди будуть аналогічними. Інкрементне програмування токарної обробки на верстатах з ЧПУ ЕМСО у версії А завжди виконується за допомогою U та W (як і в нашому випадку), рухи відведення завжди відбуваються до початкової площини.

Далі розглянемо опис G-команд для конкретних деталей, а саме абсолютні та інкрементні показники для G00 (рисунок 3.2). Супорти верстата переміщуються з максимальною швидкістю до запрограмованої цільової точки. Інкременті та абсолютні команди можна використовувати одночасно. Запрограмована подача F буде автоматично вибрана під час виконання G00. Максимальна подача визначається виробником верстата, а перемикання корекції подачі обмежена на 100%.

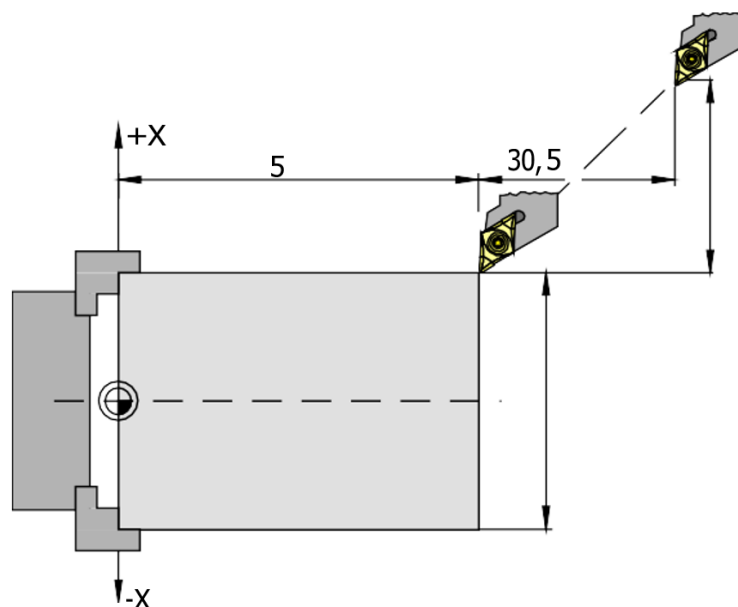


Рисунок 3.2 – Абсолютні та інкрементні розміри для G00

Інкрементні показники – це показники, які відображають зміни (додатковий приріст, переміщення, позиції), що відбулися порівняно з попереднім періодом, базовим значенням або внаслідок конкретної дії [5].

Лінійні рухи переміщення, або лінійна інтерполяція (точіння торців, повздовжнє точіння, точіння конусів) із запрограмованою швидкістю подачі відбувається згідно рисунку 3.3.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

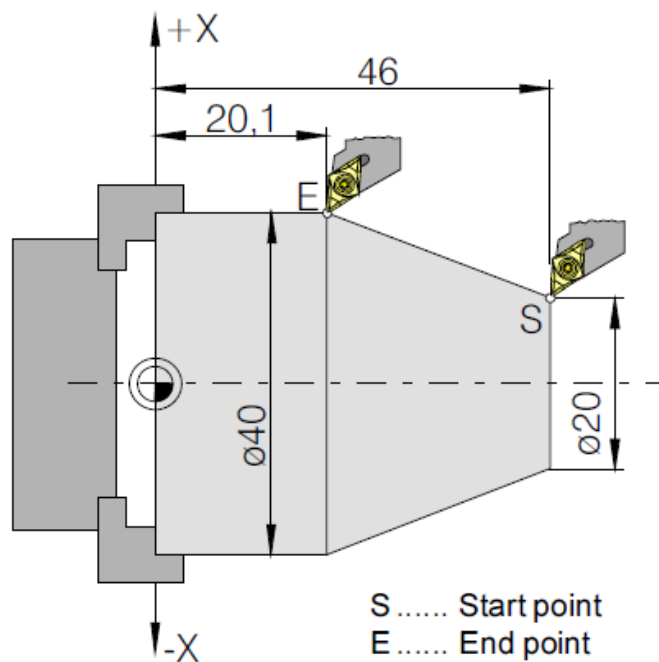


Рисунок 3.3 – Лінійна інтерполяція при токарній обробці

Приклад коду програми:

G90 в абсолютних розмірах

N50 G00 X40 Z56

G91 в розмірах з приростом

N50 G00 U-30 W-30.5

Абсолютні та інкрементні розміри для

G01

G01 Лінійна інтерполяція (подача)

Формат:

N... G01 X(U)... Z(W)... F...

Приклад програми для лінійного переміщення напрямних (точіння торців, повздовжнє точіння, точіння конусів) із запрограмованою швидкістю подачі

G90 в абсолютних розмірах N.. G95

N20 G01 X40 Z20.1 F0.1

G91 в розмірах з приростом

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

N.. G95 F0.1

N20 G01 X20 W-25.9

За допомогою даних кодів програм можна підвищити швидкість обробки, без зменшення показників якості поверхні.

3.2. Обробка фасок та скруглень

Фаски та скруглення можна виконувати лише між двома блоками рухів G00/G01. Рух, запрограмований у другому блоці, має починатися з точки b (рисунок 3.4). При інкрементному програмуванні необхідно запрограмувати відстань від точки b. У режимі поблочного програмування інструмент спочатку зупиняється в точці c, а потім у точці d. Якщо рухи в одному з блоків настільки короткі, що при вставці фаски або радіуса немає точки перетину, виникає попередження про помилку № 055.

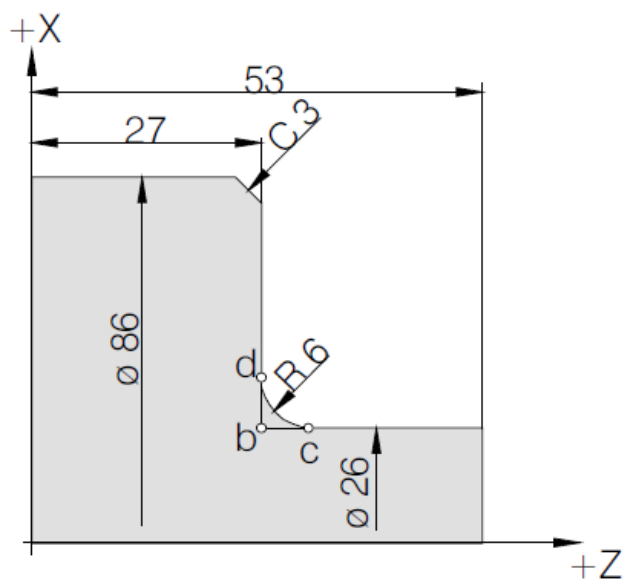


Рисунок 3.4 – Оброблення фасок та скруглень

Приклад коду програми:

N95 G01 X26 Z53

N100 G01 X26 Z27 R6

N95 G01 X86 Z27 C3

N95 G01 X86 Z0

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

3.3. Пряме введення креслення

При програмуванні верстатів з ЧПУ ЕМСО для обробки деталей за готовими кресленнями немає необхідності обчислювати координати відсутньої точки перетину. У програмах можливе пряме програмування кутів (A), фасок (C) та закруглень (R). Команди і рухи інструменту показані на рисунку 3.5.

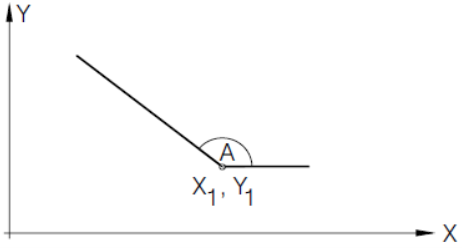
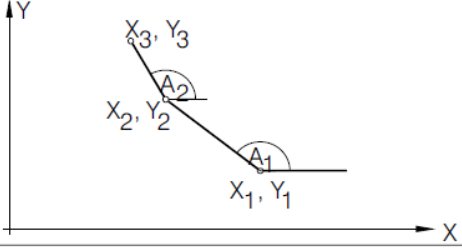
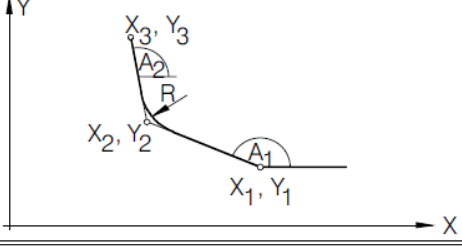
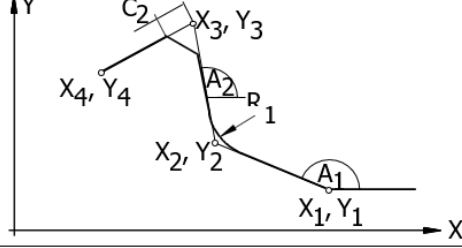
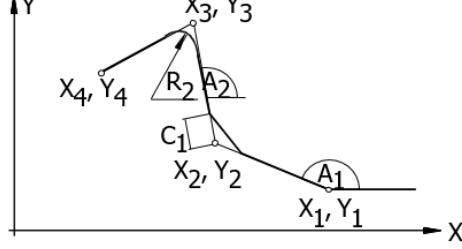
	commands	tool movements
1	$X_2... (Z_2...) A...$ <i>Note: Bright printed commands are only used with the option luxury programing.</i>	
2	$A_1... X_3... Z_3... A_2...$	
3	$X_2... Z_2... R...$ $X_3... Z_3...$ oder $A_1... R...$ $X_3... Z_3... A_2...$	
7	$X_2... Z_2... R_1...$ $X_3... Z_3... C_2...$ $X_4... Z_4...$ or $A_1... R_1...$ $X_3... Z_3... A_2... C_2...$ $X_4... Z_4...$	
8	$X_2... Z_2... C_1...$ $X_3... Z_3... R_2...$ $X_4... Z_4...$ or $A_1... C_1...$ $X_3... Z_3... A_2... R_2...$ $X_4... Z_4...$	

Рисунок 3.5 – пряме програмування кутів, фасок та скруглень

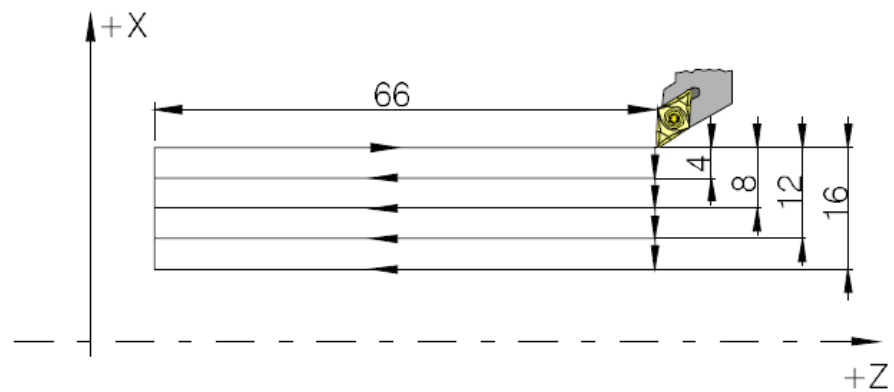


Рисунок 3.7 – Цикл повздовжнього токарного оброблення G20

Приклад коду програми:

N110 G91

.....

N110 G20 U-4 W-66 F0.18

N115 U-8

N120 U-12

N125 U-16

N130 G00

.....

3.5. Цикл торцевого точіння та нарізування різей

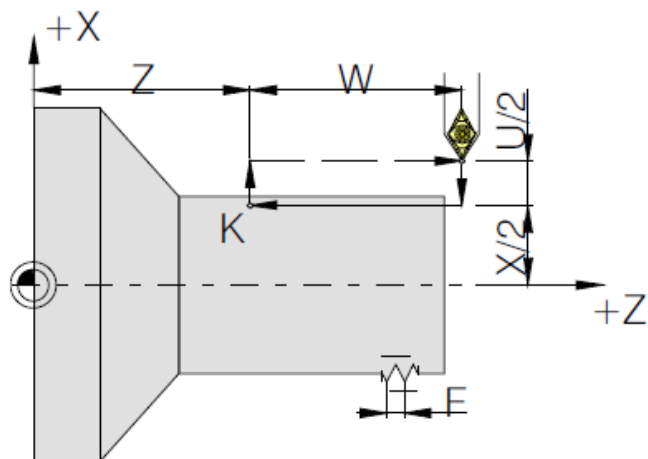


Рисунок 3.7 – Цикл нарізування різі

Цей цикл також є модальним, і відрізняється тільки команда G від тієї ж групи. Для наступних кадрів, необхідно програмувати тільки змінені координати (рисунок 3.7)

Приклад циклу для нарізування різі:

N... G33 X(U)... Z(W)... F..., де F – крок різі (мм)

Можливість виконання прямої або гвинтової різі без автоматичного повернення до початкової точки, бажано застосовувати множинний цикл нарізання різі. Також можливе використання даної програми обробки для операцій накатування або вигладжування поверхонь типу накатка. При нарізуванні конусної різі крок різі повинен визначатися великим значенням по осі X або Z.

3.6. Компенсація радіуса різця

Під час виконання вимірювань інструмента, його вершина вимірюється лише у двох точках (дотик осей X і Z). Корекція на інструмент описує теоретичну вершину різця. Ця точка переміщається по оброблюваній деталі згідно запрограмованої траєкторії.

При русі у бік однієї осі (подовжнє і торцеве точіння) використовуються точки на вершині інструменту, що дотичні осі. Тобто, ніякі похибки розмірів не переносяться на деталь. При одночасному русі у напрямках обох осей (конус, закруглення) позиція теоретичної вершини інструменту збігається з точкою на вершині різця, виконує фактичне різання. Це призводить до утворення розмірних похибок деталі. Максимальна можлива розмірна похибка без корекції на радіус різця при русі 45°: Радіус вершини різця має становити 0,4 -0,16 мм відстані траєкторії 0,24 мм по осях X і Z. Якщо використовується корекція на радіус різця, такі розмірні похибки автоматично обчислюються та компенсуються системою керування.

Для корекції радіуса різця необхідно ввести радіус різця R (рисунок 3.8) і положення T при введенні даних інструмента.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

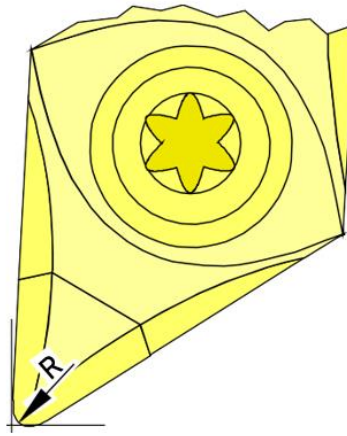


Рисунок 3.8 – Радіус вершини різця

Для оброблення скруглень завжди буде здійснюватися наближення до дотичної до кінцевої або початкової точки дуги. Шлях наближення до контуру та шлях відходу від контуру повинні бути більшими за радіус кінчика інструмента R , інакше програма переривається (виникає помилка). Якщо елементи контуру менші за радіус вершини інструмента R , то можуть виникнути порушення контуру. Програмне забезпечення обчислює три блоки вперед, щоб розпізнати ці порушення контуру та перервати програму з відповідними сигналами на головному екрані. Траєкторії рух інструменту з активованою/відміненою автоматичною корекцією на радіус інструмента можуть здійснюють точну обробку, проте не у всіх випадках.

Підсумовуючи вище описані методи програмування обробки різних поверхонь на верстаті з ЧПУ ЕМСО (стійка Fanuc) з підвищенням продуктивності обробки, внаслідок оптимізації управляючих програм є актуальною задачею для усіх металообробних підприємств.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при роботі на верстатах з ЧПУ EMCО

Продуктивність токарних робіт на токарному обладнанні EMCО із системою ЧПУ Fanuc підвищують через оптимізацію інструментального забезпечення, модернізацію управляючих програм та форсування режимів різання. Оскільки такі заходи посилюють ризики травматизму (механічного й електричного походження), особливу увагу слід приділяти жорсткому контролю за дотриманням вимог охорони праці [8]. Підвищення ефективності токарної обробки на високоточних верстатах компанії EMCО (наприклад, серій EmcoTurn або Hyperturn), оснащених мікропроцесорними системами ЧПУ Fanuc, базується на комплексному інженерному підході, який поєднує оптимізацію технологічних параметрів, модернізацію інструментального оснащення та жорсткий контроль за промисловою безпекою, зокрема пожежною та електробезпекою та виробничими факторами, щодо безпеки. Відповідно, вимоги охорони праці під час виконання робіт на металообробних верстатах токарної групи викладені у «Правилах охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями» (НПАОП-0.00-1.71-13).

Всі верстати з ЧПУ небезпечні через обертові ріжучі інструменти, ремені і шківи, високу напругу, шум і стиснене повітря [9]. При використанні верстатів з ЧПУ та їхніх частин завжди слід дотримуватися основних правил безпеки, щоб зменшити ризик травмування оператора та механічного пошкодження верстату.

Щоб працювати за верстатом безпечно, потрібно забезпечити хороше освітлення на робочому місці та в зонах технічного обслуговування,

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

забезпечивши правильну вентиляцію приміщень. За це відповідає безпосередньо підприємство та особи, на яких покладено обов'язки інженера з охорони праці [17]. Оператор повинен сам захистити себе від порізів, впливу хімікатів або підняття важкого, використовуючи спецодяг та пройшовши інструктаж з техніки безпеки. Верстат необхідно регулярно чистити під час роботи та перед ремонтом. Для прибирання стружки й бруду є спеціальні шланги та конвеєри, але користуватися ними можна лише після навчання та в захисному спорядженні.

Під час роботи на токарних верстатах з ЧПУ EMCO на оператора можуть впливати такі фактори [18]:

- Механічні – рухомі частини верстата (шпиндель, револьверна головка, допоміжна технологічна оснастка), відлітаюча стружка та елементи інструменту.
- Електричні. Це напруга в силових лініях верстата та шафі керування FANUC (до 380 В) із загальною споживаною потужністю до 15-30 кВА.
- Термічні. Це висока температура зони різання, нагріта стружка та деталі.
- Хімічні. Вони чинять негативний вплив на людський організм при контактуванні з ними. Це можуть бути аерозолі, пари та туман мастильно-охолоджувальних рідин, які викликають в майбутньому хронічні виробничі захворювання.
- Фізичні. Це є підвищений рівень шуму від шпиндельного вузла та/або інших його вузлів та вібрація при високошвидкісному різанні.

4.2. Безпека під час виконання технологічних процесів

До роботи на верстатах з ЧПУ допускаються особи, які пройшли спеціальне навчання, інструктаж з охорони праці, відповідно до вимог Державної служби України з питань праці [2] та мають навички роботи з системами ЧПУ Fanuc, або відповідні професійні розряди. Оператор верстату

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

з ЧПУ зобов'язаний працювати у спецодязі. Забороняється працювати в рукавичках, з розпущеним волоссям, у прикрасах або з вільними елементами одягу. Використання захисних окулярів є обов'язковими протягом усього часу роботи.

Так, перед початком роботи на відповідному обладнанні проводиться перевірка його вузлів. Перед увімкненням необхідно візуально перевірити справність захисних огорожень, блокування дверей та переконатися у відсутності сторонніх предметів у робочій зоні верстата. Оператор також має перевірити рівень мастила в напрямних, а також наявність достатнього тиску в системі подачі мастильно-охолоджувальної рідини та у пневматичних системах верстата [16]. Після завантаження стійки ЧПУ Fanuc перевірити справність вентиляторів охолодження електрошафи та відсутність повідомлень про помилки на головному екрані.

Під час виконання технологічних процесів на токарному верстаті з ЧПУ ЕМСО слід безпечно дотримуватись рекомендацій та інструкцій виробника, щодо дотримання правил безпечного та правильного користування обладнанням [1]. Перед увімкненням необхідно візуально перевірити справність захисних огорожень, блокувань дверей та переконатися у відсутності сторонніх предметів у робочій зоні верстата. Перед першим запуском автоматичного циклу (режим auto) перевірити програму на симуляторі або виконати холостий (сухий) хід, так званий Dry Run. Встановлення та зняття заготовок та підбір різального, або вимірювального інструменту слід проводити лише при повній зупинці обертання шпинделя. Кулачки патрона не повинні виступати за межі його діаметра. Під час програмування обертів слід пам'ятати про обмеження, закладені в технології токарної обробки. Для забезпечення розрахункової швидкості різання V , слід скористуватися формулою:

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

де, D – діаметр заготовки, n – частота обертання шпинделя.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Категорично забороняється відчиняти захисні дверцята верстата ЕМСО до повної зупинки головного приводу. Автоматичне блокування дверей має бути справним, відповідно давачі сигналів закриття дверцят мають бути завжди підключеними.

Оператор верстату повинен добре орієнтуватися на панелі керування верстатом ЕМСО. Кнопка аварійної зупинки (E-Stop) повинна знаходитися в зоні швидкого доступу для миттєвої реакції у разі виникнення нештатної ситуації, наприклад, вібрації, поломки різця, невідповідності траєкторії. Видалення гарячої металевої стружки здійснюється виключно спеціальними гачками або щітками, коли шпиндель нерухомий. Забороняється здувати стружку стисненим повітрям, за допомогою додаткових компресорів. Для цього слід використовувати спеціальні щітки, або гачки лише після повної зупинки шпинделя, або інших рухових вузлів верстата. Забороняється самовільно змінювати параметри електроприводів або міняти налаштування сервомоторів через пульт. Корекцію подачі (Feed Override) та швидкості шпинделя (Spindle Override) під час першого проходу зменшувати до безпечних значень, наприклад на 10-50 % [1].

У разі виникнення аварійної ситуації (загоряння, поломка різця, виліт заготовки, поява нетипового шуму чи запаху горілої ізоляції) необхідно негайно натиснути кнопку аварійного вимкнення та знеструмити верстат. При одержанні травми чи інших фізичних пошкоджень слід надати першу домедичну допомогу та сповістити керівника робіт або майстра виробничого цеху.

4.3. Інженерні розрахунки забезпечення безпечних умов праці

Проведемо розрахунок загальнообмінної вентиляції. При інтенсивній токарній обробці з використанням мастильно-охолоджувальних рідин виділяються шкідливі аерозолі. Розрахунок необхідного повітрообміну L , м^3 , ведеться за кількістю виділених шкідливих речовин для розбавлення їх до

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

гранично допустимої концентрації (ГДК) [9].

Вихідними даними є: Кількість парів аерозолі МОР, які виділяється при обробці $G = 1200$ мг/год; ГДК аерозолі МОР у повітрі робочої зони (згідно з ДСТУ) $C_{ГДК} = 5$ мг/м³;

Концентрація шкідливої дози у припливному повітрі:

$$C_{пр} = 0,3 \cdot C_{ГДК} = 0,3 \cdot 5 = 1,5 \text{ мг/м}^3;$$

тоді, допустимий необхідний повітрообмін буде:

$$L = \frac{G}{C_{ГДК} - C_{пр}}$$
$$L = \frac{1200}{5 - 1,5} = \frac{1200}{3,5} \approx 342,86 \text{ м}^3/\text{год}$$

Приймаємо продуктивність вентиляційної установки з коефіцієнтом запасу $k = 1,2$

$$L_{необх} = 342,86 \times 1,2 \approx 411,4 \text{ м}^3/\text{год}$$

Далі проведемо розрахунок штучного освітлення робочого місця. Токарні роботи на верстатах з ЧПУ належать до робіт високої точності (розряд зорової роботи — III). Розрахунок кількості світильників виконується методом коефіцієнта використання світлового потоку.

Вихідними даними є: унормована освітленість для розряду III р.з.р.: $E_{норм} = 300$ ЛК (загальне освітлення); площа цеху (робочої ділянки верстата): $S = 24$ м² (для необхідних робочих габаритів встановлення верстата з ЧПУ ЕМСО потрібно $6 \cdot 4$ м); коефіцієнт запасу для машинобудівних цехів $k_3 = 1,5$; коефіцієнт нерівномірності освітлення $z = 1,5$; коефіцієнт використання світлового потоку (для світлих стін та стелі) $\eta = 0,48$; світловий потік однієї світлодіодної лампи (потужністю 18 Вт) $\Phi = 1800$ лм

Рівень загального світлового потоку буде F_{Σ} буде:

$$F_{\Sigma} = \frac{E_{норм} \times S \times k_3 \times z}{\eta}$$

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставивши числові дані отримуємо:

$$F_{\Sigma} = \frac{300 \times 24 \times 1.5 \times 1.15}{0.48} = \frac{12420}{0.48} = 25875 \text{ лм}$$

Визначаємо кількість світильників:

$$N = \frac{F_{\Sigma}}{\Phi} = \frac{25875}{1800} \approx 14.37$$

Приймаємо до встановлення 14 світильників розміщених симетрично двома рядами по 7 шт. (рисунок 4.1), що забезпечить належний рівень освітленості пульта FANUC та робочої зони верстата з ЧПУ EMCO. Тип світильників, які будуть використані – промислові світлодіодні (LED) пілота вологозахищені світильники (клас захисту не нижче IP65 через можливість виникнення туману від МОР). Висота монтажу світильників буде $h = 3,2$ м., від рівня підлоги, що виключає засліплення оператора при роботі з ЧПУ FANUC та забезпечує коефіцієнт пульсації світла менше 10%.

$$L_x = \frac{6.0 - (2 \times 0.5)}{6} \approx 0.83 \text{ м.}$$

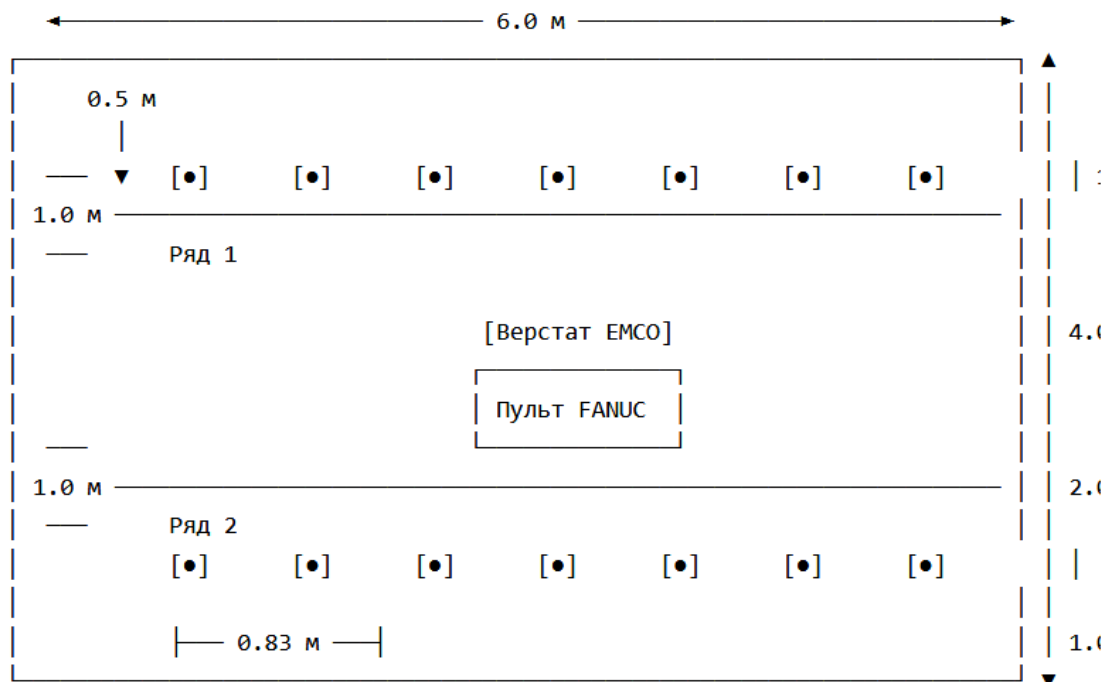


Рисунок 4.1 – Схема розміщення світильників штучного освітлення

Також виконаємо розрахунок захисного заземлення верстата. Для захисту оператора від ураження струмом при пробії ізоляції на корпус верстата ЕМСО розраховується контурне захисне заземлення. Верстат живиться від мережі 380 В із глухозаземленою нейтраллю. Нормований опір заземлювального пристрою, відповідно до $R_{\text{доп}} \leq 4 \text{ Ом}$.

Вихідними даними є: Заземлювачі: вертикальні сталеві стержні діаметром $d = 20 \text{ мм.}$, і довжиною $l = 2,5 \text{ м.}$; глибина закладання вершини стержня $h_0 = 0,7 \text{ м.}$; питомий опір ґрунту (з урахуванням кліматичного коефіцієнта) $\rho_{\text{розр}} = 60 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$

Порахуємо опір одиничного вертикального заземлювача $R_{\text{в}}$

$$R_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{розр}}}{2\pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h + l}{4h - l} \right)$$

$$h = h_0 + \frac{l}{2} = 0.7 + \frac{2.5}{2} = 1.95 \text{ м.}$$

Підставивши відповідні числові значення отримаємо:

$$R_{\text{в}} = \frac{60}{2 \times 3.14 \times 2.5} \cdot \left(\ln \frac{5}{0.02} + \frac{1}{2} \ln \frac{4(1.95) + 2.5}{4(1.95) - 2.5} \right)$$

$$R_{\text{в}} \approx 3.82 \times \left(\ln(250) + \frac{1}{2} \ln \frac{10.3}{5.3} \right) \approx 3.82 \times (5.52 + 0.33) \approx 22.35 \text{ Ом}$$

Визначаємо кількість вертикальних заземлювачів $n_{\text{в}}$, $\eta_{\text{в}} = 0,9$

$$n_{\text{в}} = \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{доп}} \times \eta_{\text{в}}} = \frac{22.35}{4 \times 0.9} = \frac{22.35}{3.6} \approx 6.2$$

Приймаємо до встановлення 7 вертикальних стержнів, з'єднаних сталевією половою по контуру, що повністю гарантує безпеку системи ЧПУ FANUC та силових приводів верстату з ЧПУ ЕМСО від витоків струму. Детальна схема контурів захисного заземлення верстата ЕМСО представлена на рисунку 4.2.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

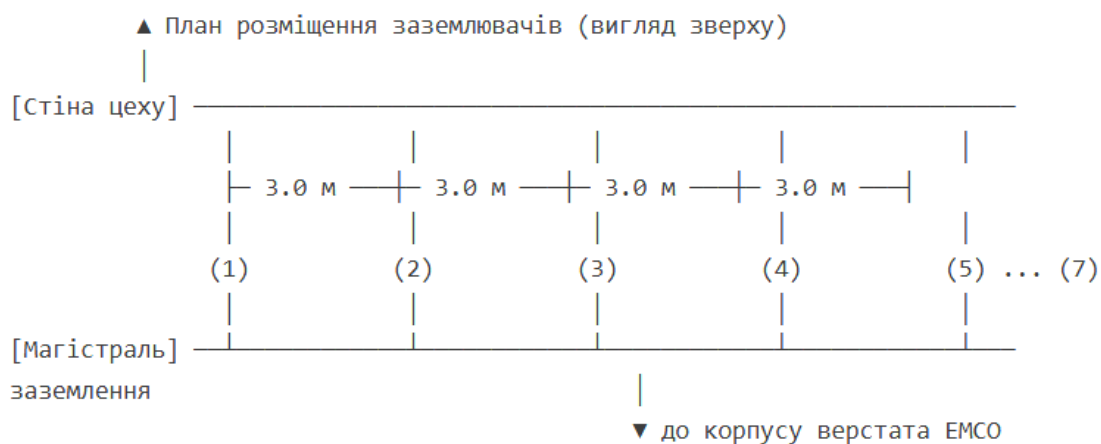


Рисунок 4.2 – Схема контуру захисного заземлення верстата EMCO

Для правильного та безпечного заземлення верстату зроблено наступне. Від контуру виведено два незалежних заземлювальних провідники до головної заземлювальної шини (ГЗШ) у шафі керування FANUC та безпосередньо до станини верстата EMCO.

В даному розділі кваліфікаційної роботи проаналізовано небезпечні виробничі фактори при роботі на верстатах з ЧПУ токарної групи з інженерними розрахунками забезпечення безпечних умов праці, зокрема освітлення, заземлення та вентиляції.

ВИСНОВКИ

У даній випускній кваліфікаційній роботі вирішено актуальне практичне завдання щодо підвищення ефективності токарної обробки деталей на верстатах з ЧПУ EMCO, оснащених системами керування FANUC.

В першому розділі проведено аналіз сучасного стану виробництва та виявлено, що основними резервами підвищення продуктивності верстатів EMCO є оптимізація режимів різання, скорочення допоміжного часу, а також максимальне використання технологічних можливостей системи ЧПУ Fanuc. Здійснено комплексний аналіз теоретичних та практичних аспектів функціонування, проектування та експлуатації технологічного обладнання з числовим програмним керуванням ЧПУ.

У другому розділі детально досліджено архітектуру, програмне забезпечення та практичні аспекти експлуатації систем числового програмного керування токарним обладнанням з ЧПУ фірми EMCO.

У третьому розділі детально розглянуто практичні та алгоритмічні аспекти розробки управляючих програм для токарного оброблення на верстатах з ЧПУ та наведено рекомендації з їх оптимізації для вдосконалення технологічних процесів токарного оброблення деталей. Використання розширеного функціоналу програмування стійки EMCO/Fanuc (цикли, компенсації, пряме введення) дозволяє мінімізувати ручні розрахунки, виключити людські помилки, суттєво скоротити час на підготовку виробництва та забезпечити повну відповідність виготовленої деталі вимогам креслення.

У розділі з охорони праці проведено комплексний аналіз умов праці, ідентифіковано потенційні ризики та розроблено заходи з охорони праці й техніки безпеки при експлуатації верстатів з ЧПУ EMCO. Розроблений комплекс інженерно-технічних та організаційних заходів мінімізує вплив

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

шкідливих факторів та повністю виключає виробничий травматизм. Це гарантує створення безпечних і комфортних умов праці для обслуговуючого персоналу під час роботи.

Таким чином, інтеграція токарних верстатів з ЧПУ, зокрема лінійки ЕМСО є необхідною умовою для модернізації сучасного виробництва. Отримані результати аналізу є теоретичним підґрунтям для подальшого проєктування технологічних процесів або модернізації вузлів обладнання у наступних роботах.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EMCO Lathes & Milling Machines Manufacturer. URL: <https://www.emco-world.com/en/> (дата звернення: 10.04.2026).
2. Suk-Hwan Suh, Seong-Kyoon Kang, Dae-Hyuk Chung, Ian Stroud Theory and Design of CNC Systems. Springer-Verlag London Limit., 2008. 477 p.
3. Бондаренко С. Г. Основи технології машинобудування : навчальний посібник / С. Г. Бондаренко – Львів : Магнолія, 2018. – 500 с.
4. Бочков В.М. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів: Підручник. / В.М. Бочков, Р.І. Сілін, О.В. Гаврильченко. За ред. Р.І. Сіліна. – Львів: Видавництво «Бескид Бід», 2008. – 448с.
5. Бурек Я. Верстатне обладнання : навч. посіб. / Я. Бурек, І.В. Гурей, З.А. Стоцько – Львів: Вид-во ун-ту «Львівська політехніка», 2014. – 168 с.
6. Валецький Б.П., Четвержук Т.І., Єрьомін В.А., Шимчук С.П. Інжиніринг планетарного редуктора у SOLIDWORKS. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2025. №81. – С. 127-132. DOI: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2025.81.19>.
7. Дмитрієв Ю.О., Мацулевич О.Є., Щербина В.М., Холодняк Ю.В. Проектування керуючих програм для верстатів токарної групи з пристроєм числового програмного керування: навчальний посібник. – Мелітополь: Люкс 2018. – 132 с.
8. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять.
9. ДСТУ ISO 45001:2019 (ISO 45001:2018, IDT) Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування.
10. Матеріалознавство та технологія матеріалів (у схемах і завданнях): навч. посіб. / Т.П. Говорун, О.П. Гапонова, С.В. Марченко. Суми: СумДУ, 2020. – 163 с.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

11. Оптимізація технологічних процесів галузі: підручник / А.М. Дорохович, В.В. Дорохович, Т.В. Зінченко. – Київ: Інкос, 2016. – 392 с.

12. Основи технології машинобудування: навчальний посібник / Дерібо О.В., Дусанюк Ж.П., Репінський С.В. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 106 с.

13. Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Ю.Є. Паливода, А.Є. Дячун, Р.Я. Лещук. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.

14. Повстяной О.Ю., Полінкевич Р.М., Четвержук Т.І. CAD/CAM/CAE технології в машинобудуванні для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Прикладна механіка», спеціальності 131 Прикладна механіка. /Електронний освітній ресурс// протокол №8 від 28червня 2022 року.

15. Технології для верстатів з числовим програмним керуванням: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Дерібо О. В., Лозінський Д. О., Сердюк О. В. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 116 с.

16. Технологія машинобудівних підприємств: підручник / В. Л. Дикань, Ю. Є. Калабухін, Н. Є. Каличева та ін., за заг. ред. В. Л. Диканя. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – 386 с.

17. Тимочко В.О., Березовецький А.П., Городецький І.М., Мазур І.Б., Ковальчук Ю.О., Сафонов С.А., Стефанишин В.Ю. Безпека життєдіяльності та охорона праці. Навч. Посіб. Львів: Сполом. 2022. – 410 с.

18. Тимочко В.О., Березовецький А.П., Городецький І.М., Мазур І.Б., Ковальчук Ю.О., Сафонов С.А., Стефанишин В.Ю. Безпека життєдіяльності та охорона праці. Навч. Посіб. Львів: Сполом. 2022. – 410 с.

19. Фролов В. К. Спосіб оброблення заготовок на горизонтальному багатоцільовому чотирьохосьовому верстаті з ЧПК : заявка на корисну модель, Україна, МПК В23Q 15/22, В23Q 17/22 / В. К. Фролов, Д. К.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Шуплецов, В. Ю. Пилипюк, К. Ю. Рекун, М. М. Гладський, В. В. Медведєв, О. О. Фролова, К. С. Барандич. – № u202000152 ; заявл. 09.01.20. Висновок про видачу деклараційного патенту від 09.04.2020.

20. Четвержук Т.І. Режими роботи системи ЧПУ верстата в процесі його експлуатації./ Четвержук, Р.М. Полінкевич, Р.Г. Редько, Н.Т. Зубовецька // Наукові нотатки: міжвуз. зб.наук. праць. – Луцьк, 2019. – Вип. 66. – С. 373-378.

21. Четвержук Т.І., Полінкевич Р.М. Методичні рекомендації до написання кваліфікаційної роботи за ступенем вищої освіти «бакалавр»: методичні рекомендації для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи», спеціальності 131 Прикладна механіка, галузі знань 13 Механічна інженерія денної та заочної форм навчання / уклад. Т.І. Четвержук, Р.М. Полінкевич. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 44 с.

					031Б – 026.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		