

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: «Розроблення системи моделювання руху інструменту фрезерних
верстатів з числовим програмним керуванням

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи КАЗ-41
спеціальності 151 «Автоматизація
та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	Гуменна Ю.В. (прізвище та ініціали)
	(підпис)	Наводич С.С. (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Капаціла Ю.Б. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Козбур І.Р. (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Савків В.Б. (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Гуменній Юлії Петрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення системи моделювання руху інструменту фрезерних верстатів з числовим програмним керуванням»

Керівник роботи к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» травня 2026 року № 4/9-231

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: дані про обладнання та систему ЧПК, геометрична модель обробки, дані про інструмент та технологічні режими обробки, дані для моделювання і візуалізації, перелік вхідних та вихідних даних системи, основні задачі системи, типова структурна схема системи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналітична частина. Проєктна частини. Спеціальна частина. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

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

Блок-схема базової графічної системи – 1 аркуш формату А1. Процедура відображення траєкторії руху інструменту – 1 аркуш формату А1. Блок-схема алгоритму передачі даних – 1 аркуш формату А1. Блок-схема алгоритму побудови зображення – 1 аркуш формату А1. Порівняння методів візуалізації – 1 аркуш формату А1.

[illegible]

7. Дата видачі завдання 14 травня 2026 року

[illegible]

(підпис)

Гуменна Ю.П.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Капаціла Ю.Б.
(прізвище та ініціали)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Наводич Степану Степановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення системи моделювання руху інструменту фрезерних верстатів з числовим програмним керуванням»

Керівник роботи к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» травня 2026 року № 4/9-231

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: дані про обладнання та систему ЧПК, геометрична модель обробки, дані про інструмент та технологічні режими обробки, дані для моделювання і візуалізації, перелік вхідних та вихідних даних системи, основні задачі системи, типова структурна схема системи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналітична частина. Проектна частини. Спеціальна частина. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

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

Функції CAD/CAM систем – 1 аркуш формату A1. Діаграма зворотних зв'язків в інтерактивній системі – 1 аркуш формату A1. Структура апаратного забезпечення системи – 1 аркуш формату A1. – 1 аркуш формату A1. Модульна структура Unigraphics – 1 аркуш формату A1.

Процедура фрезерування в існуючій системі – 1 аркуш формату A1.

[illegible]

7. Дата видачі завдання 14 травня 2026 року

[illegible]

(підпис)

Наводич С.С.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Капаціла Ю.Б.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:

«Розроблення системи моделювання руху інструменту фрезерних верстатів з
числовим програмним керуванням»

студентів групи КАЗ-41 Гуменна Ю.П., Наводич С.С.

Розрахунково-пояснювальна записка: 104 аркуші формату А4, 18 літературних
джерел, графічна частина – 10 аркушів формату А1

Мета: розробка програмної системи, яка забезпечує точне моделювання руху інструменту фрезерного верстата на основі зчитування керуючих команд, що дозволить мінімізувати ризики виникнення помилок при реальній обробці деталей.

Для досягнення поставленої мети вирішено завдання:

- вивчено сучасний стан питання, виконано літературний огляд за темою роботи, сформульовано висновки та основні завдання;
- проаналізовано сучасні методи геометричного моделювання процесів механічної обробки;
- виконано дослідження структури та синтаксису мови програмування;
- розглянуто модель кінематики руху інструменту для багатокординатного фрезерування;
- розроблено алгоритми інтерпретації керуючих команд, їх перетворення у координати руху та інтерфейсу візуалізації процесу обробки з можливістю контролю зіткнень;
- розглянуто питання безпеки життєдіяльності та охорони праці.

Методи виконання роботи: економіко-статистичний, графічний, порівняльний, математичного моделювання; теоретико-емпіричний.

Ключові слова: автоматизація, фрезерування, проєктування, моделювання, система, алгоритм, програма

ЗМІСТ

Завдання на кваліфікаційну роботу	2
РЕФЕРАТ	6
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Особливості застосування CAD/CAM/CAE-систем для технологічної підготовки виробництва	10
1.2 Передумови застосування комп'ютерних технологій для моделювання руху інструменту.....	15
1.3 Сучасний підхід до інтеграції CAD/CAM/CAE систем в автоматизоване виробництво	17
1.4 Аналіз сучасного стану розробки та застосування систем моделювання руху інструменту фрезерних верстатів з числовим програмним керуванням	21
1.5 Висновки та постановка задачі на кваліфікаційну роботу	26
2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	34
2.1 Загальна характеристика системи	34
2.2 Програмне забезпечення Unigraphics	36
2.3 Сучасна методологія проєктування фрезерної обробки на верстатах з числовим програмним керуванням.....	50
2.4 Аналіз переваг та недоліків існуючої системи	51
2.5 Опис графічної системи VS11	54
2.6 Розробка системи моделювання руху інструменту фрезерних верстатів з ЧПК	59
2.7 Генерація, передача та зберігання даних в системі моделювання обробки на фрезерних верстатах з ЧПК	62
2.8 Пошук і відображення даних.....	72
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	79
3.1 Моделювання операцій механічної обробки за допомогою модуля Mill Module Unigraphics.....	79

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	87
4.1 Актуальність безпеки життєдіяльності людини	87
4.2 Працездатність людини-оператора	88
4.3 Загальні вимоги безпеки з охорони праці для користувачів ПК	91
4.4 Значення автоматизації виробничих процесів в питаннях охорони праці	95
ВИСНОВКИ ЩОДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	99
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	103

ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудування та автоматизованого виробництва нерозривно пов'язаний із широким впровадженням верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), які забезпечують високу точність, продуктивність та гнучкість обробки деталей складної геометрії. Особливу роль у цьому процесі відіграють фрезерні верстати з ЧПК, що застосовуються у виготовленні широкого спектра виробів – від одиничних прототипів до серійної продукції.

Одним із ключових етапів підготовки виробництва є моделювання руху інструменту, яке дозволяє перевірити коректність керуючих програм, оцінити якість обробки, запобігти можливим зіткненням інструменту з деталлю або елементами верстата, а також оптимізувати траєкторії руху. Використання систем моделювання значно знижує витрати часу та матеріальних ресурсів, підвищує безпеку виробничого процесу і забезпечує стабільність якості готової продукції.

Помилки у керуючих програмах або некоректний вибір технології фрезерування можуть призвести до серйозних наслідків: від пошкодження дорогої заготовки до виходу з ладу самого верстата. Традиційний метод тестування програм безпосередньо на обладнанні є економічно неефективним, оскільки зупиняє виробничий процес і не гарантує виявлення всіх зарізів чи зіткнень. Саме тому розробка систем моделювання руху інструменту є критично важливим етапом підготовки виробництва, що дозволяє візуалізувати процес обробки, перевірити коректність G-коду та оптимізувати режими різання в цифровому середовищі.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Особливості застосування CAD/CAM/CAE-систем для технологічної підготовки виробництва

Сучасне машинобудування та промислове виробництво характеризуються високими вимогами до точності, швидкості розробки виробів і зниження витрат на підготовку виробництва. В цих умовах важливу роль відіграють CAD/CAM/CAE системи, які забезпечують автоматизацію процесів створення, аналізу та супроводу конструкторської й технологічної документації.

Використання цих систем дозволяє значно підвищити ефективність технологічної підготовки виробництва, скоротити терміни проектування, зменшити кількість помилок і забезпечити інтеграцію між різними етапами життєвого циклу виробу [1–5].

Технологічна підготовка виробництва (ТПВ) – це комплекс робіт, спрямованих на забезпечення готовності підприємства до виготовлення продукції заданої якості у встановлені терміни та з мінімальними витратами.

До основних задач ТПВ належать:

- розробка технологічних процесів;
- створення маршрутних і операційних карт;
- проектування оснащення та інструменту;
- підготовка програм для верстатів з ЧПК;
- моделювання процесів обробки;
- контроль якості та оптимізація виробництва.

Застосування інтегрованих систем CAD/CAM/CAE є фундаментом сучасного промислового виробництва (концепція Industry 4.0). Ці системи дозволяють автоматизувати весь життєвий цикл виробу – від ідеї до готової деталі. Кожна з цих систем забезпечує технологічну підготовку виробництва (ТПВ).

CAD (Computer-Aided Design) – проектування.

Системи CAD використовуються для створення геометричної моделі виробу. Це перший етап, де закладаються всі параметри майбутньої деталі.

Функції: Створення 2D-креслень та 3D-моделей, розробка специфікацій.

Роль у ТПВ: На основі CAD-моделі розробляється спеціальне оснащення (штампи, прес-форми) та визначаються точні розміри й допуски.

CAE (Computer-Aided Engineering) – аналіз та розрахунки.

CAE-системи дозволяють проводити віртуальні випробування моделі ще до створення фізичного прототипу [6–7]. Це суттєво економить кошти та час.

Основні методи: найчастіше використовується метод кінцевих елементів (МСЕ) для розрахунку напружено-деформованого стану.

Можливості:

- аналіз міцності та жорсткості.
- теплові розрахунки (охолодження деталей).
- моделювання динаміки рідин та газів (CFD).
- моделювання процесів лиття або штампування.

3. CAM (Computer-Aided Manufacturing) – виробництво

CAM-системи є своєрідним містком між комп'ютерною моделлю та верстатом з ЧПК (числовим програмним керуванням). Система зчитує геометрію з CAD-файлу і генерує траєкторію руху інструменту.

CAM-системи призначені для виконання функцій:

- генерація керуючих програм (G-код), створення програм для верстата;
- вибір інструменту;
- візуалізація обробки: моделювання процесу.

Використання цих систем у єдиному інформаційному просторі дає результати, які наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати застосування CAD/CAM/CAE-систем

Показник	Ефект від впровадження
Терміни підготовки	Скорочення в 2-5 разів завдяки паралельному проектуванню.
Якість	Зниження кількості браку через виявлення помилок на етапі CAE-симуляції.
Собівартість	Зменшення витрат на матеріали та енергію (оптимізація конструкції).
Гнучкість	Швидка переналадка виробництва на нові типи виробів.

Основні програмні продукти на ринку CAD/CAM/CAE-систем описані нижче.

Залежно від складності завдань, системи поділяють на рівні.

1. High-End (важкі): Siemens NX, CATIA, PTC Creo. Дозволяють проектувати складні об'єкти (літаки, автомобілі).
2. Middle-Range (середні): SolidWorks, Autodesk Inventor. Оптимальні для загального машинобудування.
3. Low-End (легкі): AutoCAD, Fusion 360 (хоча остання активно переходить у середній сегмент).

Сучасний тренд [8–11] – це PLM-системи (Product Lifecycle Management), які об'єднують CAD/CAM/CAE та керують усіма даними про виріб протягом усього його «життєвого циклу» – від концепції до утилізації.

В металообробці інтеграція CAD/CAM/CAE систем дозволяє перейти від традиційного «методу спроб і помилок» до цифрового прототипування. Це критично важливо, коли вартість заготовки (наприклад, з титану або жароміцної сталі) або робоча година багатоосьового верстата коштує тисячі доларів.

Цей цикл саме для машинобудівних підприємств передбачає такі етапи.

1. Проектування технологічного оснащення (CAD).

Окрім самої деталі, у CAD-системі проектується все те, що утримує та обробляє заготовку:

- спеціальні затискні пристрої: конструювання кондукторів та пристосувань, які забезпечують точне базування деталі;
- проектування заготовок: створення моделей виливків або штамповок з урахуванням припусків на подальшу механічну обробку.

2. Моделювання процесів деформації та різання (CAE) [12–15].

Для металообробки CAE-системи виконують роль «віртуального цеху»:

- аналіз обробки тиском: моделювання процесів вальцювання, кування або штампування, можна побачити, чи не виникне тріщина або інший дефект в металі;
- розрахунок теплових навантажень: при швидкісному фрезеруванні важливо розуміти, як нагрівається інструмент і чи не призведе це до

термічної деформації деталі.

- оптимізація топології: зменшення маси деталі при збереженні її міцності шляхом оптимізації конструкції.

3. Програмування верстатів з ЧПК (CAM)

Програмування верстатів з ЧПК – основа сучасної металообробки. САМ-система автоматизує створення траєкторій для:

- токарної обробки: визначення циклів точіння, нарізання різі та свердління;
- фрезерної обробки (від 3 до 5 осей): створення складних траєкторій для обробки моноколес, лопаток турбін або прес-форм;
- електроерозійної та лазерної різки: оптимізація розкрою листа металу для мінімізації відходів.

Ключовими технології в сучасній металообробці віртуальне моделювання та перевірка, високошвидкісна обробка та адаптивна обробка.

Сучасні САМ-модулі дозволяють проводити Full Machine Simulation. Це повна цифрова копія верстата. Можна побачити, як рухається шпиндель, супорт чи задня бабка [16–19]. Це гарантує, що інструмент не вріжеться в стіл верстата – помилка, яка може коштувати дуже дорого.

САМ-системи розраховують траєкторії з плавними переходами (без гострих кутів), що дозволяє верстату працювати на величезних швидкостях без вібрацій, продовжуючи ресурс інструменту в 2-3 рази.

Деякі системи можуть коригувати програму в реальному часі залежно від фактичного стану заготовки, вимірюного за допомогою датчиків (наприклад, Renishaw) безпосередньо на верстаті.

Порівняння методів технологічної підготовки наведено в таблиці 1.2.

Вибір програмного комплексу для металообробки залежить від складності ваших деталей (просте точіння чи 5-осьова обробка) та бюджету. У світі металообробки [18–25] сформувалися кілька спеціалізованих лідерів.

Найпопулярнішими рішеннями є SolidCAM, Mastercam і Autodesk Fusion 360.

SolidCAM забезпечує найкращу інтеграцію і є по суті золотим стандартом

для тих, хто вже працює в SolidWorks або Autodesk Inventor. Він вбудовується безпосередньо в інтерфейс конструкторської програми.

Таблиця 1.2 – Порівняння методів підготовки

Характеристика	Традиційна підготовка	З використанням CAD/CAM/CAE
Написання програми	Вручну на стійці верстата (ризик помилки)	Автоматично за 3D-моделлю
Перевірка програми	Холостий хід або пробна обробка	Віртуальне 3D-моделювання
Складність деталей	Обмежена простими формами	Будь-яка складна геометрія
Витрати металу	Високі (через припуски «із запасом»)	Мінімальні (точний розрахунок заготовки)

Ключовою особливістю SolidCAM є iMachining – унікальна технологія, яка автоматично розраховує траєкторію так, щоб зусилля на інструмент було постійним.

В результаті час обробки скорочується приблизно на 70%, а термін служби фрез збільшується в рази.

Таке рішення частіше всього застосовують в універсальних механічних цехах, що працюють із широким спектром матеріалів.

Mastercam є найбільш розповсюдженою САМ-системою в світі. Перевагами систем є величезна база готових постпроцесорів (файлів-налаштувань під конкретні верстати: Haas, Mazak, DMG Mori тощо), дуже потужний блок для токарно-фрезерної обробки [25–30].

Використовується система здебільшого в серійному виробництві, де потрібно досягти максимуму ефективності з кожного руху верстата.

Autodesk Fusion 360

Найсучаснішою системою на ринку в даний час є Autodesk Fusion 360, яка об'єднує CAD, CAM та CAE в одному вікні за відносно низьку ціну.

Перевагами системи є доступність [29–32], використання «хмарних» технологій, здатність легко перейти від конструювання до розрахунку міцності, а потім – до генерації G-коду. Має вбудовані функції для адитивного виробництва (3D-друк металом).

Autodesk Fusion найчастіше використовує малий та середній бізнес, стартапи,

R&D відділи. Для виконання більш складних завдань використовують системи PowerMill (Autodesk) та Siemens NX.

PowerMill спеціалізується на надскладній 5-осьовій обробці, застосовується при виготовленні лопаток турбін, прес-форм для автопрому, складних авіаційних деталей, забезпечує найкращі алгоритми запобігання зіткненням інструменту з оснащенням.

Siemens NX – система рівня High-End, яка забезпечує повний цикл виробництва: від проектування виробу до комплексного керування цілим заводом. Застосовується переважно в аерокосмічній галузі та в оборонній промисловості.

Порівняння найбільш поширених систем наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння CAD/CAM/CAE систем

Система	Складність освоєння	Головна перевага
Fusion 360	Низька	Ціна універсальність
SolidCAM	Середня	iMachining (швидкість)
Mastercam	Середня	Постпроцесори та база знань
PowerMill	Висока	5-осьова технологія
Siemens NX	Висока	Повний цикл (PLM)

1.2 Передумови застосування комп'ютерних технологій для моделювання руху інструменту

Одним із головних досягнень у комп'ютерних технологіях, які зросли для аерокосмічних застосувань і нині поширюються на багато інших промислових застосувань, є комп'ютеризоване проектування та комп'ютеризоване виробництво (CAD/CAM) та більш загальна система комп'ютеризованої інженерії (CAE). CAD/CAM [33–35] можна визначити як найпростіше використання комп'ютерного апаратного забезпечення та прикладного програмного забезпечення, призначеного для перенесення специфічних вимог продукту у кінцевий продукт. Він відіграє ключову роль у таких сферах, як проектування, аналіз, креслення, документація, програмування без напряду, інструментальне виробництво, складання, контроль якості та тестування.

CAD/CAM як концепція виникла внаслідок розвитку «електронного креслення» – інтерактивної комп’ютерної графіки. Комп’ютерна графіка – це тема, яка швидко розвивається. Вона завжди була однією з найяскравіших візуально вражаючих галузей комп’ютерних технологій, створюючи зображення, чий вигляд і рух роблять їх зовсім не схожими на будь-яку іншу форму проектування. Одним із застосувань комп’ютерної графіки було покращення розуміння того, що зазвичай можна представити в табличному вигляді. Це надзвичайно ефективний спосіб комунікації між людиною та комп’ютером; Наприклад, графік із таблиці чисел дозволяє краще зрозуміти зв’язки, визначити тенденції та підкреслити аномалії. Чіткість зображення, яке можна відобразити, значною мірою залежить від апаратного та програмного забезпечення комп’ютера, які використовуються для його створення [36–39].

Останнє десятиліття ознаменувалося численними змінами та вдосконаленнями апаратного та програмного забезпечення, що використовуються для комп’ютерних застосунків. Вартість комп’ютерного апаратного забезпечення, а також його габарити постійно зменшуються. Розробляється прикладне програмне забезпечення, яке розроблене з урахуванням кінцевого користувача, а не комп’ютерного фахівця. Низька вартість «зручних для користувача» систем сприяла зростанню застосувань комп’ютерів та комп’ютерної графіки.

Зменшення розмірів мікросхем призвело до створення кращих пристроїв для відображення шляхом включення мікропроцесорів безпосередньо у графічні термінали. Ці термінали забезпечують динамічне багатокольорове відображення в реальному часі на відміну від однокольорових статичних дисплеїв деталі за конкурентною ціною. Система для автоматизованого проектування, аналізу, креслення або виробництва складається з одного (або кількох) пристроїв введення, графічного дисплея, комп’ютера, пристроїв зберігання та пристроїв виводу [40–44]. Більшість цих систем є самостійними типами, які забезпечують такі функції, як проектування механічних деталей або електричних схем, аналіз методом кінцевих елементів, креслення та вимірювання, а також виробничі функції.

Деякі з основних постачальників CAD/CAM систем: Applicon, Inc., Autotrol, Inc., Calma Co., Computervision Corp., IBM Corp., Intergraph Corp., McDonnell

Douglas Automation Co., Manufacturing Data Systems, Inc. та інші. Кожна з цих компаній проповідує філософію інтеграції процесу – від концептуального дизайну до виробництва, з інформацією, яку отримують, генерують і поширюють на основі раніше отриманих даних.

1.3 Сучасний підхід до інтеграції CAD/CAM/CAE систем в автоматизоване виробництво

Оскільки CAD/CAM в наш час впроваджується в багатьох галузях, функції автоматизованого проектування та комп'ютерного виробництва плануються та реалізуються як окремі системи. Проте, зі зростанням кількості окремих систем користувачі усвідомлюють зростаючі неефективності: важко вивчати особливості різних систем; зберігання часто даних, які часто перекриваються для кожної окремої системи є дорогим; Джерело помилки – витягувати дані з однієї системи та вручну вводити їх у наступну. Необхідність ширшого фокусу підкреслює Майєрс [17–21].

Блок-схема на рисунку 1.1 ілюструє різні функції системи CAD/CAM. Кожна із них описані нижче.

Проектування. Починаючи з приблизного ескізу або, можливо, просто ідеї, інженер використовує засоби комп'ютерної графіки для створення тривимірної моделі виробу. CAD найкраще працює при проектуванні груп деталей. Ці групи можуть бути спроектовані так, щоб параметри обиралися конструктором як вхідні дані для процесу (параметричне проектування). Таким чином, проектування всієї групи деталей може бути завершено за дещо більший проміжок часу, ніж потрібно для створення конструкції однієї деталі, при цьому CAD-система перевіряє порушення певних стандартів і норм проектування. Деякі типові сфери застосування CAD: проектування конструкцій, деталей машин, електричних систем, механічних зв'язків, литво, штампування листових металевих деталей, тощо.

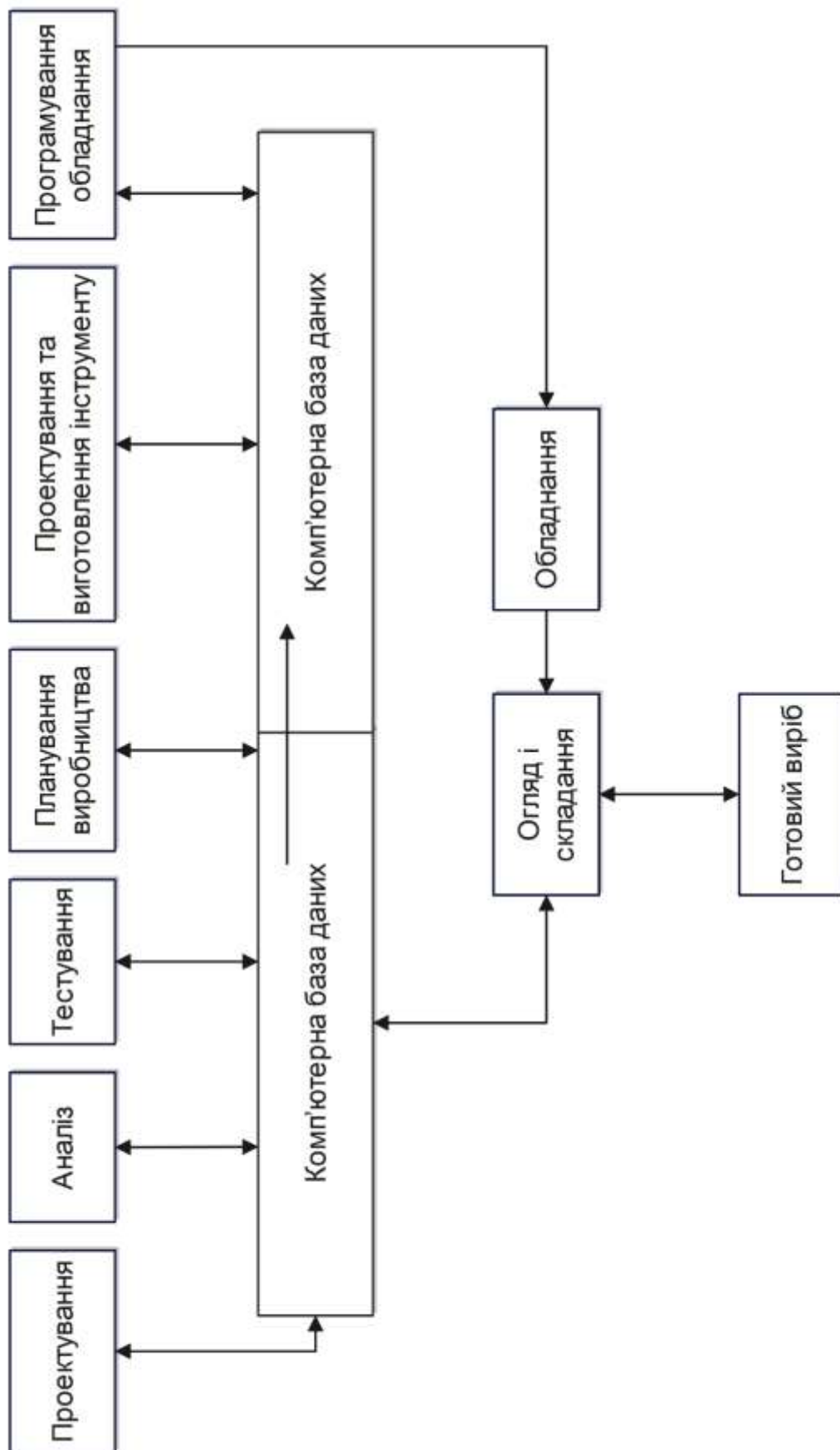


Рисунок 1.1 – Функції CAD/CAM систем

Аналіз. Після завершення геометричного визначення застосовуються функції аналізу для визначення різних властивостей. Результати аналізу часто вимагають змін у геометрії проекту та аналізу нової конструкції. Цей ітеративний процес виконується на робочій станції CAD, без традиційного переміщення проектування деталі між групами інженерного аналізу та проектування. Спочатку можна змодельовати та проаналізувати повну систему, яку можна розбити на окремі компоненти, які потім можна спроектувати та проаналізувати. Загальнодоступні функції проектного аналізу: розрахунки масових властивостей, аналіз методом кінцевих елементів, динамічний і кінематичний аналіз, допуски, складання, статичні зазори тощо.

Огляд або тестування. Більшість компаній мають експериментальні лабораторії, де створюють, тестують справжні прототипи і частіше за все відправляють назад для виправлення помилок, вдосконалення чи повторного виготовлення. Завдяки комп'ютерним технологіям можна створювати тривимірні рухомі комп'ютерні моделі, при цьому лише фінальний виріб виготовляється і тестується. Для контролю і моделювання робочих умов сконструйованої фізичної моделі використовують комп'ютерне тестування. Комп'ютерне збирання даних і об'єднання окремих комп'ютерних систем в єдину мережу дозволили швидко та надійно отримувати зворотний зв'язок всім учасникам процесу проектування, щоб кількісно оцінити комп'ютерне моделювання та аналіз. На окремих робочих місцях конструктор і інженер можуть виконувати порівняння між своєю фінальною комп'ютерною моделлю та фізично сконструйованою та протестованою моделлю.

Проектування та виготовлення інструментів. Інженер-інструментальник отримує деталь із бази даних і розробляє інструменти для неї. Система CAD, як правило, дозволяє конструктору обертати деталь відносно будь-якої з осей і вимірювати будь-які дані. Це робить вимірювання розмірів, необхідних для проектування інструментів, досить складним для отримання звичайними методами. Типові застосування – це проектування фіксуючих пристроїв, штампів, шаблонів тощо.

Програмування на верстаті. Для створення керуючої програми обробки

деталей, точне геометричне визначення деталі, що є в базі даних, застосовується програмістом. Визначення шляху різального інструменту зазвичай задається інтерактивно. Програмування на верстаті часто здійснюється з використанням графічного зображення операції обробки. Зазвичай програмування NC можна виконувати для обробки по 2, 2 та 1/2, 3, 4 та 5 осях на верстатах як фрезерні, токарні, свердлильні тощо.

Огляд. Огляд деталей зі складними формами може бути полегшений за допомогою оригінальних CAD-даних. Використання різних січних площин дозволяє автоматично вимірювати та оглядати деталь, оскільки тривимірна база даних CAD/CAM дозволяє генерувати будь-яке зображення конструкції деталі, визначене під час огляду. Це дозволяє швидко приймати рішення щодо того, чи відповідає деталь вимогам.

Комп'ютерна база даних. Надзвичайно важливою є наявність спільної бази даних, яка є потоком для зв'язку всіх функцій проєктування. Після того, як конструктор переконається, що конструкція деталі достатньо оптимізована, модель вноситься до бази даних. База даних містить усю інформацію, що стосується деталі. Зазвичай це тривимірне геометричний опис, з якого можна отримати будь-яку з наведених вище інформацію.

З огляду на різноманітність існуючих систем, можна уявити повну послідовність функцій – від інженерного проєктування до виробництва – як інтегровану систему. Після інтеграції різних функцій системи бажано, щоб системи, розроблені різними виробниками, також могли взаємодіяти. Першим кроком у цьому напрямку було б те, щоб одна система могла переводити свій конкретний формат даних у нейтральний або загальний формат, який інша система могла б інтерпретувати та використовувати. Наступні кроки інтегрують кілька підсистем в одну систему, де всі компоненти тісно пов'язані, групи систем об'єднуються і, таким чином, порушується поділ між CAD і CAM. Оскільки різні системи пов'язані між собою, стає очевидно цінність спільної бази даних, з якої системи, що виконують різні функції, можуть брати дані. Отже, це і є інтеграція – підключені системи, які обслуговуються спільною базою даних.

1.4 Аналіз сучасного стану розробки та застосування систем моделювання руху інструменту фрезерних верстатів з числовим програмним керуванням

Сучасне машинобудування характеризується широким використанням високопродуктивних фрезерних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), які забезпечують високу точність, автоматизацію та гнучкість виробництва. Одним із ключових напрямів розвитку таких систем є створення засобів моделювання руху інструменту, що дозволяють здійснювати віртуальне відтворення процесу обробки, аналіз траєкторій, контроль зіткнень, оптимізацію режимів різання та підвищення ефективності виробництва.

Системи моделювання руху інструменту є складовою сучасних CAD/CAM/CAE-комплексів і активно інтегруються з концепціями Industry 4.0, цифрових двійників (Digital Twin), хмарних обчислень та штучного інтелекту. (Springer).

Розвиток систем моделювання руху інструменту умовно можна поділити на кілька етапів.

1. Геометричне моделювання. На ранніх етапах системи забезпечували лише візуалізацію траєкторій інструменту та перевірку геометрії обробки.
2. Кінематичне моделювання. Подальший розвиток був пов'язаний із врахуванням кінематики верстата: переміщень координатних осей, обмежень приводів, прискорень і динаміки руху.
3. Імітація процесу різання. Сучасні CAM-системи дозволяють моделювати процес зняття матеріалу, прогнозувати навантаження, сили різання та зношування інструменту.
4. Цифрові двійники та інтелектуальні системи. Новітні системи інтегрують реальні дані від датчиків, створюючи цифровий двійник верстата та процесу обробки в режимі реального часу. (Springer).

Сучасні системи моделювання руху інструменту виконують такі функції:

- побудова та редагування траєкторій руху інструменту;

- моделювання кінематики багатокоординатних верстатів;
- візуалізація процесу обробки;
- контроль колізій;
- перевірка NC-програм;
- оптимізація режимів різання;
- прогнозування похибок обробки;
- оцінка динамічних характеристик;
- інтеграція з системами моніторингу та керування виробництвом.

Особливо важливим є моделювання для 5-осьової обробки, де складні просторові переміщення інструменту вимагають високої точності математичних моделей (www.mmscience.eu).

Серед найбільш поширених CAD/CAM-систем для моделювання руху інструменту систем можна виділити:

- Siemens NX;
- Mastercam;
- PowerMILL;
- CATIA;
- SolidCAM;
- VERICUT.

Ці програмні комплекси забезпечують:

- автоматичне генерування G-коду;
- тривимірне моделювання траєкторій;
- перевірку коректності програм;
- цифрове відтворення роботи верстата;
- аналіз залишкового матеріалу;
- оптимізацію часу обробки.

Особливу роль відіграють системи NC-верифікації, які дозволяють виявляти помилки до запуску програми на реальному обладнанні. (www.mmscience.eu).

Одним із найперспективніших напрямів розвитку в механічній обробці є використання технології цифрових двійників. Цифровий двійник являє собою віртуальну модель верстата та процесу обробки, яка синхронізується з фізичним

обладнанням у реальному часі. (Springer).

Основні переваги методу цифрових двійників:

- прогнозування помилок обробки;
- контроль технічного стану обладнання;
- адаптивне керування процесом;
- зменшення часу налаштування;
- підвищення точності та продуктивності;
- прогнозування зношування інструменту.

Сучасні дослідження спрямовані на створення багаторівневих цифрових моделей, які поєднують:

- геометричні моделі;
- фізичні моделі процесу різання;
- дані сенсорів;
- алгоритми машинного навчання;
- системи прогнозування дефектів (MDPI).

Останнім активно розвиваються методи використання штучного інтелекту в системах моделювання ЧПК.

Основні напрями використання штучного інтелекту:

- оптимізація траєкторій;
- автоматичний вибір режимів різання;
- прогнозування вібрацій;
- виявлення помилок;
- адаптивне керування процесом.

Штучний інтелект дозволяє створювати самоадаптивні системи керування, які здатні автоматично коригувати параметри обробки залежно від поточного стану процесу.

Попри значний розвиток, в сучасних системах моделювання існує низка проблем, зокрема:

- висока обчислювальна складність;
- необхідність великого обсягу даних;
- складність побудови високоточних моделей;

- недостатня швидкодія при моделюванні у реальному часі;
- складність інтеграції з різними типами верстатів;
- похибки моделей сил різання та деформацій;
- обмежена універсальність програмних платформ.

Особливо актуальною є проблема синхронізації віртуальної та фізичної систем у реальному масштабі часу.

Подальший розвиток систем моделювання руху інструменту пов'язаний із такими напрямками:

- інтеграція цифрових двійників;
- використання хмарних обчислень;
- застосування штучного інтелекту;
- розвиток кіберфізичних виробничих систем;
- моделювання у реальному часі;
- автономне адаптивне керування;
- використання Industrial Internet of Things (IIoT);
- створення самонавчальних САМ-систем.

Очікується, що майбутні системи забезпечуватимуть повністю автономне формування та оптимізацію траєкторій інструменту з урахуванням поточного стану обладнання та виробничого середовища.

Питання формування траєкторій руху інструменту для верстатів з ЧПК розглядалися у працях багатьох вітчизняних та зарубіжних науковців. Значна увага приділяється геометричним аспектам побудови траєкторій, алгоритмам інтерполяції та оптимізації режимів обробки. У роботах, присвячених системам CAD/CAM, досліджуються методи автоматизованого створення керуючих програм та інтеграції математичних моделей у процес підготовки виробництва (Cambridge University Press & Assessment).

Одним із важливих напрямів досліджень є генерація оптимальної траєкторії руху інструменту. У працях В. В. Сегеди розглянуто алгоритми формування траєкторій для верстатів з ЧПК, зокрема модифікований алгоритм мінімальної відстані, який дозволяє скоротити холості переміщення інструменту та підвищити ефективність обробки. Автор наголошує, що правильний вибір траєкторії

безпосередньо впливає на продуктивність та точність фрезерування (ЛПНУ).

З розвитком високошвидкісної обробки значну увагу приділяють питанням планування подачі та згладжування траєкторій. У роботах Burak Sencer та інших дослідників показано, що сучасні системи ЧПК повинні забезпечувати не лише геометричну точність траєкторії, а й плавність зміни швидкості, прискорення та ривка. Це необхідно для зменшення динамічних навантажень на приводи та підвищення точності позиціонування інструменту.

Окрему групу становлять дослідження, пов'язані з обробкою складних поверхонь. У сучасних наукових роботах розглядаються методи генерації траєкторій для 3- та 5-осьових верстатів, оптимізація орієнтації інструменту та адаптивне керування швидкістю подачі. Автори сучасних оглядових досліджень відзначають, що якість фрезерування значною мірою залежить від взаємозв'язку між траєкторією руху, кінематикою верстата та параметрами різання.

В сучасних САМ-системах широко використовуються математичні моделі для прогнозування процесу обробки та перевірки керуючих програм. В роботах аналізу САМ-систем, розглядаються можливості програмних комплексів Autodesk PowerMill, Mastercam, Tebis, та інших для моделювання процесів фрезерування. Дослідники підкреслюють, що застосування САМ-систем дозволяє суттєво скоротити час підготовки виробництва та підвищити якість поверхні деталі.

Важливим аспектом є також математичне моделювання кінематики верстатів з ЧПК. У наукових працях досліджуються моделі лінійної та кругової інтерполяції, аналізуються похибки позиціонування та динамічні характеристики приводів. Особлива увага приділяється моделюванню багатокординатних систем та роботизованих комплексів, де траєкторія руху інструменту формується з урахуванням кінематичних обмежень обладнання.

В сучасних дослідженнях також активно застосовуються методи комп'ютерного моделювання та цифрових двійників технологічних систем. Це дозволяє проводити віртуальну перевірку траєкторій руху інструменту, оцінювати навантаження на вузли верстата та прогнозувати якість обробки ще до виконання реального процесу різання. Перспективним напрямом є інтеграція систем штучного інтелекту та адаптивного керування для автоматичної оптимізації

траєкторій фрезерування.

Аналіз літературних джерел показує, що існуючі методи моделювання руху інструменту переважно орієнтовані або на геометричні аспекти формування траєкторій, або на оптимізацію режимів різання. При цьому недостатньо дослідженими залишаються питання комплексного моделювання, яке одночасно враховує кінематичні параметри верстата, динаміку приводів, характеристики інструменту та умови обробки. Це визначає актуальність розробки сучасної системи моделювання руху інструменту фрезерних верстатів з ЧПК, яка забезпечуватиме підвищення точності, продуктивності та ефективності технологічного процесу.

1.5 Висновки та постановка задачі на кваліфікаційну роботу

Системи моделювання руху інструменту фрезерних верстатів з ЧПК є одним із ключових елементів сучасного цифрового виробництва. Їх розвиток спрямований на підвищення точності, продуктивності та автоматизації обробки деталей. Сучасні тенденції пов'язані з використанням цифрових двійників, штучного інтелекту, багатофізичного моделювання та хмарних технологій.

Аналіз сучасних досліджень показує, що найбільш перспективними є інтегровані системи, здатні поєднувати математичне моделювання, сенсорний моніторинг та адаптивне керування в єдиному інформаційному середовищі. Це створює передумови для формування інтелектуальних верстатів нового покоління та реалізації концепції «розумного виробництва».

Ця кваліфікаційна робота направлена на покращення моделювання фрезерної обробки з числовим програмним керуванням шляхом впровадження можливостей динамічного руху в реальному часі. Тут спроектовано спільну базу даних, яка використовується для відображення одних і тих самих даних на різних пристроях відображення. Мова йде про системи Unigraphics CAD/CAM та VS11 графічні системи.

Unigraphics – це автономна система з графічним пакетом, що має можливості

для проектування, креслення, аналізу та виробництва. Система використовує інтерфейс користувача з меню з підказками і, як і багато сучасних систем CAD/CAM, базується на роботі Hanrathy.

Для цієї системи пристроєм відображення є Direct View Storage Tube (DVST), а вхідні пристрої – клавіатура, мишка, а також електронне перо (ручка) і графічний планшет. Роздільна здатність у цих терміналах дуже хороша, зазвичай вони забезпечують адресовану матрицю з 4096x4096 точок на екрані діаметром 19". Ці екрани електронно зберігають зображення будь-якої густини, створеної на екрані. Однак вибіркове стирання неможливе, зображення мають один колір і лінійну інтенсивність, і можна виконувати обмежений динамічний рух.

VS11 – це система, яка може використовуватися як для програмування додатків, так і для графічного відображення. Графіка на цій системі переважно виконується через VS113D Graphics Package C11. Пристрій відображення – це растрові термінали з можливістю 64-бітної кольорової здатності. Основні компоненти системи: високошвидкісний процесор відображення, модулі пам'яті зображень та керування генератором/курсором синхронізації. Система підтримує багатоканальну роботу, що забезпечує можливість кольорової динаміки руху. Вхідним пристроєм у цьому випадку є маніпулятор, який керує курсором і має перемикач переривання.

Растрові термінали працюють шляхом передачі електронного променя через екран зліва направо і зверху вниз з безперервною швидкістю проходження. Система створює зображення при активації світлої або темної точки в будь-якій точці екрану, вмикаючи або вимикаючи промінь, коли промінь проходить повз нього. Роздільна здатність трошки гірша, однак ці пристрої зазвичай мають багатокольорову функцію, можливе вибіркове стирання, і вони можуть запускати динамічну графіку в реальному часі.

Після того, як деталь спроектована на системі Unigraphics CAD/CAM, користувач може ввести підфункцію числового керування (N/C) і графічно імітувати обробку за допомогою токарного або фрезерного модуля. Окрім обробки деталі, система також створює вихідний файл із розташуванням (Cutter-Location, CL). Цей файл містить оператори руху інструменту, постпроцесорні та допоміжні

оператори для керування рухом інструменту, потоком охолоджуючої рідини, швидкістю шпинделя тощо. Перед відправленням CL-Source File постпроцесору оброблена частина перевіряється на коректність шляху інструменту. Спочатку це робиться візуально на відображеному терміналі, а потім відправляється на плоттер для остаточної перевірки. На терміналах Unigraphics візуальна перевірка дещо ускладнена. Усі об'єкти, а також шлях інструменту відображаються одним кольором. Більше того, коли інструмент рухається по деталі, він малює лінії вздовж свого шляху. Внаслідок цього до моменту завершення моделювання обробки інструментом на екрані з'являється безліч ліній, що у більшості випадків робить розрізнення деталі неможливим.

Крім того, інструмент не можна зупинити під час моделювання обробки для перевірки його розташування. Розроблена система усуває більшість цих недоліків. Хоча програмне забезпечення, описане тут, було написане спеціально для згаданої системи, його можна адаптувати для інших CAD/CAM систем та інших пристроїв для растрового відображення.

Система, розроблена в цій роботі, здатна передавати геометрію деталей і траєкторії інструментів з робочих станцій Unigraphics на термінали VS11, працюючи через нейтральну базу даних. Деталі можуть складатися з об'єктів, таких як точки, прямі, дуги, сплайни. Після передачі даних поверхні поверхню можна створити на терміналах VS11, використовуючи пакет VS11 3DGraphics.

Траєкторії інструментів – це ті, що генеруються за будь-якою опцією Mill Module у пакеті Unigraphics. До них належать такі функції, як свердління, профілювання та фрезерування пазів, що виконуються на фрезерних верстатах з 2, 2 та 2 та 5 осями або 3-5 осями. Після передачі на VS11 деталі можна перевести, повернути, збільшити або орієнтувати в будь-якому напрямку, і відображати шлях інструменту. Також відображаються координати розташування інструмента та його положення у вихідному файлі Cutter-Location у будь-який момент під час фрезерної операції; що надає користувачу можливість редагувати шлях інструменту.

Користувач має індивідуальний контроль над кольором, у якому відображається кожен перехід і інструмент. Доступні опції вимкнення будь-якого

переходу, забезпечення трасування інструменту, видалення інструменту та керування швидкістю подачі під час фрезерування.

При розробці системи особливу увагу приділяли таким факторам:

- інтерфейс системи;
- характеристики дисплея;
- взаємодія з користувачами.

Лівальд і Кеннікотт [16-19] обговорювали необхідність інтерфейсу додатків і обміну даними між різними системами. Інтерфейси залежать від стандарту цифрового представлення продукту; Вони – перший крок до інтеграції. Багато розробників [15–21] намагаються запропонувати гнучкі, але стабільні методи для представлення продуктів. Однак, оскільки у розглянутому тут випадку операційна система обох систем однакова, а дані мають обмінюватися між двома графічними програмними пакетами, розроблено нейтральний формат, через який системи взаємодіють. Перед тим, як розглядати обмін CAD/CAM даними, спершу необхідно встановити вміст даних [15–19]. Три фундаментальні компоненти даних – формат, представлення та значення – описані нижче, щоб визначити проблеми, які потрібно вирішити спроектованою системою.

Формат. Величезна кількість програмних і апаратних систем супроводжується рівним різноманіттям у представленні для цілих чисел, визначень з плаваючою комою та символів. Ця різноманітність методів проявляється у визначенні числових і символьних стандартів і у встановленні базової точності моделі. Додаткова складність у обміні або передачі даних CAD/CAM пов’язана з неможливістю визначити якість даних. Обробляючи дані після генеруючого додатка, слід усвідомлювати базову обчислювальну точність, яку можна досягти на генеруючому обладнанні, або значущу точність на пристрої відображення, а також точність, яку вимагає користувач. Більше того, не вся інформація, створена однією системою, потрібна іншій, особливо у нашому випадку. Непотрібні дані потрібно відібрати і відхилити.

Представлення. Існує кілька різних методів для представлення геометрії деталі. Одна з них – це «межа ребер» або *wireframe*, у якій межі деталі представлені набором просторових кривих. Ще один – «поверхневе представлення», яке

дозволяє точніше визначити геометрію, особливо для розташування, що не є на межі кромки. Метод представлення в системі, про який йдеться тут, – це поширена гібридна реалізація – «кромки-поверхневе представлення». В цьому методі головна геометрія визначається як каркас, між кромками можна виявляти поверхні для додаткової деталізації. Оскільки представлення для обох систем однакове, додаткових труднощів у інтерфейсі не виникають.

Значення. Компонент значення виражає намір проєктування даних, асоціюючи представлення об'єкта з реальним продуктом. Тобто, у частині, що складається з об'єктів, таких як лінії, дуги та точки, метод групування цих сутностей для надання бажаної форми реальній частині надає даним значення. Отже, значення охоплює як окремі елементи даних, так і сукупність елементів.

Вищезазначені складнощі передачі даних вирішуються програмним шляхом.

Притаманні відмінності двох системами, які відрізняються інтерфейсом, вимагають розробки іншої структури або формату відображення. Відображення в системі Unigraphics здійснюється через монітор дисплея (DVST) та окремий монітор повідомлень, а на VS11 це потрібно здійснювати лише через екран дисплея. Це можливо, якщо монітор дисплея також використовується для повідомлень. Екран поділений на три частини: області для відображення деталі, частина взаємодії користувача та область для повідомлення для розміщення інструменту. Деталі залишаються закріпленими на ділянках, призначених на екрані. Однак екран можна очистити від меню-області, якщо вона заважає відображеній частині, виконавши просту команду. Таку структуру експозиції також запропонував Gingerich та інші.

Можливо, жоден компонент інтерактивної програми не є більш непередбачуваним за продуктивністю, ніж інтерфейс користувача, тобто та частина програми, яка визначає, як користувач і комп'ютер спілкуються. Інтерфейс користувача найчастіше поділяється на чотири компоненти. Найважливішою з них є «модель користувача» – концептуальна модель, створена користувачем, яка по суті є інформацією, якою він маніпулює, і процесів, які він застосовує до цієї інформації. Ця модель дозволяє йому, навіть маючи мало або зовсім не маючи знань про комп'ютерні технології, широке розуміння того, що робить комп'ютер.

За допомогою моделі він може передбачити результати своїх дій і розробити власні сценарії роботи системи.

Коли користувач створює модель, йому потрібні команди для редагування. Системи команд, що надаються, можна назвати «мовою команд» і вони становлять другий компонент інтерфейсу користувача. Ідеально, якщо комп'ютерні команди наближені чи повторюють природні мови команд, щоб користувач сприймав їх інтуїтивно і не витрачав час на вивчення нової мови. Таким чином, розроблена система використовує вибір меню для формування інтерактивного діалогу між користувачем і системою, в якому відображається список або меню дійсних команд. Це форма онлайн-документації, меню звільняють користувача від запам'ятовування ключових слів і синтаксису. Меню можуть бути статичними або динамічними. Динамічні меню відображають значно менший набір команд у будь-який момент, але змінюються часто в міру розвитку інтерактивного діалогу.

Динамічні меню також можуть бути ієрархічними – і це так у нашій системі. У них початкове меню може відображати основні компоненти системи. Кожна команда в головному меню може вести до іншого підменю, надаючи користувачу більше варіантів вибору. Наприклад, у створеній системі два з шести варіантів у головному меню – це «опції» та «відкрити». Якщо користувач обирає «опції», наступне меню показує доступні опції, тобто колір, параметри інструменту тощо. Якщо вибрано «draw», меню показує об'єкти, які можна створювати – частину деталі або шлях інструменту.

Це динамічне, ієрархічне меню має перевагу над статичними або одиночними меню, оскільки: 1) певні введені команди можна використовувати для передбачення наступних команд; 2) невелике, змінне меню є кращим за велике меню, що включає весь набір команд.

Третім компонентом користувацького інтерфейсу є «зворотний зв'язок», за допомогою якого комп'ютер допомагає користувачу керувати програмою. Зворотний зв'язок має багато форм: підтвердження отримання команд, виринаючі повідомлення або вказування вибраних об'єктів. Розширена модель інтерактивного процесу, що показує шляхи зворотного зв'язку, зображена на рисунку 1.2.

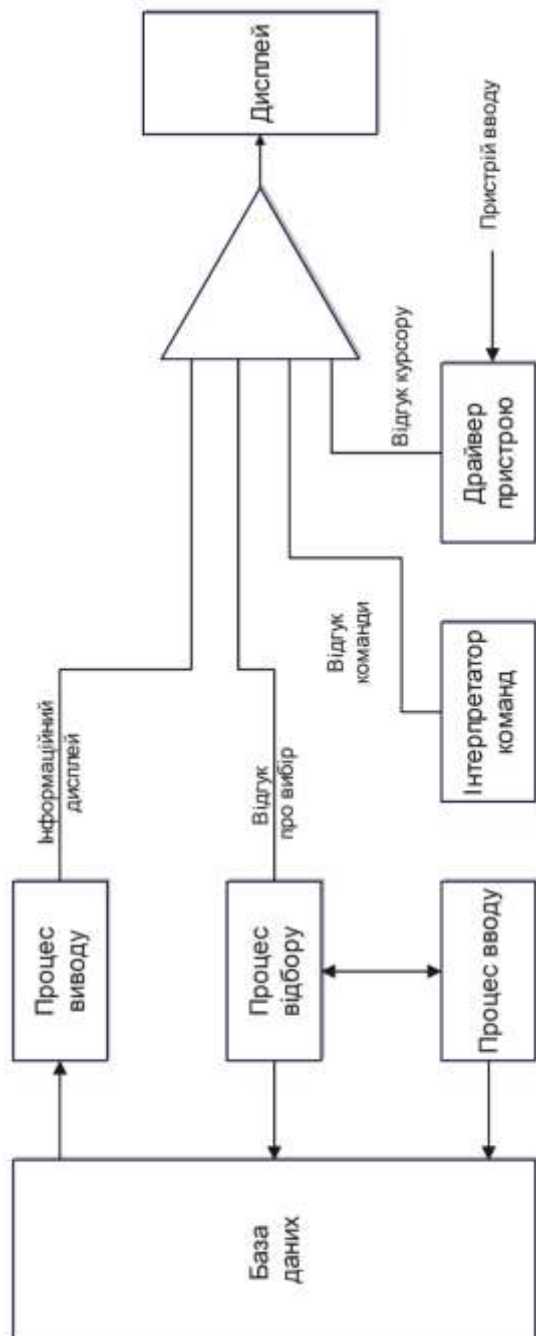


Рисунок 1.2 – Зворотній зв’язок в інтерактивній системі

Розроблена система запитує користувача, якщо введеної команди немає в меню, запитує кольори, необхідні для різних об’єктів тощо. Зворотний зв’язок допомагає користувачу бути впевненим, що його команди точно сприймаються та повністю розуміються програмою. Четвертий компонент – «відображення інформації» – необхідний, щоб показати стан інформації, якою маніпулює оператор. Акцент тут робиться на відображенні зображення так, щоб передати інформацію якомога ефективніше. Зображення є підтвердженням для користувача правильності моделі, і тому воно створене строго відповідно до обраної моделі.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання фрезерних верстатів з ЧПК шляхом створення сучасних програмних засобів для моделювання руху інструменту. Існуючі програмні рішення не завжди враховують специфіку конкретних технологічних процесів або є надмірно складними чи дорогими, що обумовлює доцільність розробки доступних і адаптивних систем моделювання.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка системи моделювання руху інструменту фрезерних верстатів з числовим програмним керуванням, яка забезпечує наочну візуалізацію траєкторій, аналіз процесу обробки та перевірку керуючих програм.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз принципів роботи фрезерних верстатів з ЧПК та існуючих систем моделювання;
- дослідити методи формування траєкторій руху інструменту;
- розробити математичну модель руху інструменту;
- створити програмну реалізацію системи моделювання;
- здійснити тестування та оцінку ефективності розробленої системи.

2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Загальна характеристика системи

Для вирішення задач кваліфікаційної роботи першим кроком стало дослідження існуючої системи. Це дозволить уявити роботу всієї системи і, таким чином, виявити моменти, які можна покращити.

В цьому розділі описано апаратне та програмне забезпечення Unigraphics CAD/CAM, а також процес створення та графічного відображення руху інструменту для фрезерної обробки з числовим програмним керуванням. Як уже зазначалося, система Unigraphics CAD/CAM має розглядатися як універсальна система з можливостями, типовими для сучасних систем.

Система Unigraphics працює на головному комп'ютері VAX 11/780 з 32-бітною адресацією та системою віртуальної пам'яті, що забезпечує фактично необмежений програмний простір. База даних системи розташована на дисках разом із програмним забезпеченням системи. Як показано на рисунку 2.1, головний комп'ютер підтримує шість робочих станцій Unigraphics (Tektronix 4014) та шість робочих станцій – терміналів VS11. Усі дванадцять терміналів можуть використовуватися як для графіки, так і для програмування додатків. Також підтримуються шість VT100-терміналів, які переважно використовуються для розробки програм.

Система на базі VAX підтримує загальні інженерні застосунки, а також специфічні пакети додатків, такі як CAD/CAM програмне забезпечення Unigraphics для механічної обробки. Unigraphics – це автономна система, що має можливості для проєктування, креслення, аналізу та виробництва. Система VAX підтримує шість робочих місць проєктування.

Кожна станція працює незалежно від інших. Екран перегляду для зберігання призначений лише для графічного відображення і має роздільну здатність 4096х4096 адресованих точок. Монітор повідомлень – це пристрій для підказки, який використовується для спілкування з користувачем і для збереження інформації. Користувач взаємодіє з меню і реагує на запити, які відображаються на екрані

монітора повідомлень. Клавіатура Program Function використовується для вибору опцій. Кожна кнопка на клавіатурі символізує операцію або функцію. Функціональні або числові кнопки підсвічуються на моніторі повідомлень. Буквено-цифрова клавіатура використовується для введення необхідних параметрів і тексту.

Детальний опис апаратного забезпечення Unigraphics наведено у Посібнику користувача Unigraphics.

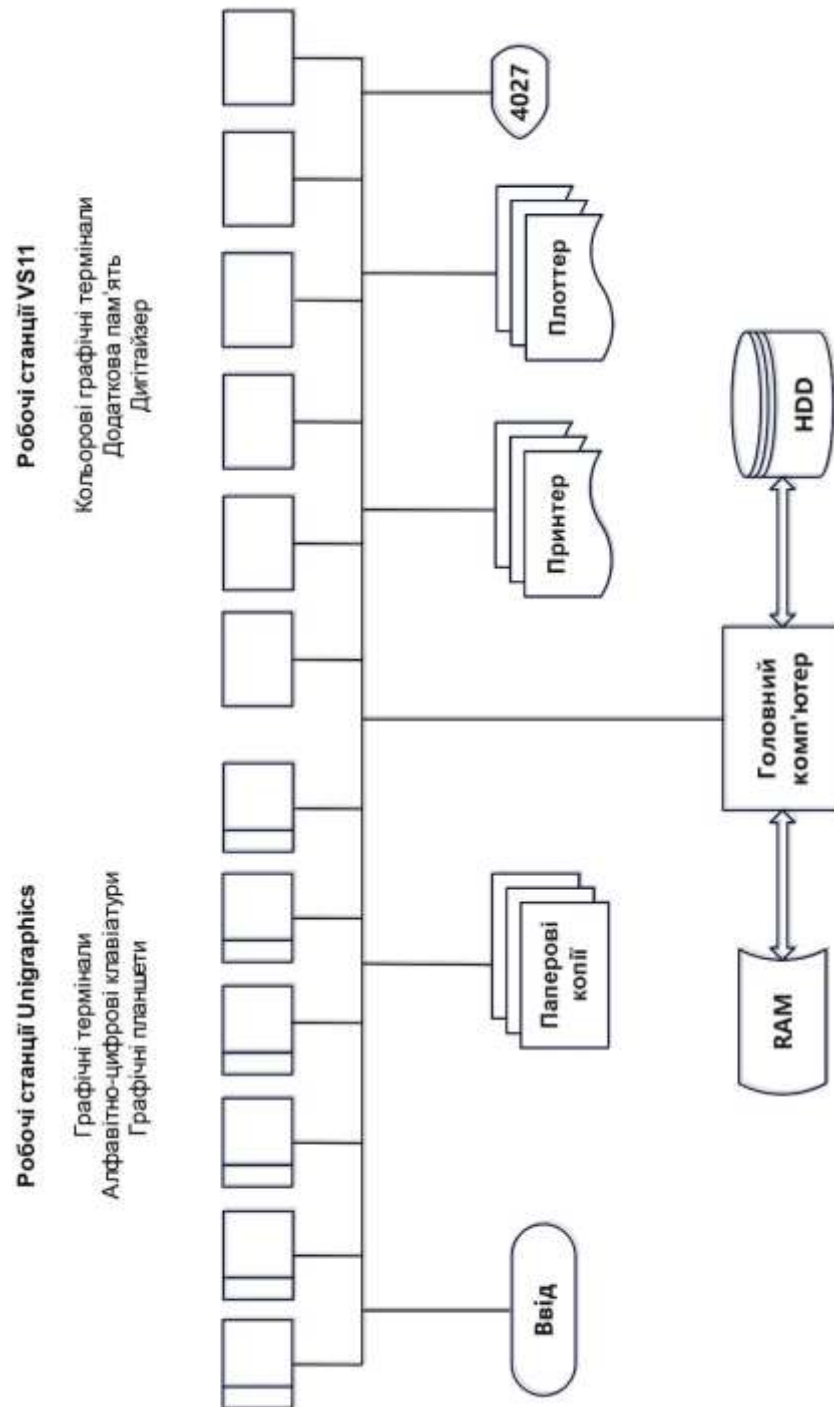


Рисунок 2.1 – Структура апаратного забезпечення системи

2.2 Програмне забезпечення Unigraphics

Unigraphics – це інтегрована система автоматизованого проєктування, технологічної підготовки виробництва та інженерного аналізу класу CAD/CAM/CAE. У сучасному вигляді система відома під назвою Siemens NX і належить компанії Siemens Digital Industries Software.

Система широко застосовується у машинобудуванні, авіаційній та автомобільній промисловості, приладобудуванні, робототехніці та виробництві верстатів з числовим програмним керуванням.

Історія Unigraphics починається у 1970-х роках. Основою системи стала розробка CAD-системи компанії United Computing для автоматизації конструкторських робіт у промисловості.

В 1976 році компанія McDonnell Douglas придбала права на систему та почала її активний розвиток для потреб авіакосмічної галузі. Перші версії працювали на високопродуктивних UNIX-станціях.

В 1980-х роках система отримала назву Unigraphics та стала однією з перших інтегрованих CAD/CAM-систем. Важливою особливістю було поєднання:

- тривимірного моделювання;
- створення креслень;
- підготовки програм для верстатів ЧПК;
- інженерного аналізу.

В цей період система активно використовувалася у:

- авіабудуванні;
- автомобілебудуванні;
- оборонній промисловості.

В 2001 році компанія Siemens через підрозділ EDS придбала Unigraphics Solutions. Після цього система почала розвиватися під брендом NX.

Сучасна система Siemens NX стала платформою повного цифрового циклу виробництва, що включає:

- CAD;
- CAM;

- САЕ;
- PLM-технології;
- цифрові двійники;
- автоматизацію виробництва;
- інтеграцію з Industry 4.0.

Програмне забезпечення Unigraphics інтегрує принципи, які базуються на знаннях, промисловий дизайн, геометричне моделювання, розширений аналіз, графічне моделювання та паралельну інженерію. Програмне забезпечення має потужні можливості гібридного моделювання, інтегруючи моделювання ознак на основі обмежень та явне геометричне моделювання. Окрім моделювання деталей зі стандартною геометрією, воно дозволяє користувачеві проектувати складні форми вільної форми, такі як аеродинамічні профілі та колектори. Він також об'єднує методи моделювання твердих тіл та поверхонь в один потужний набір інструментів.

Unigraphics використовується для широкого спектру завдань, основні з яких перелічені нижче.

1. CAD (Computer-Aided Design) – проектування

- Параметричне і пряме моделювання: Можливість створення точних 3D-моделей деталей та складних збірок, а також редагування геометрії без історії побудови.
- Промисловий дизайн: інструменти для створення візуалізацій, промислового дизайну та тестування продуктів.
- Моделювання поверхонь (Surface Modeling): Створення складних поверхонь вільної форми (Freeform), які використовуються в аерокосмічній та автомобільній промисловості.
- Робота з великими збірками: NX дозволяє працювати зі виробами, що містять тисячі унікальних компонентів, забезпечуючи високу продуктивність

Система дозволяє створювати:

- твердотільні моделі;
- поверхневі моделі;

- параметричні елементи;
- складальні одиниці.

Підтримується асоціативність між моделлю та кресленням, що забезпечує автоматичне оновлення документації після зміни геометрії.

Параметричний підхід дозволяє змінювати геометрію моделі шляхом редагування параметрів і залежностей.

Розробка креслень

Система автоматично формує:

- проєкції;
- розрізи;
- перерізи;
- специфікації;
- технічні вимоги.

Підтримуються міжнародні стандарти оформлення конструкторської документації.

2. CAM (Computer-Aided Manufacturing) – виробництво

- Підготовка виробництва: Створення керуючих програм для верстатів з ЧПУ (числовим програмним керуванням), включаючи токарну, фрезерну та багатоосьову обробку.
- Симуляція обробки: Перевірка траєкторій інструменту для запобігання зіткнень.

CAM-підсистема забезпечує:

- генерацію траєкторій інструменту;
- моделювання процесу обробки;
- перевірку зіткнень;
- оптимізацію режимів різання;
- створення NC-програм для верстатів ЧПК.

Система підтримує:

- фрезерну обробку;
- токарну обробку;

- багатовісну обробку;
- високошвидкісне фрезерування.

Моделювання руху інструменту

Однією з ключових можливостей є візуалізація та симуляція руху інструменту.

Система дозволяє:

- аналізувати траєкторії;
- виявляти колізії;
- контролювати кінематику верстата;
- оцінювати точність обробки;
- перевіряти NC-код до запуску на обладнанні.

Це особливо важливо для сучасних фрезерних верстатів з ЧПК.

CAE (Computer-Aided Engineering) – інженерний аналіз

- Аналіз та симуляція: Комплексний набір інструментів для вибору матеріалів, оцінки ваги, міцності, кінематики та динаміки механізмів.
- Оптимізація дизайну: Автоматизація процесу проектування для покращення характеристик продукту

В складі системи реалізовано:

- метод кінцевих елементів;
- аналіз напружено-деформованого стану;
- тепловий аналіз;
- динамічний аналіз;
- моделювання вібрацій;
- аеродинамічні розрахунки.

4. Керування життєвим циклом виробу (PLM)

Інтеграція з PLM-рішеннями дозволяє:

- вести базу моделей;
- контролювати версії;

- організовувати колективну роботу;
- керувати змінами у проєкті.

Ключовими особливостями системи Unigraphics є:

Високий рівень інтеграції

Всі модулі працюють у єдиному середовищі:

- CAD;
- CAM;
- CAE;
- PLM.

Це зменшує кількість помилок при передачі даних між етапами проєктування та виробництва.

Асоціативність моделей

Будь-які зміни у 3D-моделі автоматично відображаються:

- в кресленнях;
- в технологічних процесах;
- в програмах ЧПК.

Підтримка складних поверхонь

Система ефективно працює зі складною геометрією:

- турбінні лопатки;
- прес-форми;
- авіаційні деталі;
- кузовні елементи автомобілів.

Модульність

Користувач може підключати лише необхідні модулі:

- Modeling;
- Drafting;
- Manufacturing;

- Simulation;
- Routing;
- Mold Wizard тощо.

Основні переваги системи Unigraphics

1. Комплексність

Єдина система для проєктування, аналізу та виробництва.

2. Висока точність моделювання

Підтримка складної геометрії та багатовісної обробки.

3. Потужні САМ-можливості

Ефективне створення траєкторій інструменту для ЧПК.

4. Розвинена система симуляції

Можливість попередньої перевірки технологічного процесу.

5. Масштабованість

Підходить як для невеликих підприємств, так і для великих промислових корпорацій.

6. Інтеграція з сучасним виробництвом

Підтримка цифрових двійників та концепції Industry 4.0.

Недоліки системи Unigraphics

1. Висока вартість

Ліцензії та супровід системи потребують значних фінансових витрат.

2. Високі вимоги до обладнання

Для роботи необхідні продуктивні робочі станції.

3. Складність освоєння

Система має велику кількість модулів та функцій, що ускладнює навчання користувачів.

4. Тривалий період впровадження

Інтеграція системи на підприємстві може займати значний час.

5. Надлишковість функцій для невеликих підприємств

Для простих задач можливості системи можуть бути надмірними.

Отже, Unigraphics є однією з найпотужніших CAD/CAM/CAE-систем сучасності. Вона забезпечує комплексну автоматизацію процесів проєктування, моделювання, аналізу та підготовки виробництва. Завдяки широким функціональним можливостям система активно використовується у високотехнологічних галузях промисловості, особливо при створенні та моделюванні обробки деталей на верстатах з ЧПК.

Попри високу складність та вартість, система залишається ефективним інструментом для реалізації сучасних цифрових виробничих технологій.

Програмний пакет Unigraphics складається з кількох різних модулів, які пов'язані між собою, як показано на рисунку 2.2.

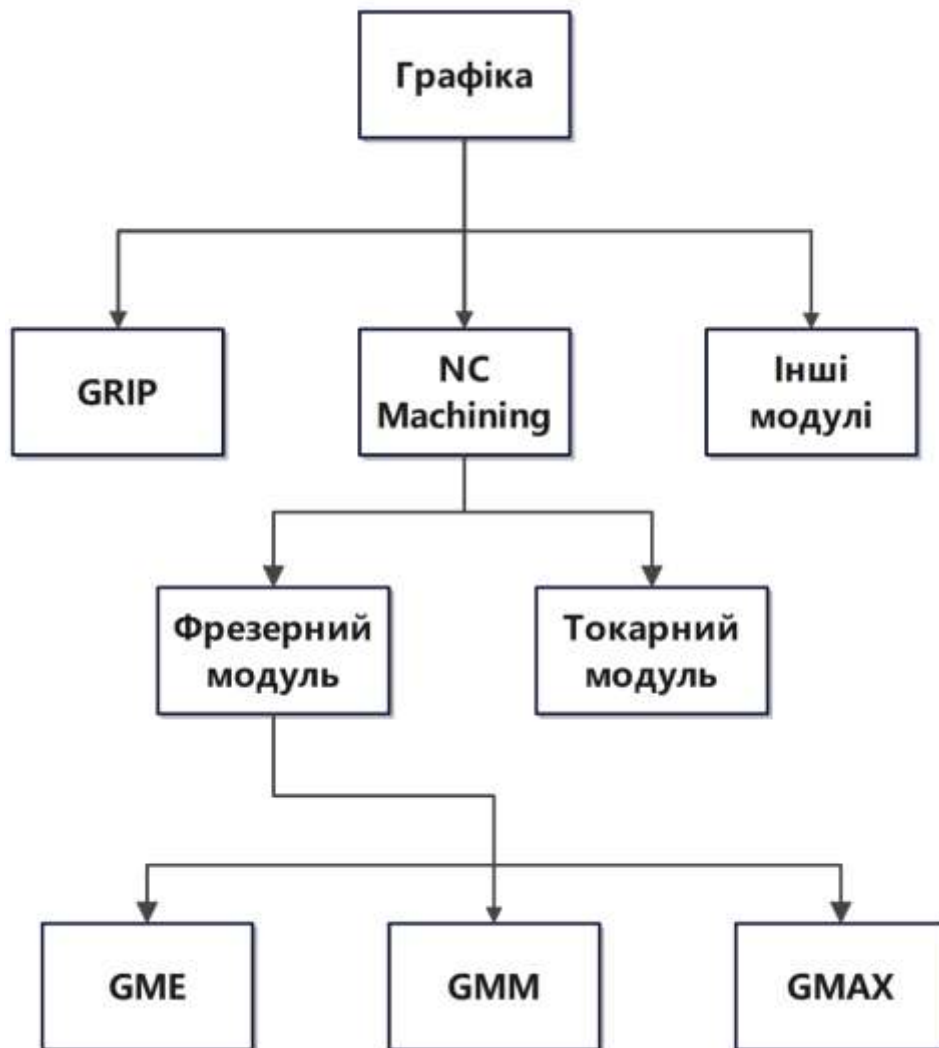


Рисунок 2.2 – Модулі Unigraphics

Система Unigraphics може використовуватися для генерації, зберігання, отримання та обробки геометричної та графічної інформації. Він може створювати комп'ютерні моделі та зображення тривимірних фігур на екрані DVST або виводити на друк, а також генерувати дані Cutter-Location (Cutter-Location, CL) для числового програмного керування. Проект, що є повною тривимірною моделлю деталі, може бути розроблений на системі Unigraphics. Користувач створює геометрію для опису об'єкта, що проектується, і цей опис зберігається в пам'яті комп'ютера. Збережена модель або деталь може використовуватися для створення повнорозмірних інженерних креслень або для генерації керуючих програм для механічної обробки. Крім того, створена модель може бути використана для подальших розрахунків, моделювання чи дослідження, наприклад, з використанням методу кінцевих елементів. Далі наведено короткий опис різних модулів, показаних на рисунку 2.2.

Функціональний модуль «N/C Machining» дозволяє користувачу обирати операції з верстатом і встановлювати параметри, які контролюються.

Модулі обробки Unigraphics пропонують інтерактивну графічну альтернативу традиційним методам програмування обробки на верстатах з ЧПК. Після побудови та перевірки геометрії деталі ця ж геометрія використовується як вхідна інформація для модулів обробки.

Основними модулями обробки, що підтримуються цим пакетом, є фрезерна і токарна обробка. Фрезерний модуль додатково поділяється на: 1) GME (Графічний редактор обробки) – цей модуль використовується як для свердління, так і для редагування вихідних файлів CL. 2) GMM (Graphics Mill Module) – цей модуль використовується лише для профілювання та зберігання деталей по 2- та 2-1/2 осях. 3) GMAX (Graphics Multi-Axis Module) – використовується для всіх фрезерних операцій, що виконуються на верстатах з 3-5 осями. Після введення додаткових даних, таких як розміри інструменту, швидкості, подачі та допуски, система автоматично генерує траєкторії інструменту і відображає рухи інструменту, імітуючи обробку деталі.

GRIP. Мова GRIP (Unigraphics Interactive Programming) є опціональним

розширенням Unigraphics, яке надає користувачу альтернативний спосіб керування системою. Практично будь-яка операція, яку можна виконати інтерактивно в Unigraphics, також може бути виконана, виконуючи команди програми GRIP. Наприклад, доступні команди GRIP для створення геометрії та розмірів, а також для перетворень і управління файлами. Крім того, існує кілька команд, які дозволяють програмі GRIP спілкуватися з користувачем під час роботи, відображаючи повідомлення та меню.

GRIP (Unigraphics Interactive Programming) – це вбудована мова програмування та система автоматизації, що використовується в CAD/CAM/CAE-системі Unigraphics (Siemens NX). GRIP була розроблена для створення користувацьких програм, автоматизації інженерних розрахунків, генерації геометрії та керування функціями системи.

Unigraphics Interactive Programming належить до методологій, які використовуються для автоматизації завдань, налаштування інтерфейсу користувача та генерування траєкторій руху інструменту безпосередньо в середовищі NX CAD/CAM/CAE. Це включає традиційні мови сценаріїв, сучасну інтеграцію API та створення функцій, які визначаються користувачем.

Мова GRIP з'явилася у ранніх версіях Unigraphics у 1970-1980-х роках як засіб адаптації CAD-системи під конкретні виробничі задачі. У той час промислові підприємства потребували:

- автоматизації рутинних операцій;
- створення параметричних моделей;
- розробки спеціалізованих модулів;
- інтеграції CAD із системами виробництва.

GRIP стала однією з перших мов високого рівня для програмування CAD/CAM-систем.

GRIP використовувалась для:

- автоматичного створення геометричних об'єктів;
- параметричного моделювання;
- генерації креслень;
- автоматизації технологічної підготовки виробництва;

- створення власних меню та діалогів;
- керування обробкою деталей на верстатах з ЧПК;
- виконання математичних та інженерних розрахунків.

GRIP є процедурною мовою програмування, орієнтованою на взаємодію з геометричним ядром Unigraphics.

Програма GRIP складається з:

- операторів;
- змінних;
- геометричних команд;
- циклів;
- умов;
- викликів системних функцій.

Після написання код:

- 1) компілюється;
- 2) перетворюється у внутрішній формат;
- 3) виконується всередині середовища Unigraphics.

До основних можливостей GRIP належать геометричне моделювання, параметричне програмування, автоматизація виконання креслень, САМ-програмування та інженерні розрахунки.

Геометричне моделювання.

GRIP дозволяла створювати:

- точки;
- лінії;
- дуги;
- поверхні;
- тверді тіла.

Приклад задач:

- автоматична побудова фланців;
- генерація зубчастих коліс;
- створення профілів деталей.

Параметричне програмування.

Користувач може задавати:

- параметри;
- залежності;
- формули.

Наприклад: діаметр отвору; товщину стінки; кількість зубців.

Це дозволяло швидко змінювати конструкцію виробу.

Автоматизація виконання креслярських робіт.

GRIP використовується для:

- автоматичного оформлення креслень;
- нанесення розмірів;
- створення специфікацій;
- генерації технічної документації.

CAM-програмування

GRIP інтегрується із CAM-модулями та дозволяє:

- автоматично створювати траєкторії інструменту;
- генерувати NC-програми;
- оптимізувати режими обробки.

Інженерні розрахунки.

GRIP підтримує:

- математичні функції;
- логічні операції;
- цикли;
- роботу з масивами.

Це дозволяло виконувати:

- розрахунок параметрів деталей;
- перевірку конструкцій;

- оптимізацію моделей.

Мові GRIP притаманні низка специфічних особливостей, з яких можна виділити: процедурний стиль, тісну інтеграцію з CAD-системою, наявність спеціалізованих команд, пакетний режим роботи. Ці особливості ставлять її в один ряд з іншими мовами програмування високого рівня і забезпечують широку сферу застосування.

За процедурним стилем мова GRIP подібна до таких широко поширених мов програмування як FORTRAN, BASIC; а також інших CAD-мов.

Мова GRIP забезпечує тісну інтеграцію з CAD-системою Unigraphics. Зокрема вона має прямий доступ до геометрії моделі, атрибутів об'єктів, креслень, САМ-операцій.

Мова GRIP містить спеціалізовані команди, зокрема такі CAD-орієнтовані оператори як:

- створення геометрії;
- модифікація поверхонь;
- побудова контурів;
- аналіз моделей.

Суттєвою перевагою мови GRIP є можливість роботи в пакетному режимі. Завдяки цьому GRIP-програми можуть виконуватись автоматично, без або при обмеженій участі користувача. Можливість роботи в пакетному режимі дозволяє використовувати функціонал програм в складі виробничих процесів.

Приклад GRIP-програми

```

$$
START
REAL/DIAMETER
DIAMETER = 50
POINT/P1,0,0,0
CIRCLE/C1,P1,DIAMETER
FINI
$$

```

Ця програма створює змінну, задає діаметр, створює точку, будує коло.

Основними перевагами GRIP є можливість автоматизації проєктування, висока гнучкість, тісна інтеграція з виробництвом, параметричність, зменшення кількості помилок.

Автоматизація проєктування дозволяє значно скоротити час створення моделей та креслень.

Гнучкість мови забезпечує можливість створення власних інженерних модулів.

Здатність GRIP підтримувати взаємодію CAD/CAM/CAE забезпечує тісну інтеграцію з виробництвом.

Параметричність полегшує модифікацію конструкцій і процесів, тобто дозволяє оперативно вносити зміни в конструкцію виробу, структуру і параметри технологічного процесу виготовлення.

Застосування мови дає можливість підвищити рівень автоматизації, а також зменшити вплив людського фактора, зокрема шляхом скорочення помилок, що дозволить досягти покращення цілого ряду техніко-економічних показників проєкту в цілому.

Разом з тим, мові притаманні і певні недоліки, серед яких можна виділити складність вивчення, обмежений інтерфейс, застаріла архітектура, залежність від Unigraphics.

Складність вивчення пояснюється тим, що для повноцінного використання мова вимагала базових знань CAD і програмування, а також внутрішньої структури Unigraphics.

GRIP має порівняно прості засоби створення GUI, що з іншого боку компенсується невибагливістю до системних ресурсів.

Залежність від Unigraphics проявляється в тому, що програми здатні працювали лише всередині системи, проте за умови використання в виключно в виробничих умовах цей недолік дещо нівелюється.

Перелічені недоліки практично не понижують значення мови, хоча вона поступово стає стала менш ефективною порівняно із такими сучасними API як NX Open, Python API, C++, Java, UFUNC, Knowledge Fusion.

В наш час GRIP все ще використовується на виробництві, в спадкових CAD/CAM-проектах, та в архівах автоматизованих систем.

Мова GRIP має велике значення для розвитку CAD/CAM, зокрема стала важливим етапом розвитку параметричного моделювання, автоматизації CAD, CAM-програмування та інтегрованих інженерних систем. Вона заклала основу для сучасних API та систем автоматизації в CAD/CAM/CAE-середовищах.

Як вже було зазначено, GRIP – це мова високого рівня. Вона дозволяє виконувати математичні обчислення, включає різні можливості розгалуження та циклів, а також дозволяє використовувати окремо скомпільовані підпрограми. Будь-яка систематична процедура проектування може бути закодована як програма GRIP, яка автоматично виконує процедуру при обмеженій участі користувача, який може приймати рішення і вводити дані лише за потреби. Програми GRIP можуть надавати широкий спектр можливостей – від незначних індивідуальних удосконалень до складних систем груп деталей, які автоматично створюють повні набори інженерних креслень. GRIP використовується для створення конструкцій елементів технологічного оснащення для закріплення деталей, які підлягають фрезерній обробці. Моделі цих елементів параметричні і розроблені для групи деталей, тобто для кожної конкретної деталі і виду обробки можна вибрати типорозмір.

Інші модулі. Unigraphics Finite Element Module (GFEM) – це обов’язковий модуль, який надає користувачам скінченних елементів інструмент для графічного моделювання. Через GFEM інженерна група може виконувати як проектування, так і моделювання на одній системі. Після завершення етапу проектування існуючу частину можна використовувати для генерації вузлів і скінченних елементів.

Опційний модуль Unigraphics Schematic Module (GSM) дозволяє користувачу створювати робочі креслення, а потім генерувати Bills of Materials та Connector Lists на основі цих креслень.

GSM має три основні можливості:

- 1) створення та підтримка бібліотеки символів, визначених користувачем;
- 2) створення та підтримка робочих креслень;
- 3) Створення інформації, пов’язаної з запасами матеріалів.

2.3 Сучасна методологія проєктування фрезерної обробки на верстатах з числовим програмним керуванням

Блок-схема процедури проєктування фрезерування деталі в існуючій системі зображена на рисунку 2.3. Користувач спочатку створює тривимірну модель деталі, яка обробляється інтерактивно, відповідаючи на повідомлення. Реакція користувача на систему здійснюється через функції програми та натисканням відповідних клавіш на буквено-цифровій клавіатурі. Після побудови та перевірки геометрії інструменту ця ж геометрія використовується як вхід для обробних модулів. Користувач вводить підфункцію «N/C Machining» через клавіатуру Program Function. Відповідні підмодулі – GME, GMM або GMAX – використовуються для отримання шляхів інструменту, необхідних для обробки деталі, а також вводяться всі технологічні дані, такі як розміри інструментів, швидкості, подачі та допуски. Після цього система автоматично генерує потрібні шляхи інструменту і відображає рухи інструмента, імітуючи обробку деталі. Одночасно система створює вихідний файл Cutter Location (CL) у каталозі користувачів, до якого можна отримати доступ пізніше. CL-Source File містить усю інформацію про інструмент і рухи інструментів, таку як розміри інструментів, назви траєкторій руху інструменту, швидкість подачі, розташування інструментів тощо.

Наступний крок – перевірка того, що деталь була правильно оброблена. Це робиться візуально на дисплейному терміналі і може бути передано на плоттер для додаткової перевірки. Файл CL-Source можна редагувати для внесення будь-яких змін в траєкторію руху інструменту, а також для введення деяких постпроцесорних і допоміжних команд, специфічних для конкретного обладнання. Тепер оброблений файл можна зберегти і надіслати фрезерний верстат для фактичної обробки деталі.

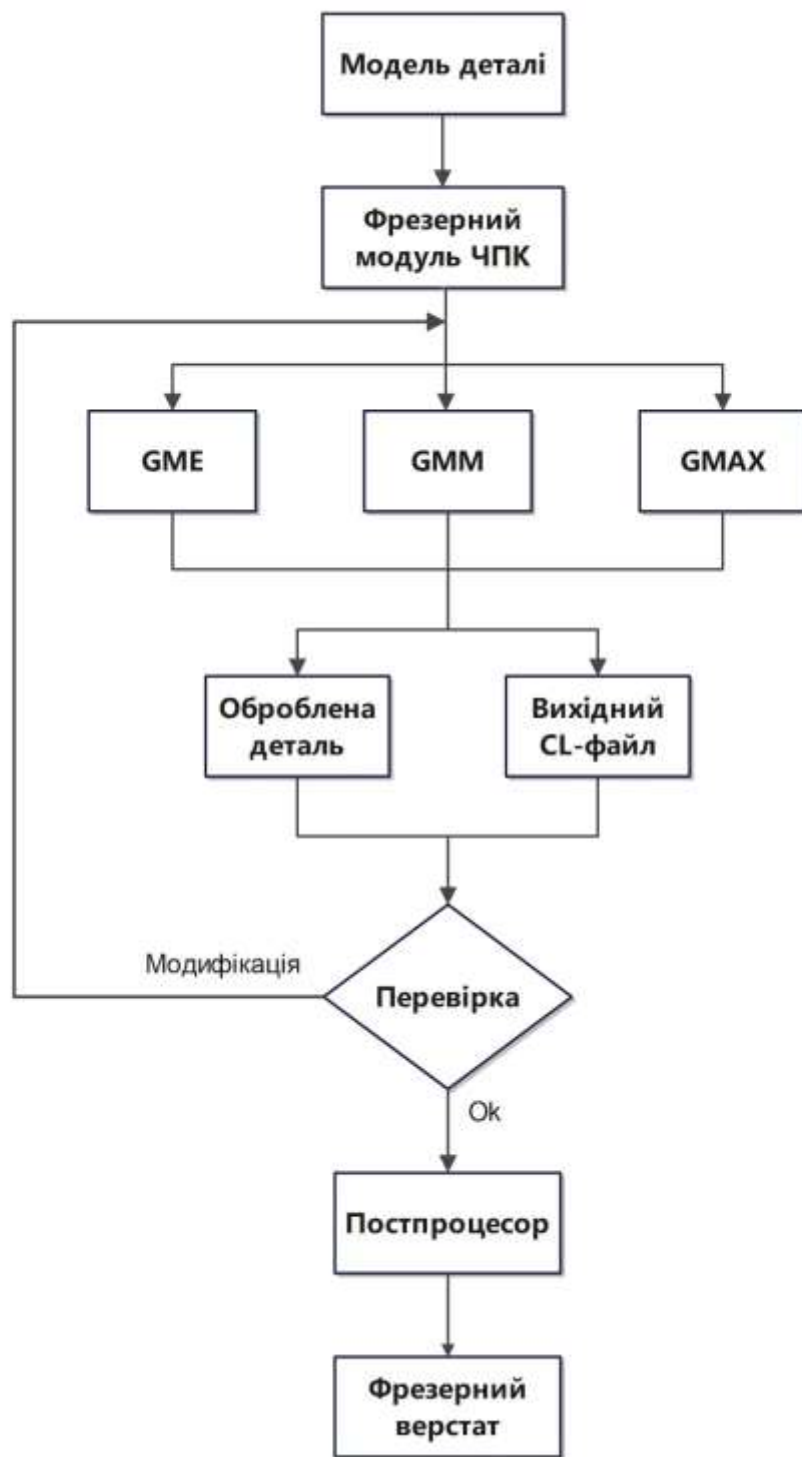


Рисунок 2.3 – Процедура фрезерування в існуючій системі

2.4 Аналіз переваг та недоліків існуючої системи

У більшості застосувань комп'ютерної графіки якість і особливості зображення, яке відображається мають велике значення. Сучасні термінали Unigraphics мають тип Direct View Storage Tube (DVST) і представляють

зображення у вигляді робочих креслень або каркасних моделей. Як уже згадувалося, ці термінали мають високу роздільну здатність (4096x4096 адресованих точок) і відображають яскраво-зелене зображення. Однак, як і більшість DVST, вони можуть генерувати зображення з одним рівнем інтенсивності лінії і лише одним кольором через апаратні обмеження.

Крім того, однією з природних проблем Direct View Storage Tube є складність видалення заряду для стирання зображення. Звичайний метод стирання тут полягає у подачі позитивної напруги на керуючий електрод, що видаляє весь заряд, але також створює досить неприємний спалах по всій поверхні екрана. Ця проблема стирання є серйозною проблемою DVST, оскільки вона унеможливорює використання пристрою для динамічних графічних застосунків. Цей недолік особливо очевидний у випадку фрезерного модуля, де інструмент креслить лінії над деталлю, що підлягає обробці, через що майже неможливо відрізнити цю деталь серед лабіринту ліній на екрані. Проблему ускладнює те, що всі лінії мають однаковий колір. Рисунки 2.4 і 2.5 ілюструють цей приклад. На рисунку 2.4 зображена деталь, яка була розроблена на системі Unigraphics і відображена на DVST. А на рисунку 2.5 показано, як виглядає процес виконання необхідних операцій механічної обробки.

Візуальна перевірка траєкторії руху інструменту на пристрої відображення є обов'язковою, оскільки вона усуває можливі неполадки ще на стадії проектування, до обробки на верстаті, економлячи машинний час, час підготовку виробництва, час оператора та матеріали. В цьому випадку DVST має перевагу завдяки своїй високій роздільній здатності.

Але нездатність зупинити інструмент у будь-якому положенні під час обробки можна віднести до суттєвих недоліків системи. На цих терміналах, після початку обробки, неможливо зупинити її між переходами та перевірити розташування інструменту. Також неможливо запускати динамічну графіку через обмеження апаратного забезпечення. База даних також є проблемою, оскільки без визначень поверхні конструкція не може виявити перешкоди з інструментом та елементами технологічного оснащення, що вимагає візуального виявлення перешкод.

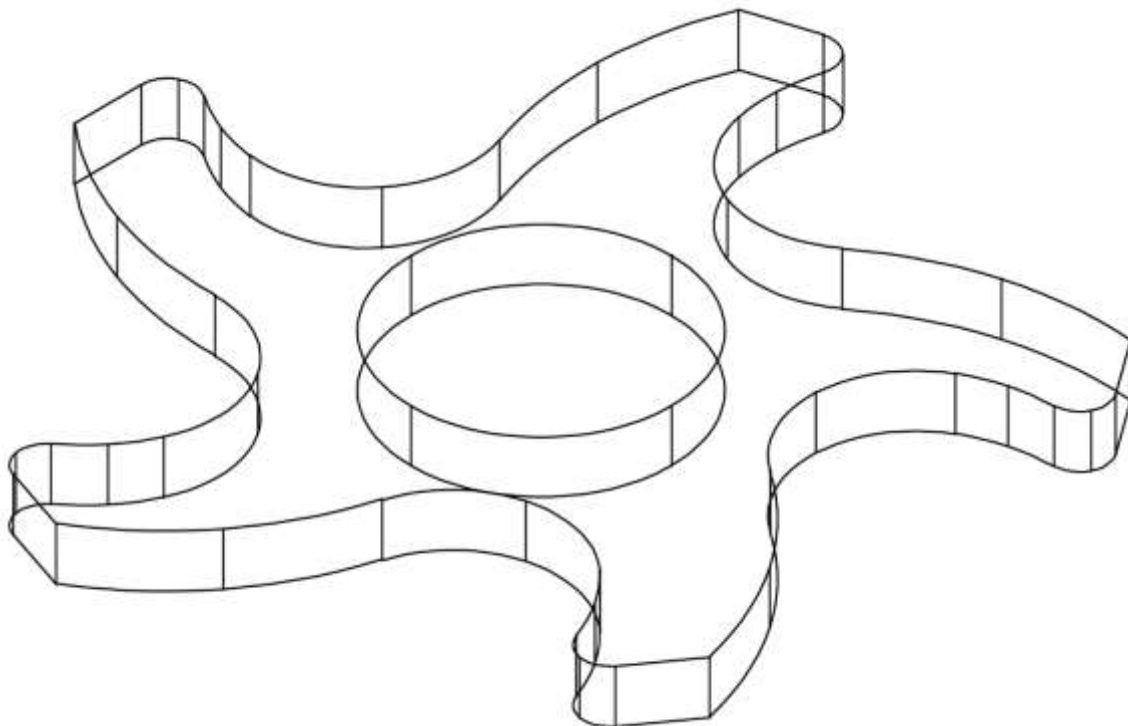


Рисунок 2.4 – 3D-модель деталі, виконана в середовищі Unigraphics

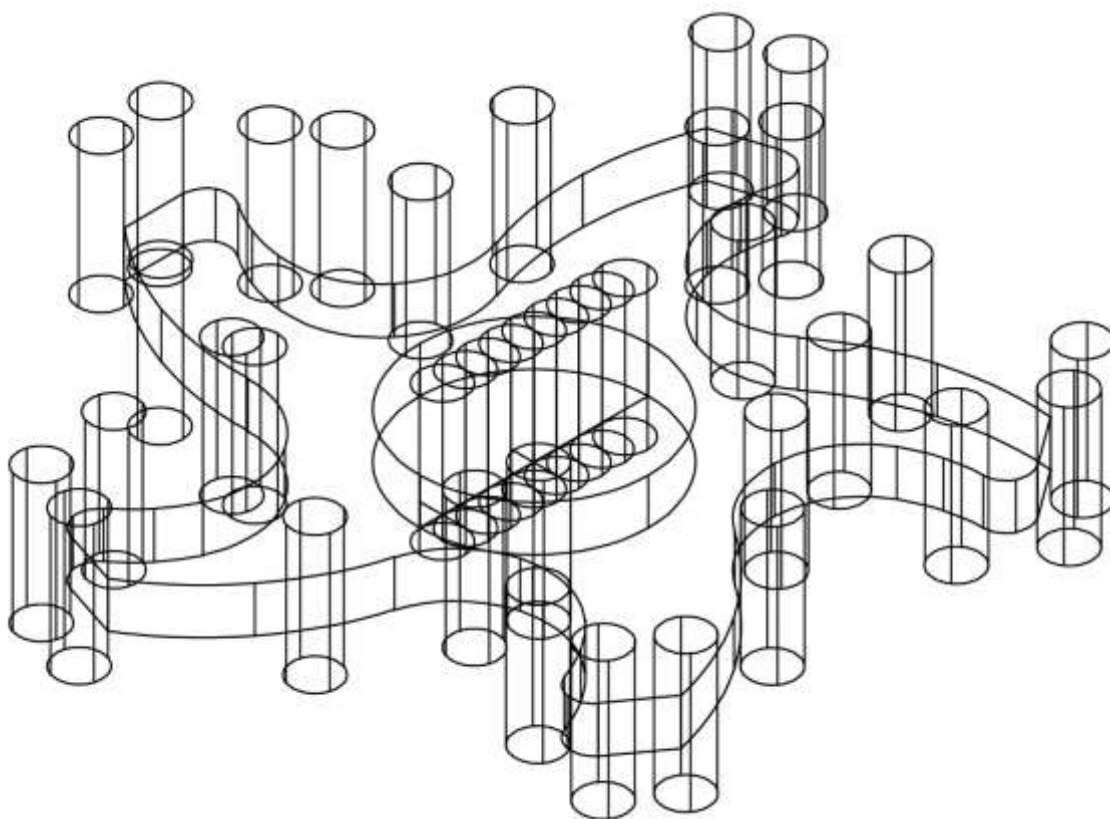


Рисунок 2.5 – 3D-модель деталі в процесі обробки

2.5 Опис графічної системи VS11

Система VS11 – це кольорова відеографічна система, що складається з трьох модулів, підтримується на міні-комп'ютері VAX 11/780. Більшість недоліків системи Unigraphics можна усунути за допомогою растрового терміналу типу VS11. Далі наведено опис апаратне та програмне забезпечення цієї системи. Багато функцій системи VS11 є загальними для технології растрового сканування.

Основними компонентами системи VS11 є: високошвидкісний процесор дисплея, модулі пам'яті зображень та керування генератором/курсором синхронізації.

Система використовує високошвидкісний мікропроцесор як дисплейний процесор і пам'ять зображень для зберігання піксельних даних процесора. Пам'ять зображення постійно «зчитується» на системному моніторі для відображення піксельної інформації. Використання пам'яті зображень усуває потребу зберігати файл дисплея в центральному процесорному блоці головного комп'ютера (CPU) і дозволяє змінювати файл зображення після першого проходу читання.

Чотири з шести терміналів VS11 мають по одному каналу пам'яті кожен. Динамічна графіка може працювати як на цих терміналах, так і на п'ятому і шостому терміналах – які мають два канали пам'яті – що забезпечує більш плавне динамічне відображення. Таким чином, для терміналу з подвійною пам'яттю, поки один канал пам'яті записується процесором дисплея, інший канал пам'яті може бути «зчитуваний на системному моніторі, і навпаки. Це призводить до меншої втрати часу між створенням і відображенням зображення, що забезпечує більш плавне відображення. Усі термінали здатні відображати шістнадцять різних відтінків кольору. Канали пам'яті мають роздільну здатність 512x512 і інтенсивність 4 біти для кожного системного монітора, тоді як два канали пам'яті мають роздільну здатність 512x256 біт і 4 біти інтенсивності.

Три основні функції, які представлені рис. 2.6 – це три модулі системи, а саме:

- 1) дисплейний процесор;
- 2) пам'ять зображень;

3) генератор синхронізації/керування курсором.

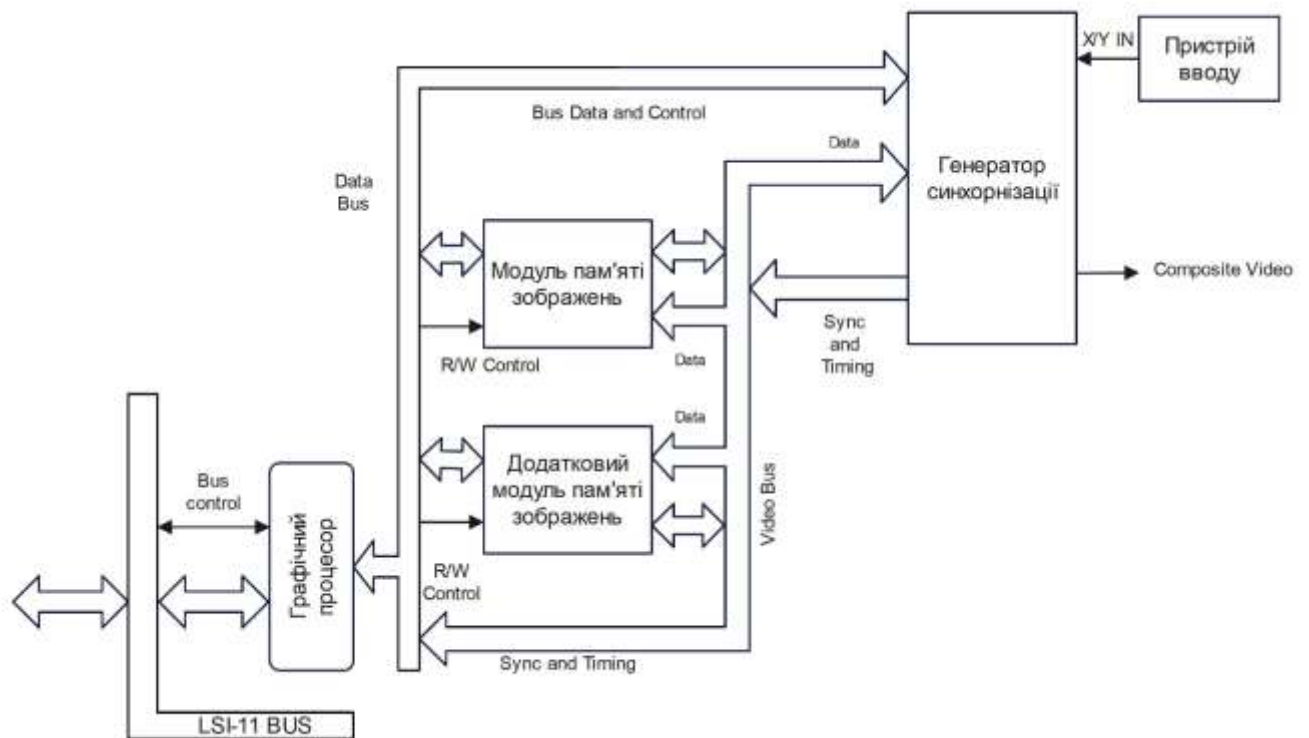


Рисунок 2.6 – Блок-схема базової графічної системи VS11

На рисунку також показано додаткову пам'ять зображення та пристрій вводу, який підключений до всіх систем і може використовуватися для керування курсором, якщо потрібно.

Система VS11 працює як пристрій прямого доступу до пам'яті (DMA) на системній шині. Таким чином він уникає навантаження на процесор; тобто він зчитує дані дисплея з пам'яті незалежно від процесора, з якого просто «краде» цикл пам'яті щоразу, коли потрібна інструкція. Після побудови файлу зображення в пам'яті процесора початкова адреса файлу передається на лічильник програм відображення (DPC) у процесорі відображення. Потім Display Processor робить непроцесорні запити (NPR), щоб отримати доступ до шини. Коли майстер шини, Display Processor, отримує прямий доступ до пам'яті процесора (DMA), він зчитує файл зображення, який складається з графіки, даних та керуючих інструкцій. Ці інструкції обробляються процесором дисплея, налаштовують графічний режим, регістри стану та керуючі функції, а також містять інформацію про піксель (елемент зображення) для відображення. Інформація про зображення, оброблена Display Processor, надсилається до пам'яті зображень для зберігання та подальшого

відображення на системному моніторі.

Image Memory зберігає «зображення» піксельної інформації, яка відображається на системному моніторі. Піксельні дані, отримані від процесора дисплея, зберігаються у пам'яті з довільним доступом (RAM) на пам'яті зображення. Цифрові дані для відображення зчитуються з пам'яті на генератор синхронізації/керування курсором через відеошину. Оскільки пам'ять зображення зберігає зображення, яке потрібно відобразити, файл відображення в пам'яті процесора не потрібен для оновлення дисплея і може змінюватися після передачі його вмісту на VS11. Опційні модулі пам'яті зображень можуть бути додані до базової системи VS11 для підвищення роздільної здатності пікселів, запуску динамічної графіки або для роботи на кількох моніторах і/або кількох каналах.

Генератор синхронізації/керування курсором забезпечує цифрово-аналогове перетворення піксельних даних із пам'яті зображення для відображення на системному моніторі. Схеми керування курсором в Sync обчислюють позиції для відображення на системному моніторі на основі методу введення. Положення пристрою вводу передається процесору дисплея через шину пам'яті/DBUS під час переривання перемикання.

Дані, які відображаються VS11, спочатку організовуються у файл зображення в пам'яті хост-процесора. Файл складається з серії інструкцій VS11 (графічна, керуюча та дані), які визначають зображення. Після створення файлу зображення «програма» VS11 ініціюється шляхом переміщення початкової адреси файлу на лічильник VS11 Display Program Counter (DPC). Після запуску VS11 надсилає непроцесорні запити на послідовність через інструкції файлу відображення та генерацію потрібного зображення на системному моніторі. Оскільки VS11 містить пам'ять зображення, безперервне оновлення зображень з пам'яті процесора не потрібне. Після одного проходження через файл пам'яті файл відображення може бути змінений або видалений.

Зображення створюються шляхом запису піксельних даних в одну або кілька пам'яті зображень. Пам'ять, яку потрібно записати, має бути увімкнена для запису програмою за допомогою керуючої інструкції, і оскільки одночасно можна увімкнути більше однієї пам'яті для запису, програма повинна переконатися, що

пам'ять, яку не потрібно записувати, перебувають у стані Read-only або Protect. Після запису графічних даних програма повинна переконатися, що пам'ять переведена у стан лише для читання або читання/запису, щоб піксельні дані були «зчитувані» на моніторі.

VS11 3D-графічний пакет призначений для створення та відображення користувацьких зображень на терміналах VS11. Основні геометричні об'єкти для малювання зображень можуть складатися з точок, ліній, дуг або сплайнів. Також можливо представляти лінійні поверхні, циліндр і поверхні обертання. VS113D Graphics Package – це збірка підпрограм для підтримки графіки на терміналі VS11.

Фрагмент програмного коду для створення зображення як на рисунку 2.7 наведено нижче.

```
LOGICAL T,F
T=.TRUE.
F= .FALSE.
CALL INIT
CALL SETWIN( 0., 511., 0., 479., 500., 500., 1)
CALL DISWIN(1, 1)
CALL NEWCOL(2)
CALL POINTA(-75., -75., 0., T, IO, 0, 1)
CALL DRAWR(150., 0., 0., T, 1, 1)
CALL DRAWR(0., 150., 0., T, 1, 1)
CALL DRAWR(-150.,0.,0.,T,1,1)
CALL DRAWR(0., 150., 0., T, 1, 1)
CALL NWCSXY(0., 0., 0., 1., 0., 0., 0., 1., 0., 1)
CALL CIRC3D(0., 0., 0., 40., T, 1, 1)
CALL AXES(1, 1, 20, T)
CALL SEND
STOP
END
```

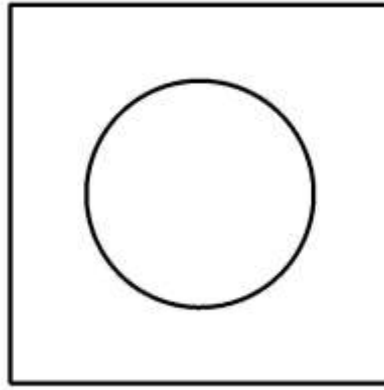


Рисунок 2.7 – Приклад графічного об'єкта

Цей метод графічного представлення не вимагає від користувача глибоких знань та навичок для роботи з системою. Більшість елементів програмного забезпечення опрацьовуються цими процедурами і є прозорими для користувача. Наприклад, підпрограма 'INIT' ініціалізує драйвер VS11, щоб він був готовий приймати інші графічні та керуючі інструкції. Це також переводить обидва канали пам'яті в режим читання/запису, що дозволяє відображати дані з обох каналів. Підпрограма 'SETWIN' визначає мінімальні та максимальні X, Y та Z межі вікна та присвоює вікну число. Підпрограми 'POINT', 'LINE' та 'CIRC3D' креслять точки, лінії та кола у відповідь на визначених позиціях. Команда 'AXES' будує координатну вісь в бажаній позиції, а команда 'SEND' передає вміст буфера кадру на системний монітор, таким чином будуючи зображення, представлене викликами інших підпрограм перед 'SEND'.

Можна динамічно відображати зображення, а також виконувати трансляцію, обертання, масштабування окремого елемента або масштабування всього зображення.

Слід підкреслити, що дві графічні системи, згадані вище, переважно незалежні одна від одної, і водночас є повноцінними пакетами самі по собі. Однак обидві системи мають різні можливості: деякі завдання, які можна виконати набагато краще на одній, не можуть бути виконані так добре в іншій, і навпаки. Існують також завдання, які наразі можна виконувати лише на одній системі, але вони виглядали б набагато ефективніше на іншій. Отже, потрібно інтегрувати

системи так, щоб більшість, якщо не всі функції були доступні на обох системах.

Проект, розроблений в цій кваліфікаційній роботі, є одним із кроків у цьому напрямку. За основу прийнято фрезерний модуль і підключено його до терміналів VS11, щоб усі обробка з числовим програмним керуванням, яка виконується на терміналах Unigraphics, тепер могла відображатися на растрових терміналах VS11. Зображенням руху інструменту можна інтерактивно маніпулювати, що дозволяє користувачу використовувати такі можливості, як обертання, масштабування, масштабування інструменту та деталі, що обробляється.

Користувач має повний контроль над кольорами, які можна призначити різним об'єктам. Інструмент можна зупинити в будь-якій точці, а його місцезнаходження підтвердити за відображеними координатами. Оскільки інструмент не залишає слідів уздовж свого шляху руху (це зберігається як опція), деталь, що підлягає обробці, не закривається лініями, проведеними інструментом. Деталь може бути орієнтована в будь-якому положенні для кращого відображення, виконання операцій обробки та перевірки на наявність перешкод. За бажанням користувач може збільшити будь-яку частину деталі, яку потрібно обробити, щоб детальніше розглянути деталі операції обробки. Усі ці переваги роблять модуль фрезерування більш універсальним. Недоліком дисплея VS11 є нижча роздільна здатність порівняно з Unigraphics.

2.6 Розробка системи моделювання руху інструменту фрезерних верстатів з ЧПК

В цьому розділі представлені характеристики інтерактивної системи, призначеної для відображення руху інструменту на фрезерних верстатах з числовим програмним керуванням з використанням динамічної інтерактивної графіки в реальному часі. Система була розроблена з урахуванням сучасних технологій та деяких програмних функцій, які наразі перебувають на стадії розробки.

Опис характеристики спроектованих систем складається з трьох частин.

Перша стосується базової конфігурації системи, включаючи деякі програмні аспекти та опції користувацького інтерфейсу. Друга частина описує фактичний спосіб генерації даних, їх отримання з бази даних однієї системи, а також передача і зберігання у нейтральний формат. В третій частині описуються можливості, які забезпечує система для генерації та відображення переданих даних. Також пояснюється структура меню команд і опції, які користувач має для керування відображенням інструменту.

На рисунку 2.8 зображено блок-схему процедури відображення траєкторії переміщення інструменту в системі, яка розробляється.

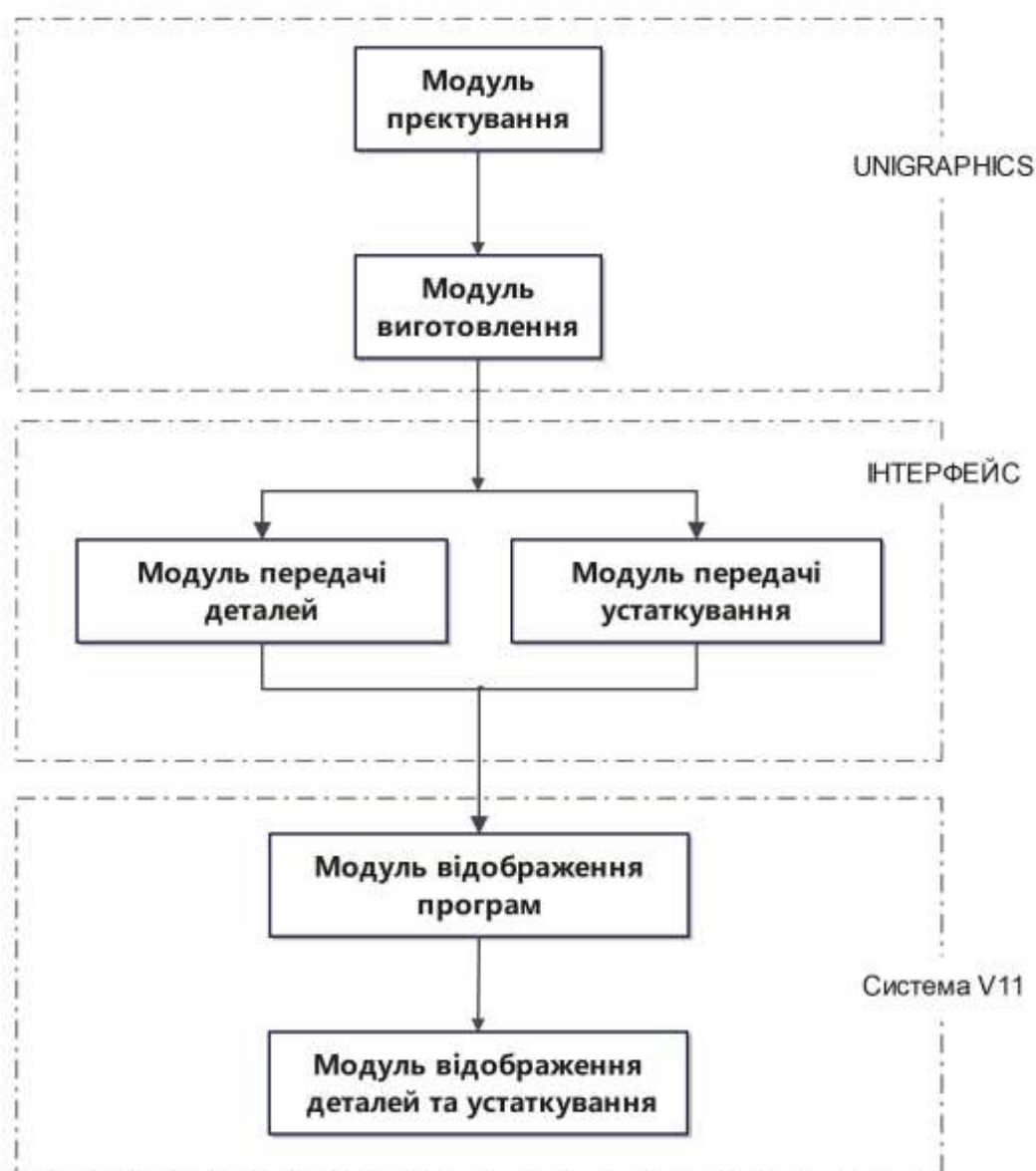


Рисунок 2.8 – Процедура відображення траєкторії руху інструменту

Спочатку для генерації зображення деталі для обробки використовується

система Unigraphics CAD/CAM. Необхідні операції обробки виконуються для заданої деталі за допомогою фрезерного модуля, і система відображає рух інструмента. Для передачі цих даних та відповідних файлів для відображення на терміналах VS11, використовується програма передачі (TOOL-TRANSFER), а потім програма відображення (TOOL-DISPLAY). Система працює в інтерактивному режимі, де користувач спілкується та обирає опції. Інтерфейс людина/машина реалізується за допомогою меню, яке може обрати користувач і яке з'являється на графічному екрані і дає підказки користувачу для взаємодії в режимі реального часу.

При розробці ефективної, зручної для користувача та незалежної від структури системи було детально враховано кілька факторів. Ці фактори поділяються на три складових:

- 1) технологія обробки;
- 2) формат відображення;
- 3) структура меню команд.

Для кожного з цих пунктів враховувалися характеристики та можливості, описані раніше. Для проєктування системи потрібне чітке розуміння структури бази даних Unigraphics. Після отримання цього було розглянуто різні способи передачі цих даних на термінали VS11, зокрема специфікацію графічного обміну та структуру бази даних Tornado. Оскільки передача даних у цій системі включала лише Mill Module, було вирішено зберігати дані у нейтральному форматі, у неформатованих файлах, до яких можна було безпосередньо отримувати доступ з іншої програми для відображення на моніторі. Це усунуло потребу у розробці графічних препроцесорів або постпроцесорів, що зекономило значну частину пам'яті та підвищило швидкість виконання програм передачі та відображення.

Відображення в Unigraphics здійснюється через Direct View Storage Tube, а повідомлення відображаються через системний монітор. Користувач реагує на систему через програмні функції та термінальні клавіатури. Натомість VS11 відображає як повідомлення/команди, так і графічні зображення лише на моніторі. Додаткові пристрої вводу не використовуються, достатньо лише клавіатури для відповідей користувачів. Можливе також використання мишки для вибору пунктів

меню і підтвердження/відміни вибору.

Структура меню команд має ієрархічний динамічний тип. Меню відображаються на екрані лише за запитом користувача при натисканні відповідної комбінації клавіш або виборі мишкою, що дозволяє не перевантажувати інформацією робочий простір. Меню мають максимум три рівні, кожен з яких містить не більше шести варіантів. Можливості системи включають масштабування, трансляцію, обертання та масштабування, а також індивідуальний контроль кольору для кожного елементу деталі та інструменту. Вибрану деталь можна відобразити під будь-яким кутом, а також виконувати обробку. Швидкість відображення інструмента контролюється – швидка або повільна. Стандартні затискні пристрої, призначені для утримання деталі під час обробки, щоб отримати реалістичне зображення руху.

2.7 Генерація, передача та зберігання даних в системі моделювання обробки на фрезерних верстатах з ЧПК

Першим кроком є розробка деталі на Unigraphics і обробка її за допомогою Mill Module, який автоматично генерує вихідний файл Cutter-Location (Cutter-Location, CL). Це генерує дані для деталі та траєкторії інструменту в базі даних.

Наступний крок – прочитати ці графічні дані та конвертувати їх у стандартний або нейтральний формат. Ці дані можна зберегти і пізніше отримати для подальшого відображення в бажаній системі. По суті, дані мають передаватися у два етапи. Перший етап полягає у передачі деталі для обробки, а другий – у передачі файлу CL-Source. Для передачі файлів частин використовувався Unigraphics/Files-11 Interface Package (UFIP), як зазначено в Unigraphics Programmers Manual. UFIP складається з пакету підпрограм, який дозволяє зберігати та отримувати файли даних Unigraphics між бібліотеками Unigraphics і форматом Files-11 на головному комп'ютері VAX 11/780. Крім того, передача файлів дає змогу створювати та отримувати доступ до частин Unigraphics та

CL-Source Files на рівні Files-11.

Файли деталей складаються з різних примітивів, таких як точки, лінії, дуги, сплайни тощо. Кожен з цих примітивів зберігається в базі даних Unigraphics в певному форматі. Для передачі цих файлів і отримання координатної інформації кожного примітива використовувалися підпрограми в пакеті UFIP. Ці процедури передають файли між двома системами і дозволяють читати потрібну інформацію у новий файл даних у користувацькому форматі, до якого можна отримати доступ і відобразити пізніше.

CL-Source Files містять інформацію про положення інструмента, розміри інструмента, швидкість і швидкість подачі. Нижче наведено текст нередагованого CL-Source File, що містить базові команди. Не вся інформація у CL-Source File потрібна для відображення шляхів інструменту на системі VS11.

```
FROM/0,0,0
TOOL PATH/0.125,0.000,1.000,P1
INDEX/10
GOTO/5.000,-0.125,1.500
CIRCLE/5.000,1.000,1.500,0.000,0.000,-1.000,1.125,
0.002,0.500,0.250,0.000
GOTO/6.125,1.000,1.500
GOTO/6.125,3.000,1.500
CIRCLE/5.000,3.000,1.500,0.000,0.000,-1.000,1.125,
0.002,0.500,0.250,0.000
GOTO/5.000,4.125,1.500
GOTO/1.000,4.125,1.500
CIRCLE/1.000,3.000,1.500,0.000,0.000,-1.000,1.125,
0.002,0.500,0.250,0.000
GOTO/-0.125,3.000,1.500
GOTO/-0.125,-0.125,1.500
GOTO/5.000,-0.125,1.500
INDEX/10,NOMORE
```

```
COPY/10,SAME,2
END-OF-PATH
TOOL PATH/0.125,0.000,1.250,P2
CYCLE/DRILL
GOTO/0.500,0.500,2.000
GOTO/3.000,0.500,2.000
GOTO/5.000,0.500,2.000
GOTO/5.000,3.000,2.000
GOTO/3.000,3.000,2.000
GOTO/0.500,3.000,2.000
CYCLE/OFF
END-OF-PATH
FIN I
```

Розглянемо структуру CL-Source файла разом із деякими важливими командами.

Зазвичай перша інструкція у CL-Source File – це оператор «FROM». Це постпроцесорна команда, яка керує верстатом і надає йому інформацію про позицію, з якої має починатися рух інструменту. Інші команди, такі як постпроцесорні та макро-команди, відповідають цьому виразу.

Програма TOOLTRANSFER ігнорує команду, доки не зустрине наступний значущий вираз «TOOL PATH». Він містить інформацію про інструмент – його діаметр, кут і довжину – а також назву траєкторії. Оскільки ця інформація потрібна пізніше для відображення, вона зберігається.

Далі йде оператор "CYCLE", який повідомляє верстату, що наступні команди є командами для свердління. Програма TOOL TRANSFER встановлює прапорець для програми відображення TOOL DISPLAY і переходить до наступного запису.

Команди «GOTO» та «CIRCLE» містять інформацію про шлях інструменту та орієнтацію інструменту. У випадку обробки по осях 2 та 2 і 1/2 оператор «GOTO» має три аргументи – координати розташування центру інструменту. Вісь інструменту в цьому випадку завжди розташована вздовж додатного Z-напрямку.

В п'ятивісній обробці команда «GOTO» має шість аргументів: координати розташування центру інструменту та одиничні вектори осі інструменту, що описують орієнтацію інструменту. Вся інформація в команді "GOTO" зберігається, оскільки вона потрібна пізніше для відображення.

Команда «CIRCLE» виконується щоразу, коли інструмент рухається по круговій дузі. Ця команда завжди має одинадцять аргументів, з яких нам потрібні лише перші сім. Це координати X, Y, Z центру дуги, по якій рухається інструмент, одиничні вектори осі інструменту та радіус шляху.

Наступні команди – «INDEX» і «COPY», які призначені для шляхів інструментів, які повторюються. За допомогою цих команд користувач може переносити, обертати або копіювати ту саму траєкторію інструменту у будь-якому визначеному місці. Останні дві команди – «END» і «FINI». «END» позначає кінець шляху інструменту. Команда «FINI» не вставляється системою. Ця команда є останнім оператором у файлі CL-Source, і користувач повинен переконатися, що перед передачею файлу з Unigraphics у VS11 ця команда вставлена.

Були апробовані різні методи доступу до CL-Source File з бібліотеки Unigraphics для подальшої передачі до системи VS11. Першим метод передбачав отримання доступу до файлу CL-Source з бібліотеки для миттєвої передачі.

Другий метод передбачав передачу CL-Source файлів, таких як файли даних деталей, за допомогою підпрограм UFIP.

Ще одним варіант передбачав конвертацію CL-Source файл у Grip Source File за допомогою програми Grip. Далі програма переносить цей «Grip File» у формат Files-11, де ним можна було легко маніпулювати для відображення.

Файли CL-Source не могли бути доступні безпосередньо з бібліотеки, оскільки адреса пам'яті, де вони зберігаються, недоступна користувачу.

Другий підхід не був успішним через відсутність доступності структури даних Unigraphics CL-Source Files.

Останній підхід, хоча й передбачає ще один крок, досить простий і підтримується постачальником. Файли можна передавати з бібліотеки CL-Source через бібліотеку GRIP Source до каталогу VS11 без зміни формату чи трансляції даних. Процес досить швидкий і не займає багато часу за комп'ютером.

Процедура передачі файлів між програмними модулями зображена на рисунку 2.9.

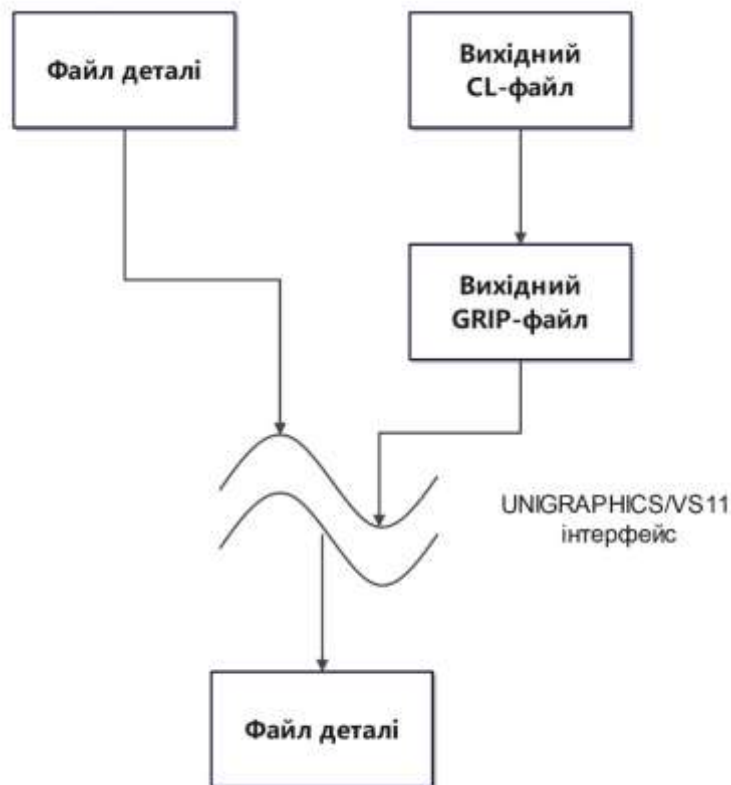


Рисунок 2.9 – Процедура передачі файлів

Файл CL-Source з наведеного прикладу був фізично перенесений (без зміни формату) з бібліотеки CL-Source у Unigraphics через Grip до системи VS11. Після отримання цей файл потрібно відредагувати, щоб видалити команди, які не потрібні для відображення, такі як постпроцесорні та машинні команди. Це здійснюється програмою передачі TOOL-TRANSFER, яка потім переносить решту команд у нейтральний формат, звідки їх можна отримати і потім відобразити на терміналах VS11 разом із анімованим відображенням траєкторії інструменту за допомогою процедури TOOL-DIDPLAY. Було випробувано кілька методів зберігання даних – як форматованих, так і неформатованих – послідовних, прямого доступу, індексованих і відносних.

Найкращим методом було зберігання даних у неформатованих файлах і послідовна їх організація. Перевага надається неформатованим файлам, оскільки збережені дані використовувалися іншою програмою, яка потім маніпулювала ними перед використанням. Неформатований ввід/вивід економить час виконання,

усуваючи процес трансляції даних, зберігає більшу точність зовнішніх даних і зазвичай економить місце у файловому сховищі.

Програма передачі даних TOOL TRANSFER, яка була розроблена для вибору необхідних даних із CL-Source File і їх зберігання в іншому файлі даних, описується блок-схемою на рисунку 2.10.

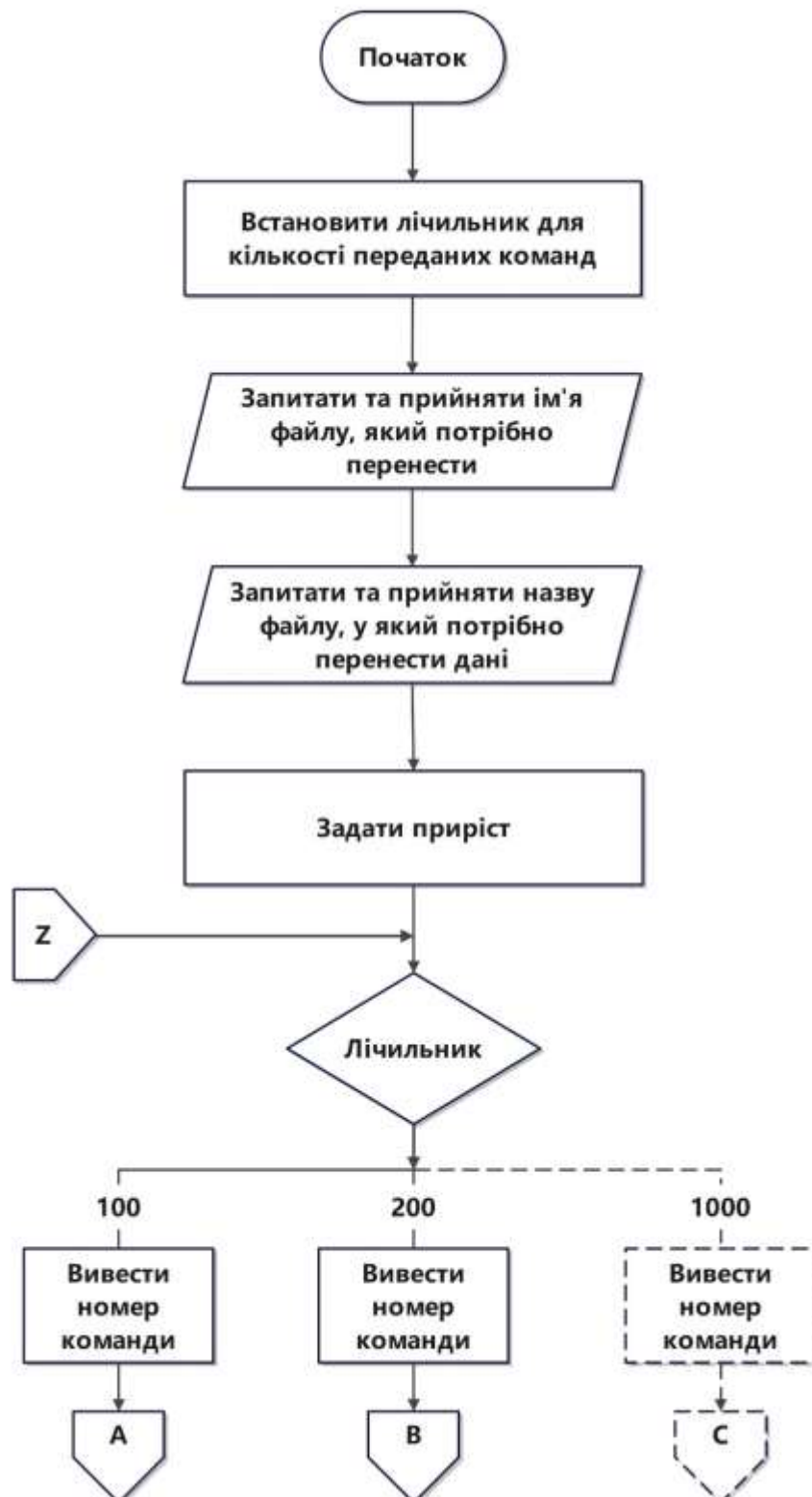


Рисунок 2.10 – Блок-схема алгоритму передачі даних

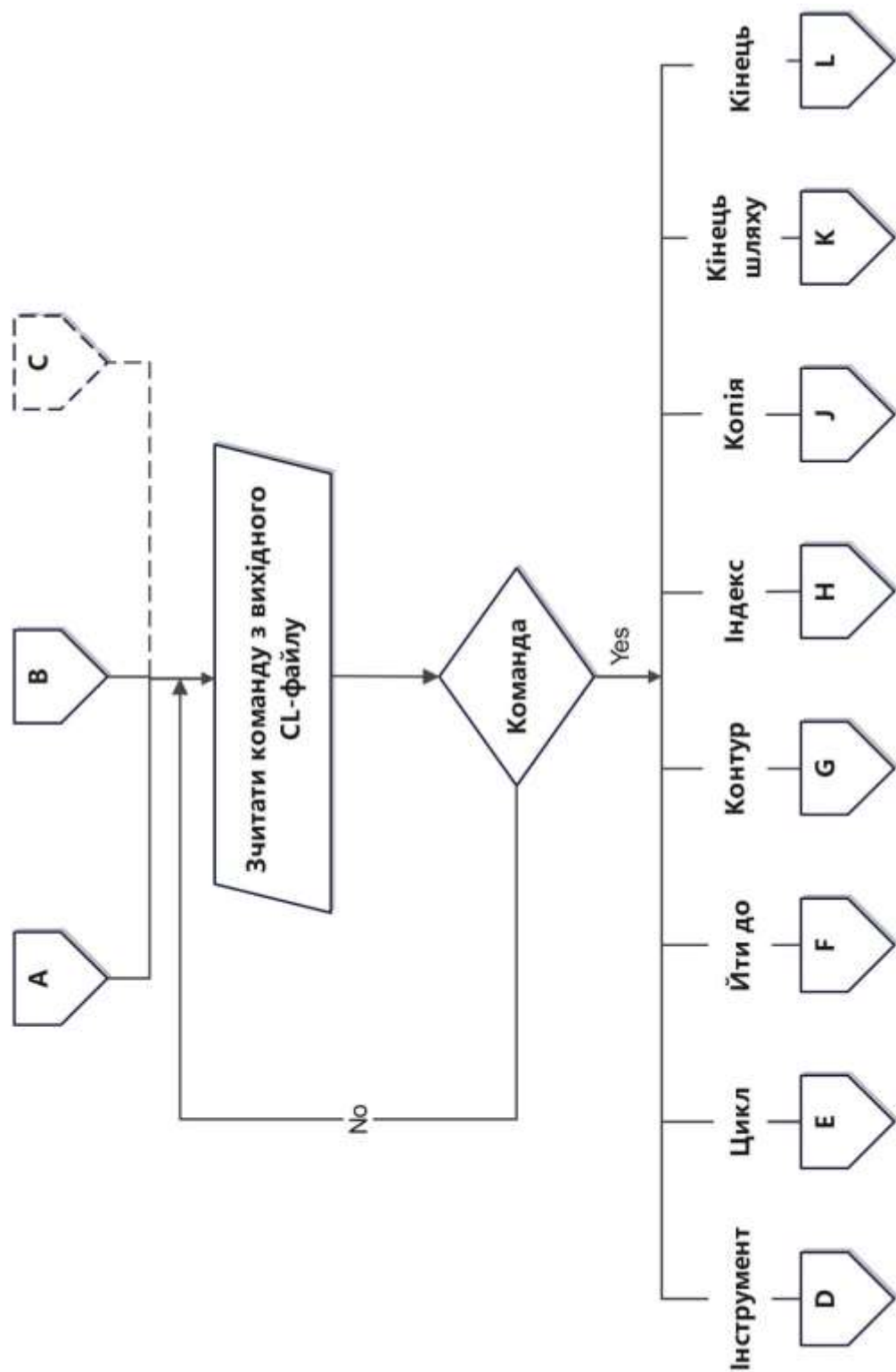


Рисунок 2.10 – Продовження

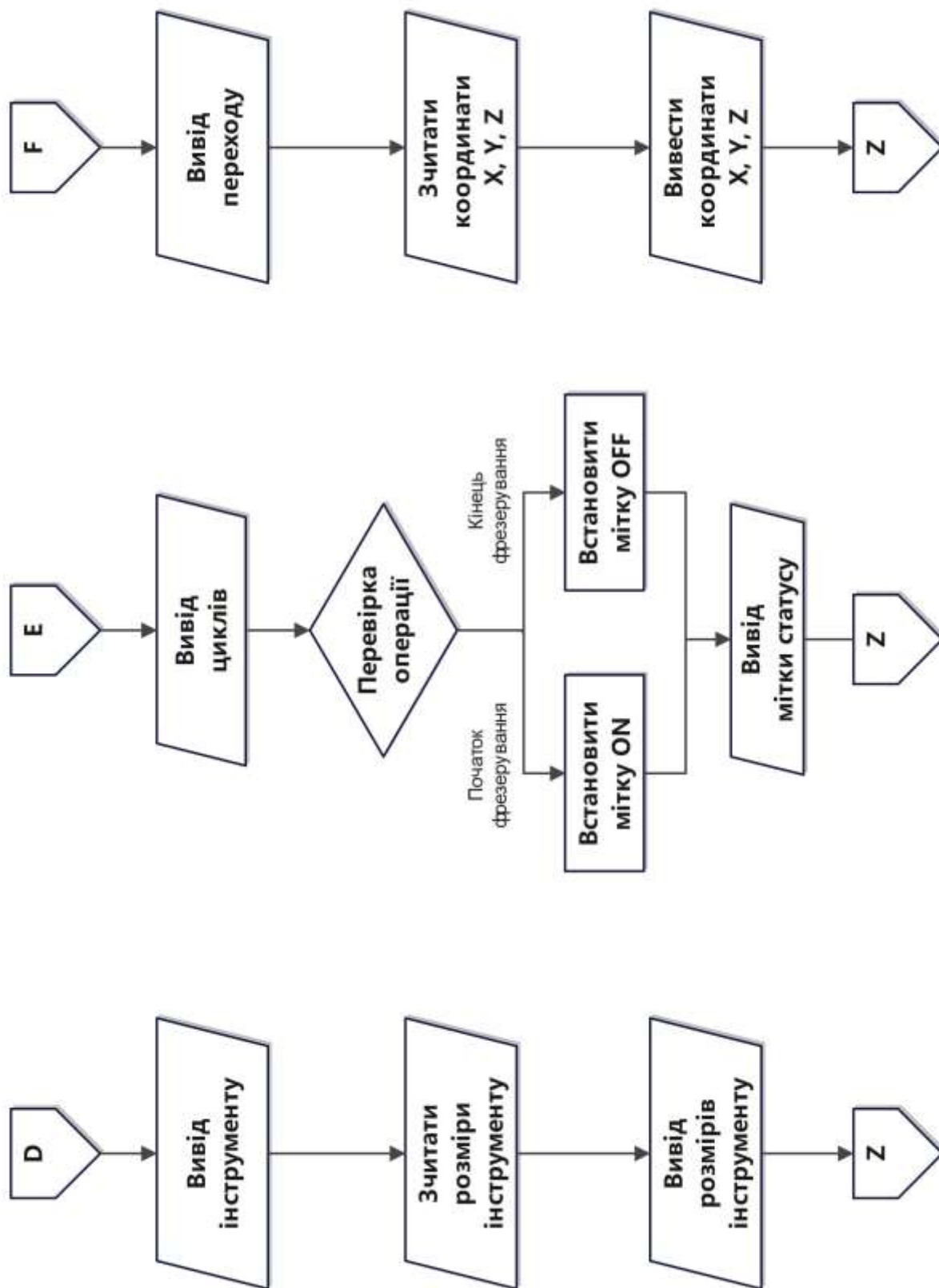


Рисунок 2.10 – Продовження

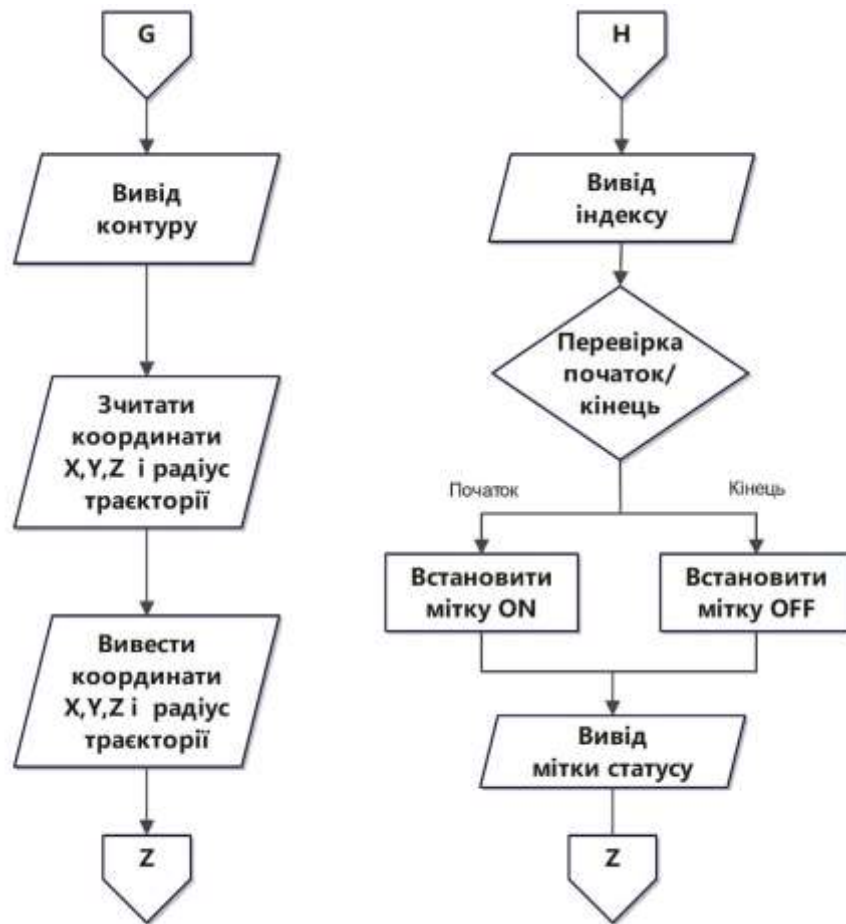


Рисунок 2.10 – Продовження

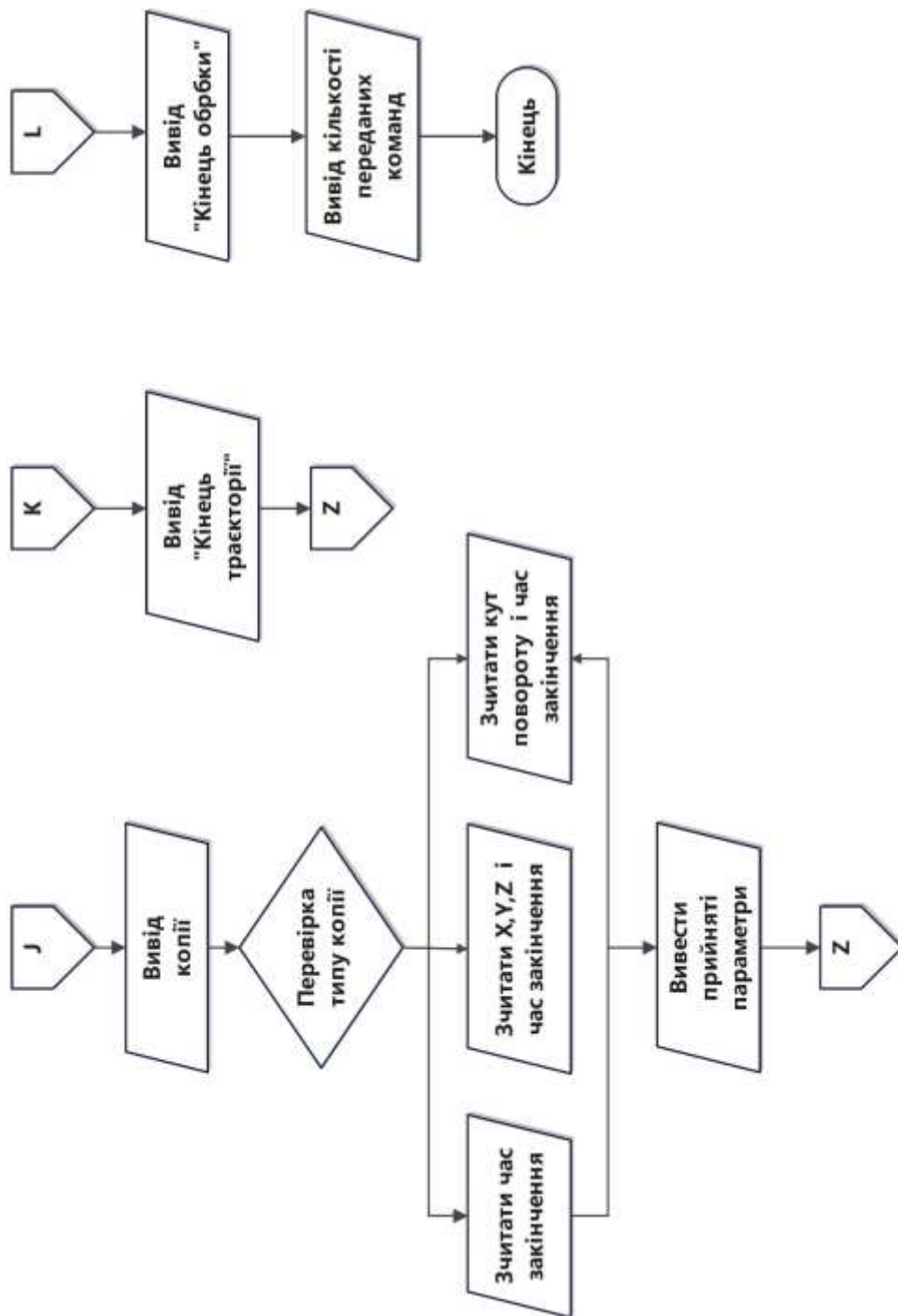


Рисунок 2.10 – Закінчення

Це інтерактивна програма, яка запитує користувача ім'я вихідного файлу для передачі та ім'я файлу, в якому ці дані мають зберігатися. Після того, як користувач надає цю інформацію, програма повідомляє кількість переданих команд. Наступним кроком для користувача є запуск програми відображення TOOL-DISPLAY, яка отримує дані з цього файлу і відображає їх на екрані VS11. Вихідний код програми передачі доступний у Unigraphics/VSII Mill Module

Interface.

2.8 Пошук і відображення даних

Після того, як перетворення даних в нейтральний формат відбувалася, їх потрібно отримати, обробити та відобразити у найкращий можливий спосіб. Маніпуляції включають масштабування та трансформацію оригінального зображення відповідно до поточного пристрою відображення (дисплея). Також, оскільки спочатку зображення було представлене лише одним кольором, а надалі буде використовуватися повноколірне зображення, після запису зображення до файлу потрібно внести відповідні зміни. Більше того, як пояснювалося раніше, апаратна та програмна конфігурація VS11 суттєво відрізняється від робочих станцій Unigraphics. Більшість операцій обробки повинні відображатися на терміналах з подвійним каналом пам'яті зображень, щоб інструмент у своєму русі не стирав деталь. На рисунку 2.11 зображено операцію обробки в одноканальній графічній системі VS11, зокрема показано, як стираються межі деталей, по яких рухається інструмент.

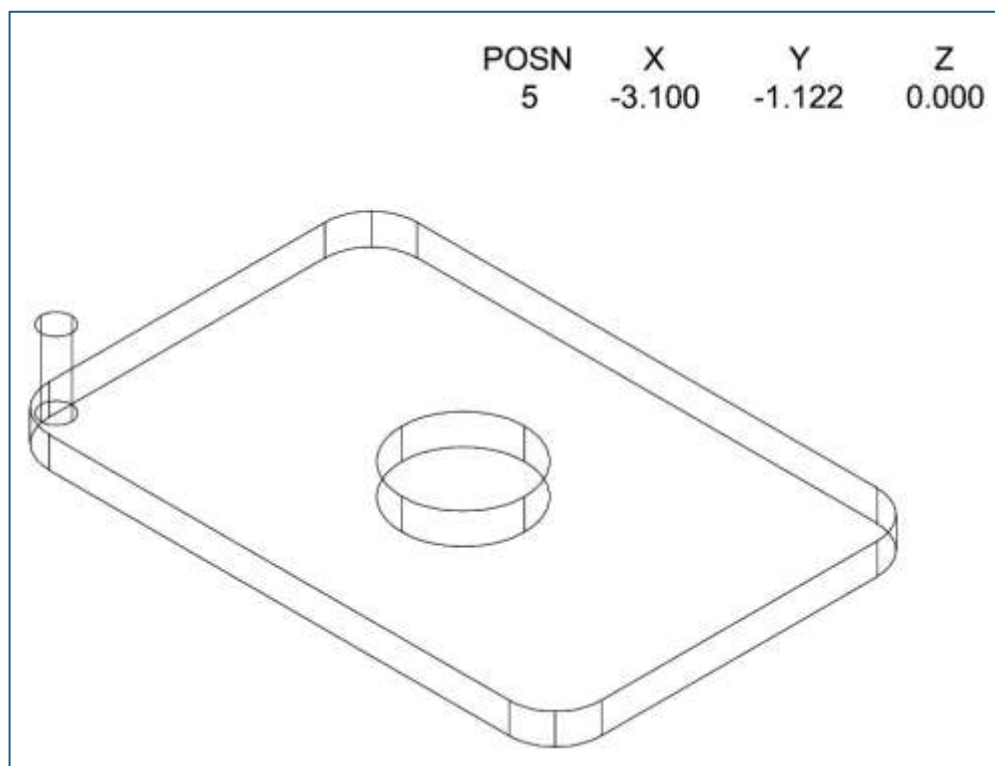


Рисунок 2.11 – Відображення операції обробки

Слід зазначити, що якщо в Unigraphics є окремий монітор повідомлень і окрема клавіатура для взаємодії з користувачем і введення команд.

VS11 має лише клавіатуру, через яку потрібно виконувати всі функції. Тут використовується «ієрархічне динамічне меню», яке відображається на екрані, а клавіатура служить для взаємодії з користувачем.

Робоча область екрану містить результати роботи і займає всю доступну область дисплея. Область динамічного меню – це частина дисплея, де користувачу доступні різні меню для керування програмними функціями. Якщо меню перешкоджає відображенню зображення, цю область можна очистити виконанням відповідної команди з головного меню. Також у цій частині екрану система виводить запити про різні типи введення, наприклад, файли для прийняття та відображення тощо. Область повідомлення містить інформацію про положення інструменту в будь-який момент під час його руху. Ця можливість доступна лише тоді, коли виконується обробка, тобто коли інструмент фрезерує деталь. Користувач може зупинити виконання програми в будь-який момент, щоб перевірити положення інструменту та змінити його, якщо потрібно. Цього досягають, натискаючи відповідну кнопку в меню.

Інтерактивні програми на Fortran, TOOL TRANSFER та TOOL Display, розроблені для відновлення даних із неформатованих файлів, відображення рухів деталей і інструментів, а також надання користувачу опцій трасування інструменту, стирання інструменту, відображення інструменту та швидких або повільних рухів інструменту. Структура програма TOOL-DISPLAY описана блок-схемою, яка зображена на рисунку 2.12.

Ця програма зчитує дані по одному запису за раз із файлу даних, переданих програмою TOOL-TRANSFER, маніпулює ними та відображає їх. Потім вона знову звертається до файлу, щоб прочитати наступний запис.

Оскільки дані, відновлені з файлу передачі, не зберігаються в жодних масивах, довжина CL-Source файлу, який можна передати, фактично необмежена – залежить лише від обсягу доступної пам'яті на диску.

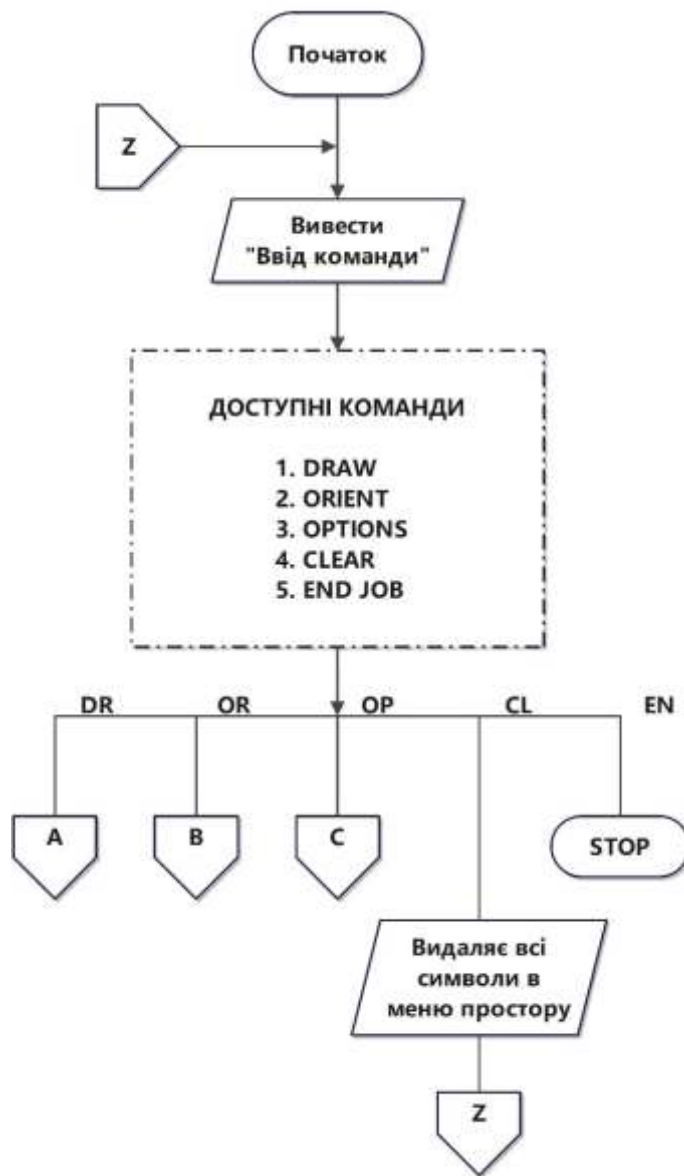


Рисунок 2.12 – Блок-схема алгоритму побудови зображення

Примітка: на будь-якому рівні програми:

- «М» перелічує команди, доступні на цьому рівні меню
- «І» переводить користувача на попередній рівень меню або до головного меню

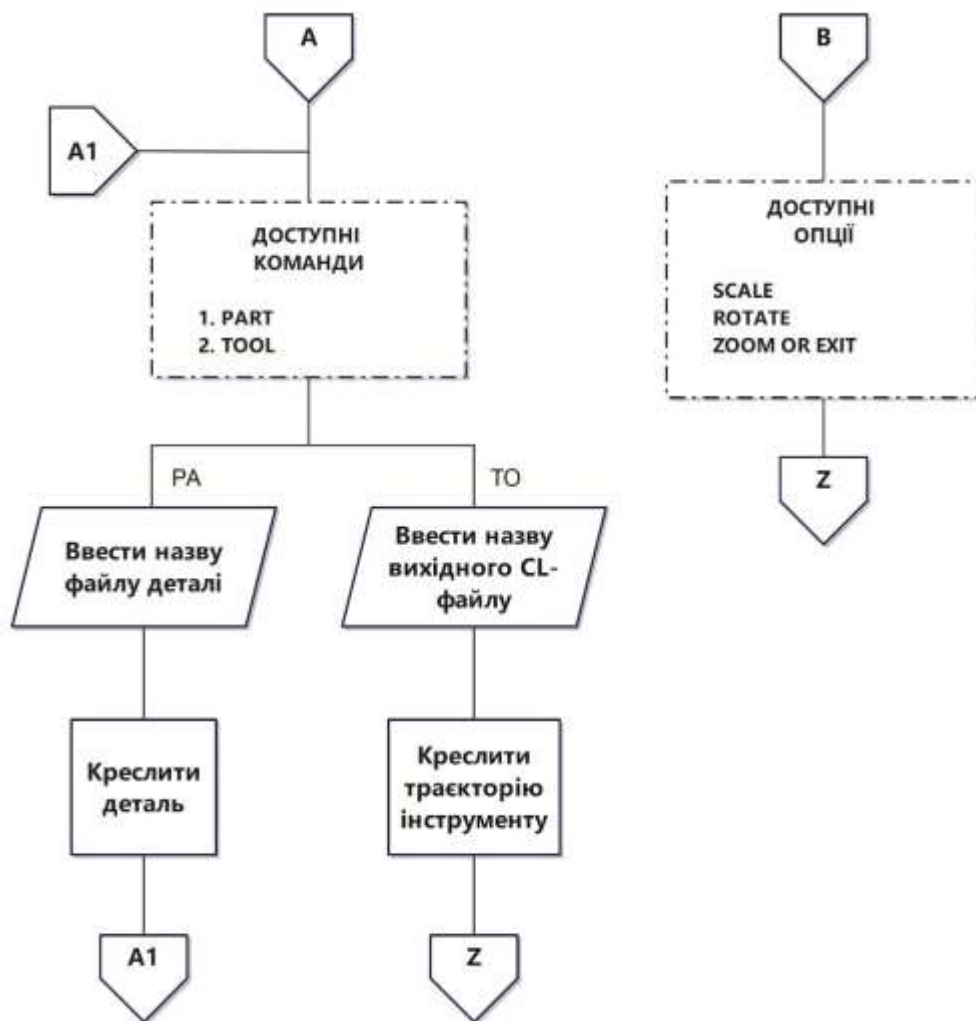


Рисунок 2.12 – Продовження

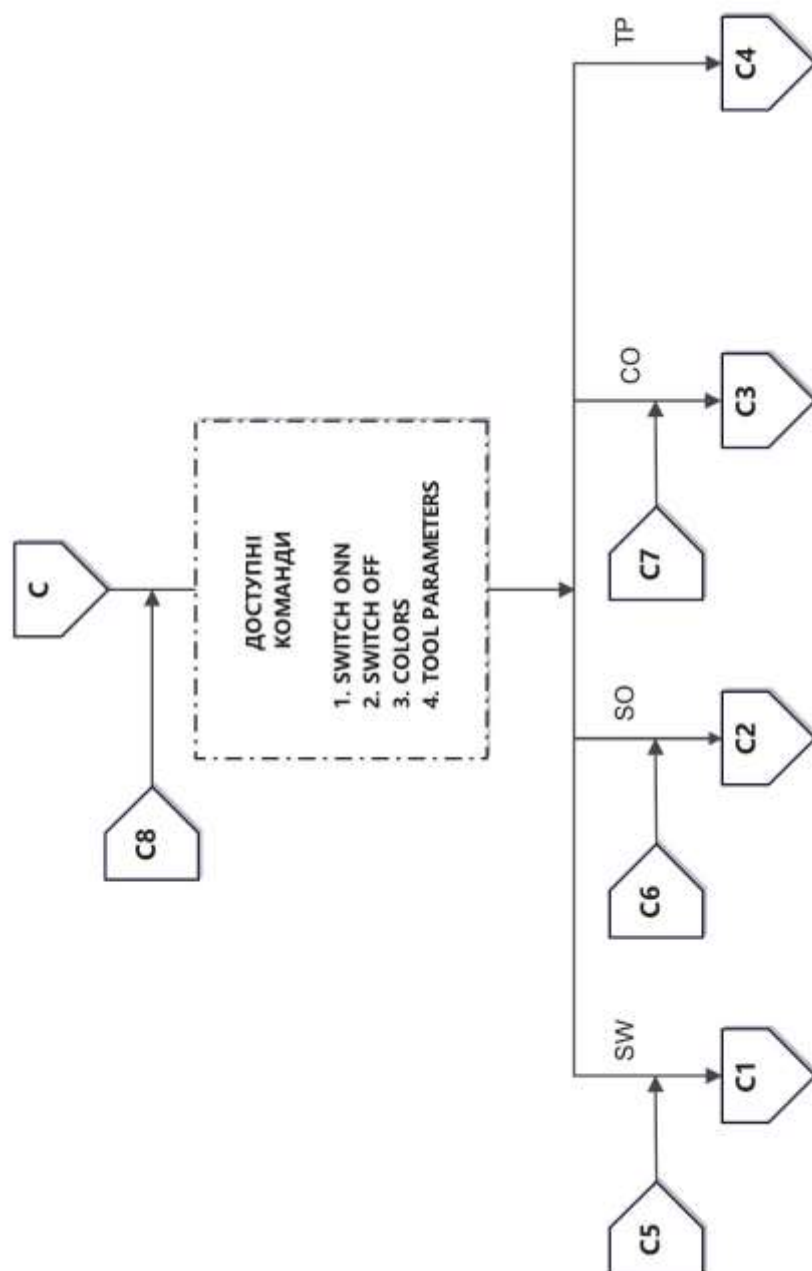


Рисунок 2.12 – Продовження

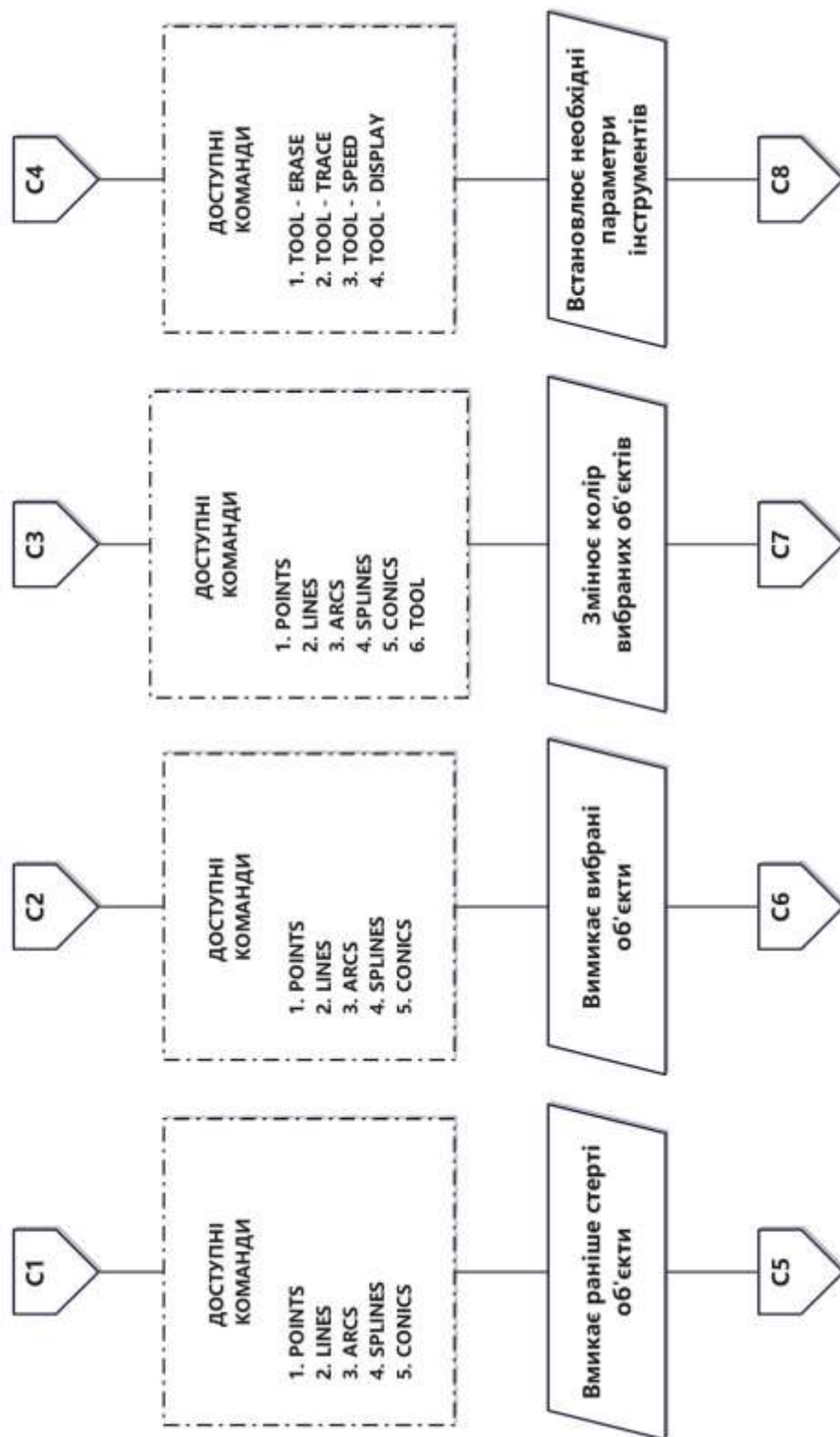


Рисунок 2.12 – Закінчення

Після виконання програми вона переходить у інтерактивну фазу, де користувач повинен вводити команди, реагуючи на відображене меню, щоб виконати певну операцію. Головне або підменю не з'являються автоматично на екрані, але їх можна викликати, натиснувши «М» на клавіатурі, а потім

підтвердити вибір клавішею «Enter». Такий сценарій дозволяє звільнити екран від надлишку інформації.

Ще одна перевага полягає в тому, що досвідчені користувачі можуть швидко керувати такими меню, по мірі набуття досвіду роботи в програмному середовищі подальшим використанням вони вивчають вміст і розташування кожного підменю і можуть швидко робити вибір, не шукаючи меню щоразу. Головне меню складається з шести опцій, а опції мають максимум три рівні.

Команди в меню складаються з мнемонічних імен, і користувач відповідає на них, вводячи на клавіатурі лише перші два символи кожної команди, після чого слідує натискання клавіші вводу. Система приймає це, і залежно від рівня меню, на якому знаходиться користувач, вона або переходить у підменю, або виконує команду і відображає відповідну графіку. Якщо користувач у будь-який момент хоче повернутися до попереднього рівня меню, це можна зробити, просто ввівши знак оклику «!» і ENTER. Точні команди в меню та їх робота детально пояснені на блок-схемі на рисунку 2.12.

Програма TOOL DISPLAY дає користувачу можливість змінювати колір будь-якого елемента або відображеного інструменту. Деталь може бути орієнтована в будь-якому напрямку, а рух інструмента відображається. Користувач також має можливість перевести деталь у будь-яку точку екрану, масштабувати, обертати або збільшувати будь-яку частину для ближчого розгляду. Доступні опції руху інструменту – це дві швидкості – швидка або повільна – і їх можна вибрати з меню. Ця можливість призначена лише для покращення сприйняття при візуалізації і не впливає на процес механічної обробки.

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Моделювання операцій механічної обробки за допомогою модуля Mill Module Unigraphics

В цьому розділі описані переваги інтерфейсу користувача, які досягнуті завдяки використанню робочої станції VS11 для відображення операцій механічного оброблення, які були змодельовані Mill Module у Unigraphics.

Деталь була розроблена на системі Unigraphics CAD/CAM. Операції технологічного процесу, які потрібно змодельовати, полягають в фрезеруванні контуру деталі з металевої пластини, з наступним фрезеруванням вікон всередині контуру. Креслення (контур) деталі і 3D-модель деталі спочатку підготовлені в середовищі Unigraphics, як показано на рисунках 3.1 і 3.2. Рисунок 3.1 ілюструє вигляд в плані, а рисунок 3.2 – ізометричний вигляд деталі. Цю деталь можна затиснути стандартними затискачами, які були розроблені як частина конструкції системи.

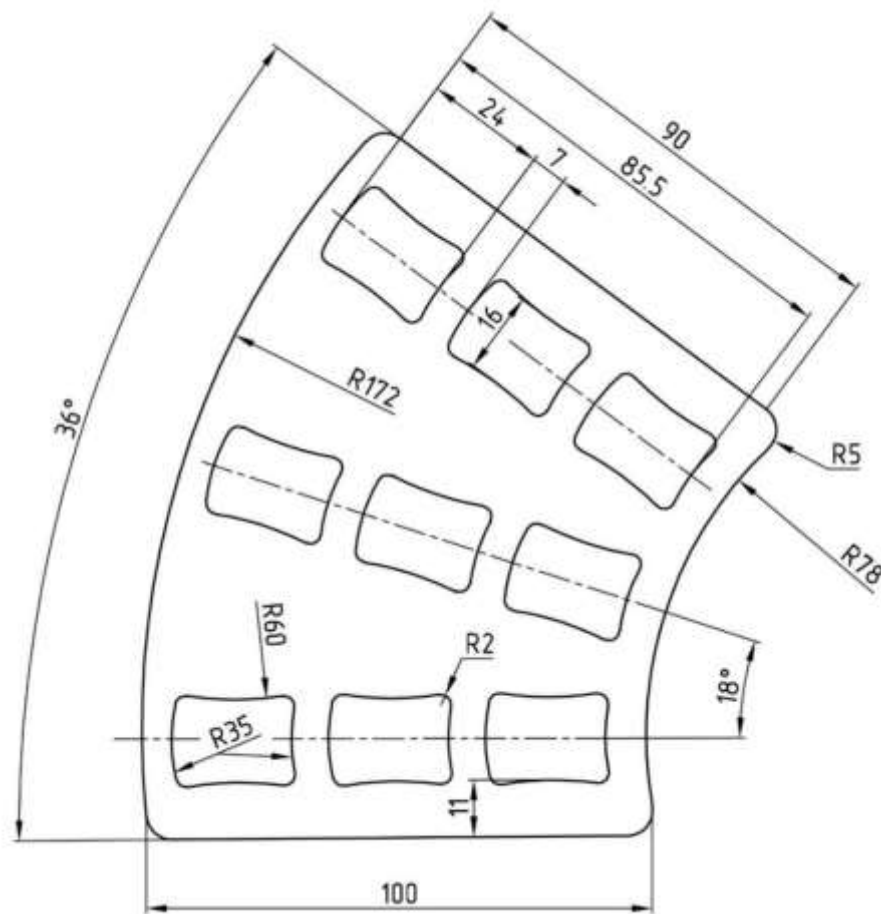


Рисунок 3.1 – Ескіз деталі в Unigraphics

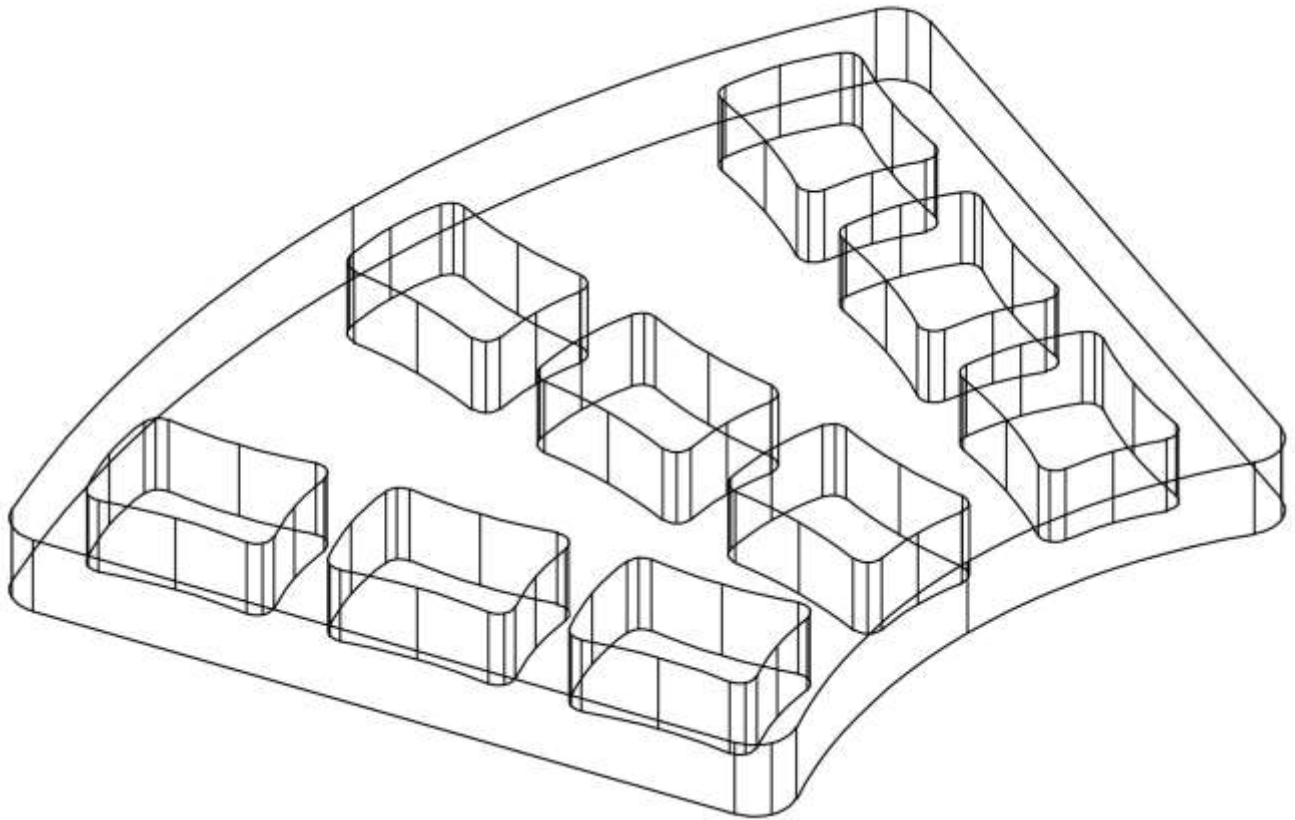


Рисунок 3.2 – 3D-модель деталі в середовищі Unigraphics

Операції обробки були змодельовані за допомогою модуля Mill Module Unigraphics. Спочатку проводиться операція фрезерування контуру, а потім фрезерують дев'ять внутрішніх вікон. Рисунок 3.3 показує, як виглядає дисплей після моделювання обробки системою. Метод, яким це відображається, полягає в тому, що спочатку система відображає деталь, а потім інструмент, що виконує фрезерні операції, у тій самій послідовності, в якій їх виконував користувач. Неможливо зупинити інструмент під час його руху по деталі, щоб дослідити перешкоди. Користувач повинен візуально відстежувати інструмент, щоб перевірити шлях інструменту.

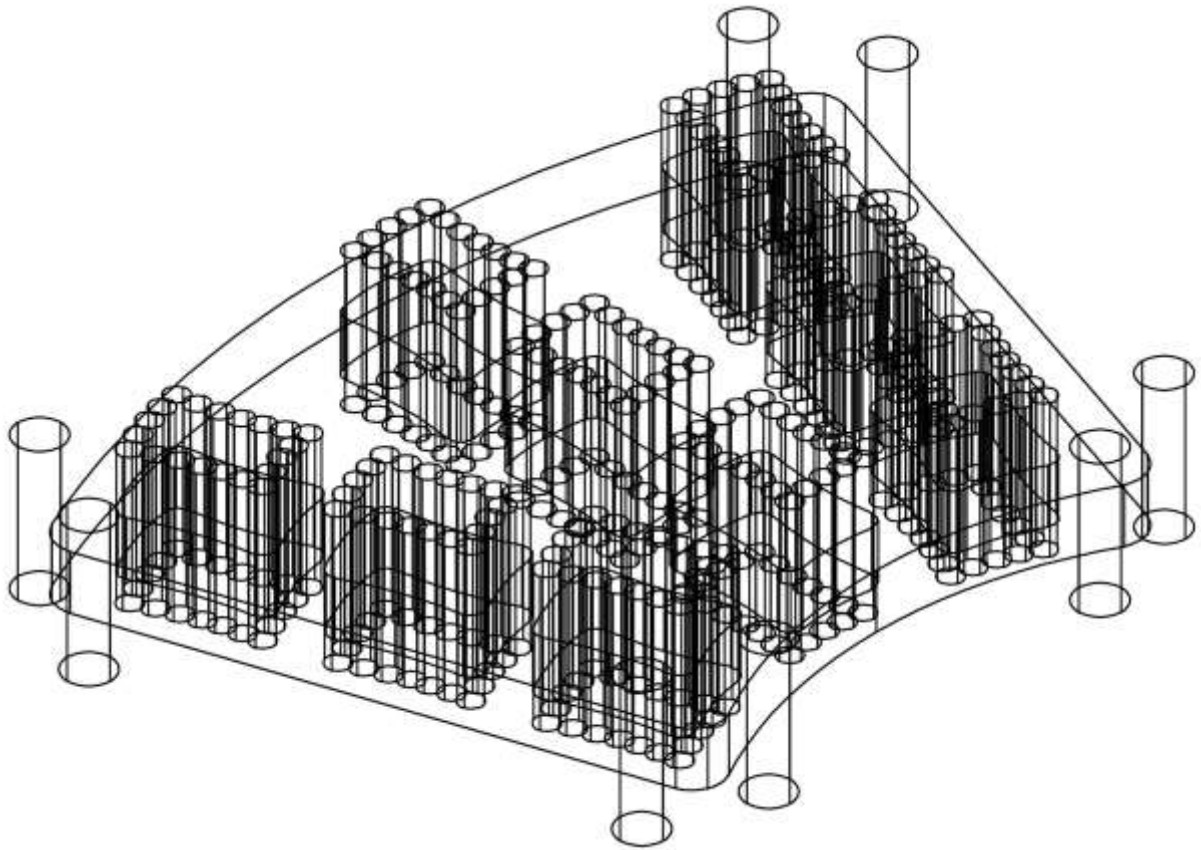


Рисунок 3.3 – Приклад моделювання обробки в середовищі Unigraphics

Далі відбувається процедура передачі цієї частини до системи VS11. Спочатку користувач працює з системою Unigraphics, проектує та креслить деталь, будує її 3D-модель, а також створє вихідний файл Cutter-Location (CL) за допомогою функції N/C Machining, а також зберігає обидва ці файли. Припустимо, що частина та файл CL-Source під назвою SAMPLE створені та змонтовані (частини та файли CL-Source можуть мати однакову назву, оскільки зберігаються в окремих каталогах) у системі Unigraphics, і їх потрібно перенести для відображення на терміналах VS11.

Як уже зазначалося, це відбувається у два етапи. Спочатку передається частина, а потім CL-Source File.

Команди, необхідні для передачі деталі:

1. RUN [UGRAF]UGU06
2. RUN UGTOVS

Працюючи на системі VS11, користувач повинен ввести першу команду для запуску програми, [UGRAF]UGU06. Ця програма переносить файли даних деталей з Unigraphics до системи VS11. Далі потрібно вказати назву деталі для передачі та

нову назву, під якою вона має зберігатися у каталозі VS11, наприклад, SAMPLE і SAMPLE.DAT відповідно, і виконує бажану передачу файлу даних деталі до VS11. Потім запускається друга програма, UGTOVS, яка зчитує файл даних деталі та конвертує його у формат, який може зчитуватися програмою відображення TOOL-DISPLAY і відображатися на VS11. Програма видає запит імені файлу даних деталі в каталозі VS11, тобто SAM9LE.DAT, а також для назви нового файлу, наприклад, SAMPLE.PAT. На цьому процедура передачі даних про деталь завершується.

Команди, необхідні для передачі та відображення CL-Source File:

1. Запустити програму Grip, CLSF TO GRIP
2. RUN UGXFR
3. ЗАПУСТИ TLTRANSFER

Працюючи на системі Unigraphics, користувач запускає першу програму CLSF TO GRIP, яка переносить CL-Source File до бібліотеки Grip. Ця програма просить користувача перенести ім'я файлу CL-Source, тобто SAMPLE, до бібліотеки Grip під тією ж назвою SAMPLE. Далі потрібно перейти на робочу станцію VS11 і запустити другу програму – UGXFR. Передача GRP-файлів до системи VS11 здійснюється цією програмою. До початку виконання процедури передачі файлі потрібно вказати назву файлу Grip, тобто SAMPLE, і ім'я, під яким він має зберігатися у каталозі VS11, наприклад SAMPLE.GRP. Третя програма, TLTRANSFER, зчитує Grip, SAMPLE.GRP і перетворює його у формат, який сумісний з програмою відображення TOOL-DISPLAY для подальшого відображення інструменту. Ця програма запитує назву файлу, який потрібно перенести, тобто SAMPLE.GRP і назву нового створеного файлу, наприклад, SAMPLE. Після цього завершується передача файлу CL-Source.

Слід зазначити, що фактичні назви деталі та файлу CL-Source не змінювалися під час процесу передачі. Змінено лише розширення імені, наприклад, файл даних називається SAMPLE.GRP, файл інструменту називається SAMPLE.TOL, файл з деталями SAMPLE.PAT тощо.

Далі, програма TOOL-DISPLAY запускається на системі VS11. Ця програма

запитує користувача імена файлів деталей і інструментів, тобто SAMPLE.PAT і SAMPLE.TOL, і взаємодіє з користувачем через команди меню, щоб побудувати потрібне зображення.

На рисунку 3.4 показано ізометричний вигляд деталі, описаної раніше, на терміналі VS11. Її можна орієнтувати в будь-якому напрямку і переглядати. Також можливо виконувати такі операції, як масштабування та масштабування.

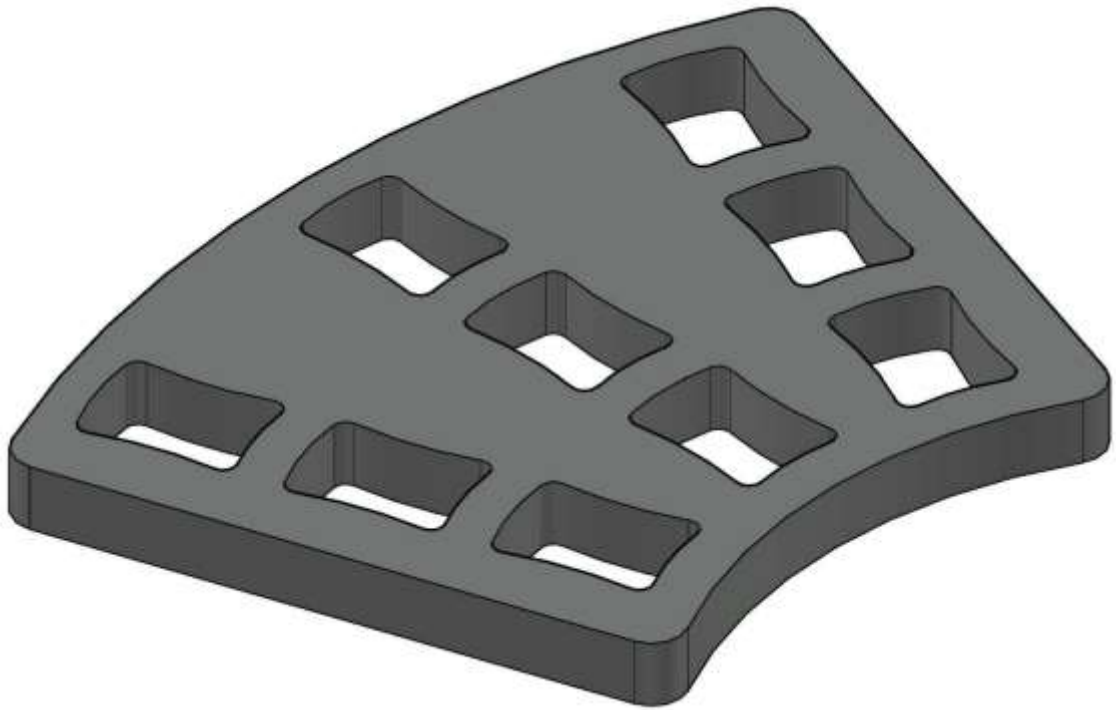


Рисунок 3.4 – 3D-модель деталі в середовищі VS11

Рисунки 3.5 3.8 ілюструють механічну обробку, яку імітують з різними опціями. Ці цифри також показують область «командного вводу» зліва та «область повідомлення» у верхньому правому куті. «Область повідомлення» містить положення інструменту у файлі CL-Source та координати його місцезнаходження. «Командна область» показує команди, які користувач має надати для відображення певного шляху до інструменту.

На рисунку 3.5 показано зображення із налаштуваннями «TOOL DISPLAY» та «TOOL ERASE». Тут інструмент обробляє деталь і не залишає лінії трасування під час виконання операції. На рисунку 3.5 зображено деталь і траєкторії руху інструменту лише з опцією «TOOL TRACE». У цьому випадку деталь орієнтована інакше, і оскільки інструмент не відображається, користувач бачить лише лінію,

проведену центральною лінією інструменту, коли він імітує обробку.

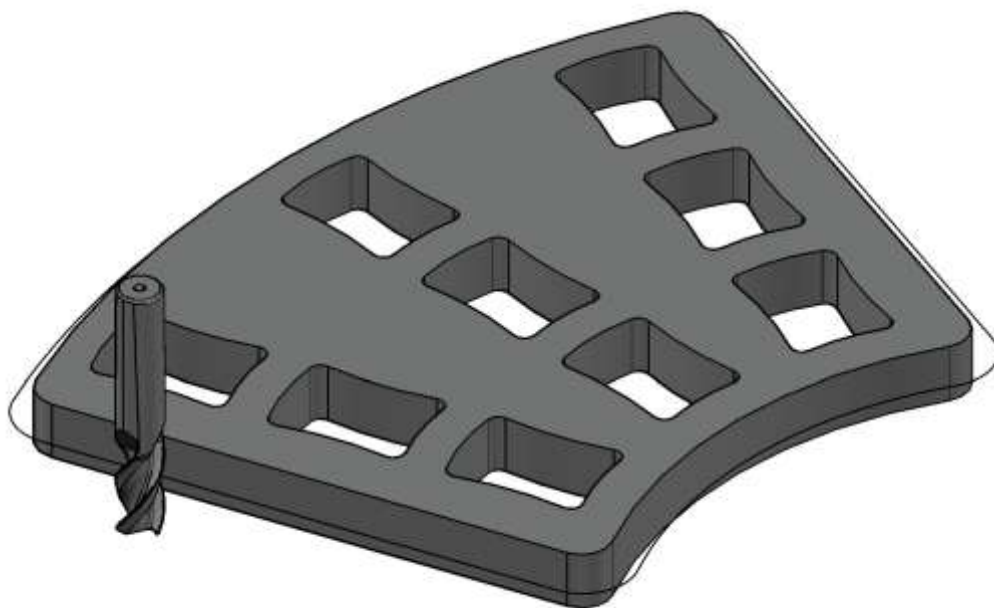


Рисунок 3.5 – Моделювання обробки з опціями
«TOOL-DISPLAY» і «TOOL ERASE»

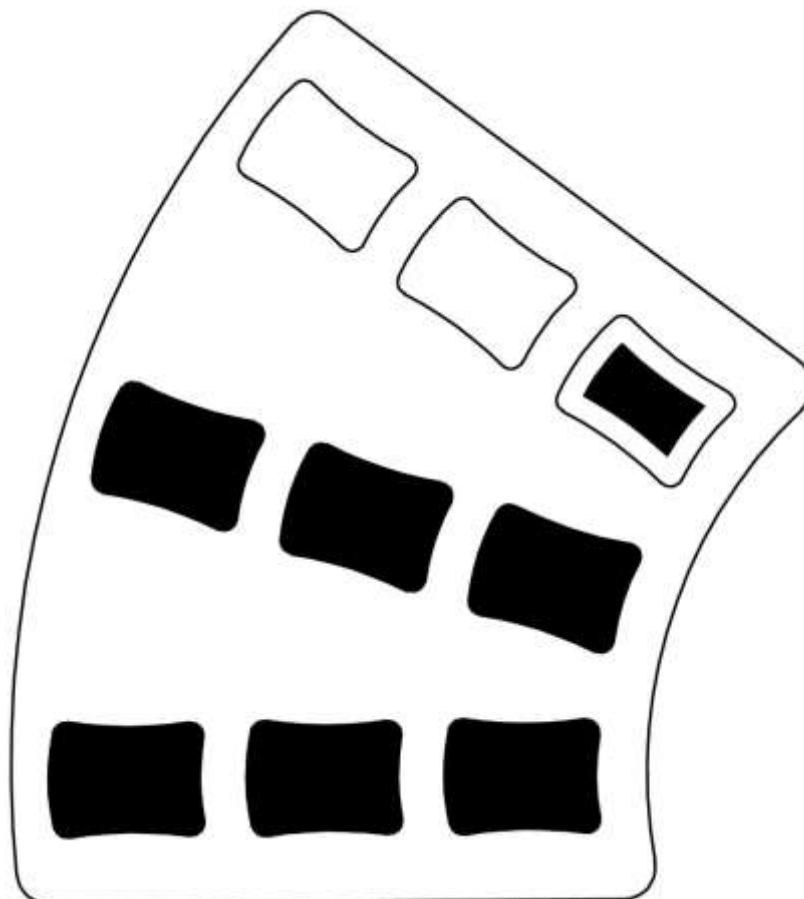


Рисунок 3.6 – Моделювання обробки з опцією «TOOL-TRACE»

На рисунку 3.7 зображено інструмент і деталь без налаштування опції «TOOL ERASE». Коли інструмент рухається по деталі, він не стирає свої попередні позиції, через що він відображається у всіх позиціях. На рисунку 3.8 встановлені ті ж опції, що й на рисунку 3.5, але деталь збільшена на одній конкретній ділянці для «ближчого огляду» операції обробки, яка виконується.

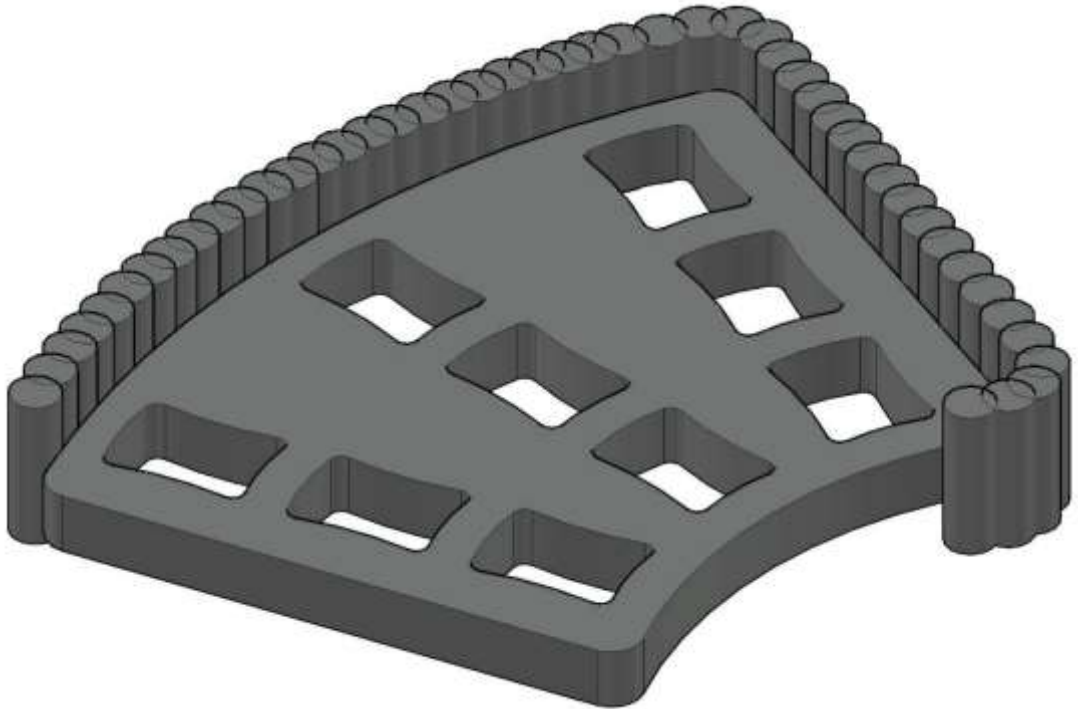


Рисунок 3.7 – Моделювання обробки з вимкненою опцією «TOOL-ERASE»

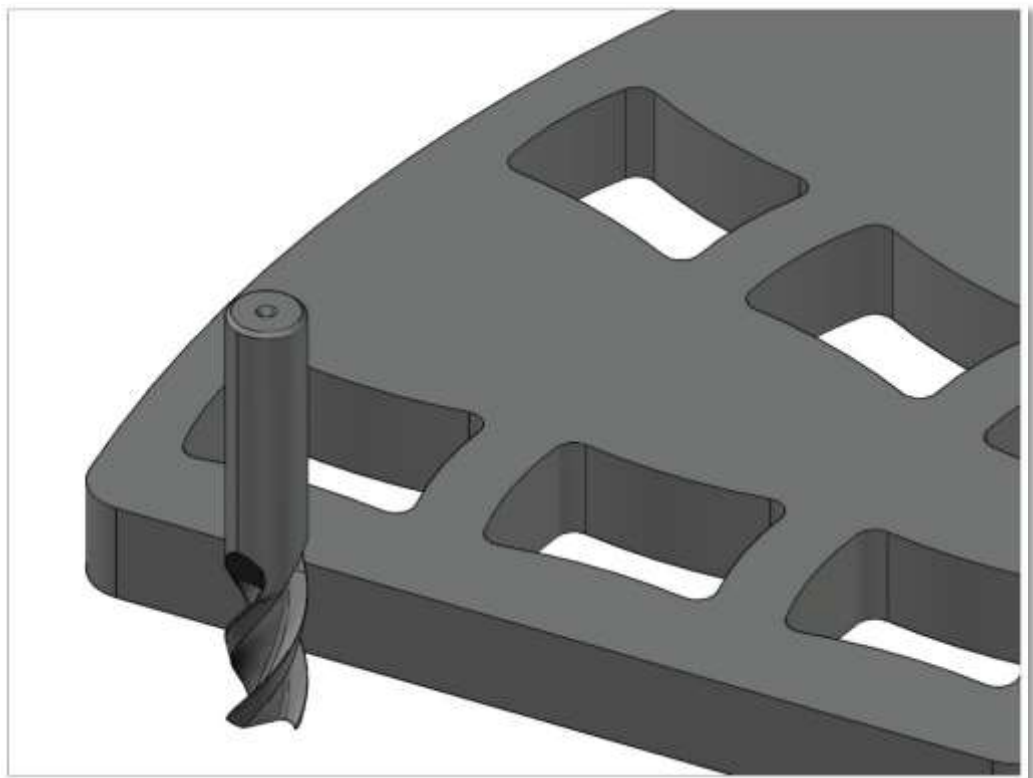


Рисунок 3.8 – Моделювання обробки з опціями «TOOL-TRACE» і «ZOOM»

Якщо було виявлено помилку або потрібна корекція, координати інструменту X, Y, Z можна змінити безпосередньо у файлі Grip у каталозі VS11, і програми TOOL-TRANSFER і TOOL-DISPLAY запускаються знову для відображення нового шляху інструменту. Слід зазначити, що система VS11 здатна відображати об'єкти різними кольорами.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Актуальність безпеки життєдіяльності людини

Безпека життєдіяльності (БЖД) – наука, що вивчає проблеми безпечного перебування людини в довкіллі в процесі різних видів її діяльності. Якраз діяльність і вирізняє людину від інших істот. Вона є специфічно людською формою активності, необхідною умовою існування людського суспільства. Форми діяльності різноманітні. Вони охоплюють практичні, інтелектуальні і духовні процеси, які протікають в побуті, громадській, культурній, виробничій, науковій та інших сферах життя.

Безпека життєдіяльності людини є однією з найважливіших умов існування та розвитку сучасного суспільства. Стрімкий розвиток техніки, промисловості, інформаційних технологій і транспорту, а також зростання кількості природних, техногенних і соціальних небезпек підвищують ризик виникнення надзвичайних ситуацій та негативного впливу на життя і здоров'я людей.

Актуальність безпеки життєдіяльності обумовлюється необхідністю:

- збереження життя та здоров'я людини;
- створення безпечних умов праці, навчання та побуту;
- запобігання виробничому травматизму й професійним захворюванням;
- зменшення впливу шкідливих факторів навколишнього середовища;
- формування культури безпечної поведінки населення;
- підготовки людей до дій у надзвичайних ситуаціях.

Особливо важливими питання безпеки життєдіяльності стали в умовах розвитку комп'ютеризованих систем, автоматизації виробництва, використання електронного обладнання та підвищеного психоемоційного навантаження на людину. Значний вплив на безпеку населення також мають воєнні дії, екологічні проблеми, енергетичні ризики та кіберзагрози.

Безпека життєдіяльності охоплює широкий комплекс заходів – правових, організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних і соціально-економічних, спрямованих на захист людини від небезпечних і шкідливих факторів.

Актуальність дисципліни ще більше зростає у зв'язку зі сталим розвитком людства на базі, що забезпечує його існування, тобто аксіоми про потенційну небезпеку діяльності - кожний вид діяльності є потенційно небезпечний. Ця аксіома справедлива і для бездіяльності, тому що бездіяльна людина ще більше залежить від діяльності іншої людини.

Безпека людини є базовою складовою «сталого людського розвитку» (Sustainable Human Development). Він широко використовується ООН як основна характеристика гуманітарного поступу суспільства. Сталий розвиток людства – це такий розвиток, який веде не тільки до економічного, а й соціального, духовного зростання, що сприяє гуманізації національного менталітету і збагаченню позитивного загальнолюдського досвіду. Основною ознакою, що відрізняє сталий розвиток від усіх інших форм соціального руху і видозміни, є відновлення природного і культурного довкілля, коли не тільки не знищується життєвий потенціал, а й підвищується соціальна відповідальність людей, гуманізуються взаємини, ставлення, реакції. Тому актуальність питань з безпеки життєдіяльності полягає саме у забезпеченні сталого людського гармонійного розвитку людства і природи. Виходячи з концепції сталого розвитку людства безпеку життєдіяльності найбільш повно можна охарактеризувати як багатопрофільну галузь знань про закони природозберігаючого формування техносфери планети та її збалансованого економічного й суспільного розвитку.

Таким чином, безпека життєдіяльності є невід'ємною складовою сучасного життя та важливою умовою сталого розвитку суспільства, збереження трудового потенціалу й підвищення якості життя населення.

4.2 Працездатність людини-оператора

Працездатність людини – це величина функціональних можливостей організму, котра характеризується кількістю та якістю роботи, виконаної за певний період часу. Протягом трудової діяльності працездатність людини з часом змінюється.

Розрізняють три основних фази працездатності людини, які по чергову змінюють одна одну в процесі трудової діяльності: фазу наростання працездатності, фазу високої стійкості працездатності, фазу зниження працездатності, зумовлену втомою.

Втома – тимчасове погіршення функціонального стану організму людини, яке проявляється у специфічних змінах фізіологічних функцій і погіршенні працездатності працівника.

Сучасна теорія втоми пов'язує її зі станом центральної нервової системи (ЦНС) і розглядає як охоронне гальмування у корі головного мозку, котре спрямоване проти виснаження функціонального потенціалу ЦНС.

Занадто напружена розумова діяльність може призводити до перевтоми працівника і має своїми проявами:

- а) порушення сну (аж до стійкого безсоння);
- б) зменшення опору до впливу несприятливих зовнішніх умов;
- в) підвищення нервово-емоційної збудливості тощо.

Розвиток втоми тягне за собою погіршення показників фізіологічних систем людини і зниження її працездатності.

Повне уявлення про працездатність людини можна отримати на основі даних про виробничі характеристики її діяльності у сукупності із відомостями про рівень функціональних змін органів і систем, які є найбільш завантаженими при певному різновиді праці.

На виробництві профілактика втоми працівника досягається двома способами: створенням умов для відпочинку під час обідньої перерви у середині робочого дня і за рахунок короткочасних регламентованих перерв у робочий час.

При виконання робіт, які вимагають значних фізичних зусиль й участі великих м'язів, рекомендується використовувати не часті, але досить тривалі перерви по 10-12 хвилин кожна.

При виконанні особливо важких робіт рекомендується поєднувати роботу тривалістю 15-20 хвилин із відпочинком такої самої тривалості.

При виконанні робіт, що вимагають великої нервової напруги й уваги, швидких і точних рухів рук, рекомендується використовувати не часті, але

короткотривалі перерви по 5-10 хвилин кожна.

Важливий спосіб профілактики втоми – мікропаузи в роботі, котрі виникають довільно внаслідок наявності розриву в часі між окремими технологічними операціями, а отже, і діями працівника.

Мікропаузи забезпечують підтримання оптимального темпу роботи та високого рівня працездатності. Залежно від характеру і важкості робіт вони становлять 10-100 с робочого часу.

При виконанні робіт у системі «людина – машина» вплив працездатності людини на продуктивність праці має складний, опосередкований характер і, зокрема, залежить від режиму роботи системи «людина – машина»; тривалості роботи в автоматичному режимі, тривалості налагоджувальних робіт тощо.

Втрата працездатності може бути постійною або тимчасовою, повною або частковою тощо.

Причинами втрати працездатності можуть бути:

а) порушення анатомічної цілісності організму людини або його функцій внаслідок прояву небезпек виробничого характеру (виробнича травма);

б) патологічний стан людини, зумовлений виробничою діяльністю і пов'язаний із надмірним напруженням організму або іншим проявом небезпек виробничого характеру професійне захворювання);

в) порушення стану здоров'я внаслідок дії шкідливих речовин при їх проникненні в організм людини у виробничих умовах.

Втома є одним із найвпливовіших факторів, що істотно знижує ефективність діяльності операторів. Цей стан пов'язують зі зниженням працездатності людини у процесі роботи.

Загальними рисами втоми є такі: відчуття нездужання, слабкості фізичних сил; розлад процесу уваги; розлад сенсорного аналізатора (зниження порогу чутливості рецепторів); порушення в моториці (невпевненість у виконанні дрібних дій, тремор рук); зменшення обсягу пам'яті та зниження швидкості мислення, зростання кількості помилок під час вирішення професійних завдань; послаблення волі (знижується рішучість, самоконтроль, витримка); сонливість (оператор може заснути на робочому місці).

Вказані психологічні показники втоми проявляються залежно від її сили. Якщо спостерігається слабка втома, то значного погіршення показників праці не відбувається, психічні процеси протікають у межах відносних норм. Якщо спостерігається середній рівень втоми, то можна спостерігати незначне падіння показників праці, деяке зниження швидкості протікання когнітивних процесів.

У разі значного посилення втоми в діяльності операторів відбувається незворотне падіння показників праці (надійності та ефективності). Психічні процеси, стани, особистісні риси людини погіршуються. В операторів можливий зрив діяльності (відмова від діяльності). Процес стійкості, протидії наростаючому впливу втоми залежить від умов праці і індивідуальних особливостей оператора. Тут має значення характер виконуваної роботи, режим праці й відпочинку, виробниче середовище, ціна помилки та мотивація оператора. Але на першому місці стоять особистісні особливості людини. До них слід віднести такі: фізичний вік, стан організму (рівень здоров'я); інтереси й мотивація, воля та риси характеру, система цінностей.

Від цих особливостей залежить те, як оператор переносить втому і як долає її в певних ситуаціях.

4.3 Загальні вимоги безпеки з охорони праці для користувачів ПК

Сучасний розвиток технічного та технологічного стану виробництва передбачає постійну автоматизацію та оптимізацію виробничих процесів. Сьогодні, напевно, важко уявити компанію, господарська діяльність в якій здійснювалась би без використання комп'ютерної техніки. Через масовий характер робіт, що виконуються працівниками за допомогою комп'ютера, законодавством України чітко врегульовано норми та вимоги до використання комп'ютерної техніки на підприємстві, безпосередньо й охорона праці на підприємстві при роботі за комп'ютером.

Експлуатують ЕОМ на підставі таких нормативно-правових актів:

- Закон України «Про охорону праці»;

- кодекс законів про працю України (КЗпП);
- «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» (НПАОП 0.00-7.15-18);
- державні санітарні норми та правила роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин;
- правила пожежної безпеки в Україні;
- правила улаштування електроустановок (ПУЕ);
- правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.
- державні стандарти України (ДСТУ), що регламентують вимоги до безпеки праці, електробезпеки, ергономіки та умов праці користувачів ЕОМ.

Примірна інструкція з охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин (затверджена Наказом Міністерства доходів і зборів України № 443 від 05.09.2013 р.). Використовується підприємствами як основа для розробки власних внутрішніх (локальних) інструкцій з охорони праці для працівників, які офіційно працюють за комп'ютером.

Згідно з чинним НПАОП 0.00-7.15-18, присвоєння кваліфікаційної групи з електробезпеки (наприклад, I групи) звичайним офіційним користувачам комп'ютерної техніки наразі не вимагається. Також ці правила не поширюються на портативні системи (ноутбуки/планшети), якщо вони не використовуються постійно на одному й тому самому стаціонарному робочому місці.

Приміщення, в яких планується установка та подальша робота з комп'ютером, повинні відповідати проектній документації будівлі, погодженій з уповноваженими державними органами. Крім того, роботодавець повинен враховувати чинні санітарні нормативи освітлення, вимоги до параметрів мікроклімату (температура, відносна вологість), ступеня і сили вібрації, звукового шуму і вогнестійкості приміщення, а також характеристики електромагнітного, ультрафіолетового та інфрачервоного полів.

НПАОП 0.00-7.15-18 поширюються на умови й організацію праці при роботі з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) усіх типів вітчизняного та зарубіжного виробництва на основі електронно-променевих трубок (ЕПТ), що

використовуються в електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ) колективного використання та персональних ЕОМ (ПЕОМ).

Роботодавцю заборонено встановлювати комп'ютери в приміщеннях, розташованих у підвалах будинків. Для уникнення можливих аварій та замикань, поряд з приміщеннями, де вестиметься робота з комп'ютером (над чи під ними), також не дозволяється проведення робіт, що потребують здійснення надмірно вологих технологічних процесів.

Відповідне приміщення повинно бути укомплектоване системами центрального або індивідуального опалення, кондиціонування чи вентиляції повітря. Але при установці зазначених систем, необхідно переконатись, що батареї опалення, водопровідні труби, вентиляційні кабелі тощо, надійно сховані під захисними щитками, які перешкоджатимуть можливому потраплянню робітника під напругу.

У кожній кімнаті, де обладнуватимуться робочі місця співробітників, що працюватимуть на комп'ютері, повинні бути наявні елементи природного та штучного освітлення. При цьому, на вікнах слід встановити легко регульовані жалюзі чи штори, які дозволять працівникам коригувати рівень освітлення в приміщенні. Бажано розмістити комп'ютери в кімнаті таким чином, щоб світло потрапляло на екрани моніторів з півдня чи північного сходу.

З метою досягнення максимального рівня безпеки і охорони праці при роботі з комп'ютером, виробничі приміщення необхідно обладнати аптечками першої медичної допомоги, системами автоматичної пожежної сигналізації і вогнегасниками. В приміщенні, в якому разом працюють 5 або більше комп'ютерів, на видимому місці встановлюється службовий вимикач, який у разі потреби дозволить повністю відключити електричне живлення кімнати.

Роботодавець, який використовує найману працю робітників, повинен забезпечити відповідність їхніх робочих місць комфортним та безпечним умовам.

Розмір одного робочого місця має становити не менше 6 квадратних метрів. При необхідності, суміжні робочі місця співробітників, що працюють з комп'ютером, слід розділити перегородками висотою до 2 метрів. При визначенні достатнього розміру приміщення і робочого місця на одну особу необхідно

додатково враховувати шафи, сейфи, тумби або інші предмети меблів чи обладнання, які знаходяться в кімнаті.

На столі працівника можливо розмістити допоміжні для роботи пристрої (принтери, колонки, сканери), а також місця для зберігання документів, за умови, що це не обмежуватиме видимість екрану і не заважатиме працівнику. У разі надмірного шуму чи вібрації технічного обладнання, роботодавець повинен забезпечити працівників антивібраційними килимками.

Робочий стілець співробітника має бути підйомно-поворотним, легко регульованим за висотою та забезпечувати належну підтримку та зручне положення спини і хребта особи.

Щодня необхідно проводити вологе прибирання приміщення, та очищати робоче місце та безпосередньо монітор комп'ютера від запиленості.

На підприємстві забороняється:

- проводити ремонт та технічне обслуговування комп'ютера за робочим місцем працівника;
- самочинно ремонтувати або намагатись здійснити технічне налагодження комп'ютера без залучення компетентних спеціалістів;
- складувати на робочому місці зайві документи, деталі та предмети, що не потрібні для роботи;
- використовувати монітори з нечітким зображенням та монітори, у яких наявні поламки екрану;
- працювати з матричним принтером без антивібраційного покриття та зі знятою кришкою.

Допускати до роботи осіб, які не пройшли затверджений на підприємстві курс охорони праці для роботи з комп'ютером, не дозволяється.

На користувачів під час роботи з комп'ютерною технікою можуть діяти такі види небезпек:

- ураження електричним струмом;
- енергетична небезпека (виникає через коротке замикання: опіки, електрична дуга, викид розплавленого металу);
- небезпека загоряння;

- термонебезпека (дія високих температур через нагрівання конструктивних елементів);
- механічна небезпека (травми через падіння, дію рухомих частин, поріз за гострі частини конструктивних елементів);
- небезпека випромінювання (дія звукового (акустичного), високочастотного, інфрачервоного, ультрафіолетового й іонізуючого випромінювання, а також видимого світла когерентної високої інтенсивності (лазерного випромінювання);
- хімічна небезпека (контакт із деякими хімікатами, які використовують для того, щоб обслуговувати обладнання, або від вдихання їх парів).

Крім того, повинні бути чітко встановлені перерви для відпочинку працівників (окрім обідньої), як правило, тривалістю 10-15 хвилин раз на годину або дві залежно від складності роботи. У будь-якому випадку роботодавець повинен передбачити такий розпорядок роботи на підприємстві, щоб час неперервної роботи з комп'ютером був не більше ніж 4 години.

Додатково, для збереження належного рівня здоров'я та професійної придатності робітників, рекомендується виділити на підприємстві окреме побутове приміщення для перепочинку працівників і зняття ними нервово-емоційного напруження, що виникає при роботі з комп'ютером.

4.4 Значення автоматизації виробничих процесів в питаннях охорони праці

Процес автоматизації виробництва є одним із головних напрямів технічного прогресу вже пів сторіччя. У зв'язку з розвитком автоматизації з'явилася можливість звільнити людину від безпосередньої участі у виробничому процесі, дало час для розвитку та вирішення інших завдань. Через процес автоматизації машини не лише замінюють фізичну працю людини, а й виконують функції управління виробництвом. При цьому процеси отримання, перетворення, передачі та використання енергії, матеріалів та інформації відбуваються в автоматичному

режимі. В автоматизованому виробництві обслуговуючий персонал займається налагодженням механізмів та систем управління.

Сучасне виробниче підприємство – це повністю автоматизовані об’єкти, де всі операції виконуються без участі людини, а оператор лише задає на початку виробничого процесу необхідні параметри і стежить за справністю апаратури. Автоматичні системи управління виробництвом здійснюють безперервний контроль і точне регулювання параметрів процесу, таких як температура в камері, тяга в топці, або швидкість руху стрічкового конвеєра, що забезпечує високу якість продукції, що випускається. Важливу роль також відіграє висока безпека експлуатації обладнання, адже в більшості нещасних випадків на виробництві головну роль відіграє людський фактор.

Це вимагає ретельного вивчення питань забезпечення безпечних умов праці на таких підприємствах.

При розробці обладнання, що застосовується в автоматизованих системах, та засобів захисту працівників та обслуговуючого персоналу повинні враховуватися специфічні властивості залучених у виробничий процес машин та механізмів, пов’язані з особливостями конструкції, виконуваних функцій, динаміки та алгоритмів управління переміщенням робочих органів. Якщо ж технологія буде розроблена неправильно, то її корисність у плані безпеки буде дорівнювати нулю і така технологія буде завдавати більше шкоди, ніж користі. Самі засоби захисту повинні бути розроблені з урахуванням необхідності знаходження обслуговуючого персоналу в робочому просторі промислових роботів. Слід врахувати, що обслуговуючий персонал бере участь у включенні, програмуванні, а також обслуговуванні та контролі промислових роботів та автоматизованого виробництва загалом.

Сама ж оцінка безпеки роботизованих та автоматизованих виробництв повинна включати:

- визначення необхідності доступу обслуговуючого персоналу до робочого простору для програмування, обслуговування або контролю за роботою автоматизованих та роботизованих виробництв;
- визначення шкідливих виробничих факторів та джерел їх виникнення при

роботі на автоматизованих та роботизованих виробництвах;

- оцінку ступенів ризику виникнення різних небезпечних ситуацій на автоматизованих та роботизованих виробництвах;
- проведення комплексної оцінки безпеки та ухвалення рішення про достатність застосованих засобів захисту для забезпечення мінімального ризику для обслуговуючого персоналу.

Також слід пам'ятати, що конструкція автоматизованих та роботизованих виробництв повинна унеможливлювати травмування осіб та обслуговуючого персоналу. Якщо ж ця вимога з яких-небудь причин не може бути виконана, необхідно захистити робочий простір захисними огороженнями.

Пульти та органи управління також повинні відповідати певним вимогам.

Основними причинами, що формують небезпечні, критичні та аварійні ситуації при експлуатації робототехніки та автоматизованих систем є:

- непередбачені рухи виконавчих пристроїв обладнання при налагодженні, ремонті, під час навчання та виконання керуючої програми;
- раптова відмова у роботі промислового робота або технологічного обладнання, спільно з яким він працює;
- хибні (ненавмисні) дії оператора або наладчика під час налагодження та ремонту при роботі в автоматичному режимі;
- доступ людини в робочий простір обладнання, що функціонує в режимі виконання програми;
- порушення умов експлуатації промислового обладнання;
- порушення вимог ергономіки та безпеки праці при плануванні комплексу та ділянки.

Встановлено, що найбільш травмонебезпечною ситуацією є прямий контакт людини з машиною, коли людина виконує такі операції, як перепрограмування, налагодження, ремонт, встановлення, зняття інструменту, монтаж, змащення або чищення, виявлення причин та усунення несправностей.

Найбільшого ризику бути травмованими під час виконання вищеперелічених операцій піддаються працівники таких професій: слюсарі-монтажники, складальники, електротехніки, наладчики, майстри діляниць.

Основним принципом забезпечення безпеки автоматичних та автоматизованих виробничих процесів чи виробництв є виключення чи зведення до мінімуму ймовірності (соціально-допустимого ризику) виникнення небезпечних ситуацій, що формують нещасні випадки та інші небажані явища.

Іншим, не менш важливим принципом забезпечення безпеки автоматизованих виробництв є принцип економічної доцільності. Враховуючи, що абсолютна безпека – це лише бажаний стан будь-якого виробничого процесу при сучасному рівні розвитку техніки, необхідно обирати такі технології, форми організації робіт та засоби захисту, які б при мінімально можливих витратах на охорону праці досягати необхідного рівня ризику небезпеки.

Реалізація зазначених принципів передбачає:

- необхідність використання методу системного аналізу при виявленні небезпечних або шкідливих виробничих чинників та небажаних наслідків контакту людини з ними;
- оцінку стану (рівня) безпеки процесу;
- вибір та обґрунтування кількісних показників рівня безпеки проектного або експлуатованого виробництва для розробки загальних та спеціальних вимог;
- забезпечення виконання розроблених вимог при проектуванні та експлуатації.

Для захисту людини від небезпек застосовують два методи:

- забезпечення неможливості проникнення людини в робочу зону за наявності джерел небезпеки;
- застосування спеціальних пристроїв та пристроїв, які безпосередньо захищають людину від будь-якої небезпеки, що становить реальну загрозу для її життя або здоров'я.

Аналіз та правильне використання відомостей про розподіл, динаміку та причини виробничого травматизму при експлуатації автоматичних ліній дозволяють уникнути повторення помилок при проектуванні, створенні та експлуатації нових автоматичних ліній, комплексів та виробництв.

ВИСНОВКИ ЩОДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

В першій частині цієї кваліфікаційної роботи розглянуто сучасний підхід до інтеграції систем CAD/CAM. Описано різні функції системи CAD/CAM. Було підкреслено, що оскільки окремі функції стають дедалі численнішими в інтегрованому середовищі CAD/CAM, користувачі усвідомлюють зростаючі неефективності: зокрема, важко вивчати особливості різних систем, а ручне вилучення даних з однієї системи в іншу є джерелом помилок. Існуючою проблемою цього дослідження визначено інтеграцію двох систем для забезпечення динамічного, в реальному часі, інтерактивного відображення руху інструментів на фрезерних верстатах з числовим програмним керуванням. Підхід, застосований для вирішення цієї проблеми, враховує такі фактори, як: інтерфейс системи, структура системи та взаємодія з користувачем.

Далі розглянуто існуючу систему. Було описано апаратне забезпечення, програмне забезпечення та дві доступні графічні системи. Система Unigraphics CAD/CAM спочатку детально описана, а також пояснено різні модулі, доступні в Unigraphics, та їхні можливості. Описано сучасний метод проектування деталі та її обробки за допомогою фрезерного модуля. Хоча роздільна здатність на терміналах, на яких наразі працює Unigraphics, дуже хороша, у неї є кілька недоліків. Можна відображати зображення лише одного кольору та інтенсивності. Вибіркове стирання неможливе, і динамічна графіка не може бути запущена. Під час обробки складних деталей лінії, проведені інструментом, перекривають деталь, тому до моменту завершення обробки майже неможливо відрізнити деталь від лабіринту ліній на екрані.

Термінали VS11 належать до типу raster-scan. Основні компоненти графічної системи VS11 включають: високошвидкісний процесор дисплея, модулі пам'яті зображень та генератор/керування курсором синхронізації. Ця система здатна відображати 16k кольорів. Завдяки апаратним і програмним характеристикам системи зображення можуть відображатися динамічно, а також виконувати такі функції, як обертання, трансляція та масштабування. Під час обробки деталі простіше візуально оглянути дисплей, щоб виявити перешкоди обробленої деталі з

інструментом, затискачами або кріпленнями.

Далі виконано проектування нової системи. Система працює в інтерактивному режимі. Інтерфейс людина/машина реалізується за допомогою меню, яке може обирати користувач і яке з'являється на графічному екрані і дає користувачу підказки для взаємодії в режимі реального часу. Вихідні файли Cutter-Location передаються з Unigraphics через бібліотеку вихідного коду Grip до каталогу VS11. Деталь, що підлягає обробці, передається за допомогою підпрограм UFIP безпосередньо на термінали VS11.

Інтерактивна програма TOOL-TRANSFER забирає CL-Source File і зберігає необхідну інформацію в цьому файлі у нейтральному форматі. Інша програма, TOOL-DISPLAY, отримує ці дані, обробляє їх і відображає на моніторі VS11.

Екран VS11 використовується для повідомлень, введення команд і відображення. Повідомлення, що відображаються, – це координати розташування інструменту та його положення у файлі CL-Source у цей момент. Метод відображення та введення команд здійснюється за допомогою динамічних меню. Користувач отримує опції для відображення інструменту, трасування інструменту, стирання інструменту та швидких або повільних рухів інструменту. Також користувач може змінювати кольори будь-якого графічного примітиву або інструменту, орієнтувати деталь у будь-якому напрямку і потім обробляти її, або виконувати операції, такі як перенесення, обертання та масштабування деталі.

Також в роботі наведено дані для підтвердження технічної доцільності бажаної системи. Деталь спочатку проектується та обробляється на системі Unigraphics. Та сама деталь потім передається у систему VS11 і відображається разом із рухами інструменту. Різні опції, доступні користувачу, ілюструються за допомогою фігур. Переваги відображення в системі VS11 очевидні.

Технічна доцільність використання анімації в реальному часі у поєднанні з технологією інтерактивної графіки була продемонстрована для відображення руху інструментів на фрезерних верстатах з числовим програмним керуванням.

Деталі, розроблені та виготовлені на Unigraphics, тепер можна передавати на термінали VS11 і відображати на них, використовуючи всі переваги VS11. Очевидно, що шлях інструменту, який відображається на динамічному

кольоровому дисплеї в реальному часі, набагато легше відстежити. Відображене зображення не приховується лініями, обведеними інструментом, як на трубці зберігання. Деталь може бути орієнтована в будь-якому напрямку, а операцію обробки виконується для кращого огляду. Програмне забезпечення, доступне на VS11, також дозволяє виконувати такі операції, як масштабування, переміщення, масштабування та обрізання – усе це сприяє більш ефективному відображенню.

Оскільки VS11 і Unigraphics – це два окремі програмні пакети, для їх інтерфейсу були потрібні методи передачі даних. Це здійснювалося шляхом спочатку передачі даних у нейтральний формат, а потім їх отримання системою VS11 для відображення. Базові відмінності між двома системами вимагали розробки іншого формату дисплея. Цього досягли завдяки використанню екрана робочої станції VS11 як для відображення, так і для передачі повідомлень. Екран поділений на область для повідомлень, область введення команд і область для відображення зображень. Взаємодія користувача, частина програми, яка визначає, як користувач і комп'ютер спілкуються, отримала особливу увагу. Користувач керує розробленою системою за допомогою динамічних ієрархічних меню. Вибір меню формує своєрідний діалог між користувачем і комп'ютером і вважається дружнім методом роботи системи.

Слід відмітити кілька напрямків, які надалі слід вивчати глибше, щоб інтеграції подібних систем були успішними.

Інтерфейсні програми, розроблені для передачі деталей і вихідних файлів Cutter-Location (Cutter-Location) між системами Unigraphics і VS11, потребують подальшого вивчення. Цей інтерфейс є ключовим фактором успіху системи, адже якщо користувачам не подобається спосіб, у який вони взаємодіють із системою, вони не будуть ефективно його використовувати. Усі різні програми – для передачі деталі та CL-Source Files через Grip у каталог VS11, а також програми для передачі та відображення TOOL-TRANSFER і TOOL-DISPLAY – повинні бути об'єднані в одну повноцінну програму. Це зробить систему компактнішою, простішою та зручнішою у використанні.

Інтегрована база даних та її структура потребують глибшого дослідження. Ефективність системи частково залежить від легкості доступу до даних та передачі

з одного формату в інший. Дуже корисно мати спільну, стандартизовану базу даних, подібну до формату IGE, у яку одна система має перекладати свої дані, а інша – отримувати їх. Це гарантує, що не буде дублювання зусиль з боку різних користувачів.

Остаточною системою було б використання VS11 як робочої станції Unigraphics. Це усунуло б будь-яку потребу у розробці програм передачі або відображення та перерозподілі файлів між двома системами. Однак для цього потрібно докласти значних зусиль – переписати всі модулі додатків із використанням функцій дисплеїв, які підтримують динаміку в реальному часі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем: монографія / О.Ф. Тарасов, О.В. Алтухов, П.І. Сагайда, Л.В. Васильєва, В.Л. Аносов. Краматорськ: ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. 239 с.
- 2 Біляковський І.Є. Електромехатронні перетворювачі систем автоматики. Львів.: Магнолія. 2024. 155 с.
- 3 Васильківський І. С., Фединець В. О., Юсик Я. П. Виконавчі пристрої систем автоматизації. Львів: Львівська політехніка, 2020. 220 с.
- 4 Гевко Б. М., Матвійчик А. Б. Технологія обробки на верстатах з ЧПК. Навчальний посібник. Тернопіль: ТДТУ. 2004. 131с.
- 5 Гребеников А.Г., Удовиченко С.В., Гуменний А.В. Основи комп'ютерного моделювання за допомогою інтегрованої системи CAD/CAM/CAE/PLM UNIGRAPHICS NX. Харків, ХАІ, 2004. 199 с.
- 6 Дерібо О.В., Лозінський Д.О., Сердюк О.В. Технології для верстатів з числовим програмним керуванням. Вінниця: ВНТУ, 2023. – 116 с.
- 7 Желібо Є.П., Заверуха Н.М., Зацарний В.В. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник. К.: Каравела. 2023. 344 с.
- 8 Краснов М.І., Чигишев Ю.В. Unigraphics для професіоналів К.: Лорі. 319 с.
- 9 Міранцов С.Л. 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
- 10 Тимченко А. А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів: Основи САПР та системного проектування складних об'єктів: К.: Либідь, 2003. 272 с.
- 11 Коноваленко І. В. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0 : навч. посіб. / І. В. Коноваленко, П. О. Марущак. – Тернопіль : В. А. Паляниця, 2020 – 320 с.
<http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/handle/123456789/4115>
- 12 Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с.

<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>

- 13 Капаціла Ю.Б., Савків В.Б. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 60 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48495>
- 14 Капаціла Ю.Б., Шовкун О.П. Конструкторсько-технологічна практика. Методичні вказівки для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 22 с.
- 15 Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження частотних характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – с. 16. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39207>
- 16 Козбур І.Р., «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>
- 17 Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1551>
- 18 Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 21 с.
- 19 Моделювання нелінійних систем керування у пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур ,

- Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. - 19 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28057>
- 20 Моделювання систем керування в пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп’ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. - 23 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28056>
- 21 Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Multisim. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо . - Тернопіль : ТНТУ Імені Івана Пулюя, 2018. - 26 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26404>
- 22 Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Proteus VSM. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ, 2018. - 26 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26397>
- 23 Методичні вказівки до курсового проектування з курсу "Проектування систем автоматизації" / Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 128 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48646>
- 24 Лабораторний практикум з проектування та моделювання роботи електропневматичних схем у середовищі програмного пакету «FluidSIM Pneumatics» з курсу «Технічні засоби автоматизації» / укл. : О.К. Шкодзінський. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 32 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31418>
- 25 Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка”. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 53 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44635>
- 26 Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль

3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. -26 с.
- 27 Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.
- 28 Аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи. : Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Теорія автоматичного управління», для здобувачів спеціальності 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньо-професійних програм «Комп’ютерно-інтегровані системи автоматики та робототехніки», «Комп’ютеризовані системи управління та прикладне програмування». / укл. І.Р. Козбур, В.П. Пісьціо, В.Б. Савків, П.С. Федорів. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. – 67 с
- 29 Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
- 30 Навчально-методичний посібник до практичних заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» для студентів освітнього ступеня бакалавр усіх спеціальностей та форм навчання / Укладачі : О. Я. Гурик, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин, С. Ю. Мариненко, О. І. Король. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 123 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48496>
- 31 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
- 32 Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп’ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.
- 33 Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп’ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.

- 34 Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
- 35 Буров Є., Митник М. Комп'ютерні мережі. (у 2-х томах). Львів, Магнолія, 2018.
- 36 Комплексна безпека інформаційних мережевих систем. Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А. Г. Микитиший, М. М. Митник, О. С. Голотенко, В. В. Карташов. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42625>
- 37 Конспект лекцій з дисципліни «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» для студентів спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форми здобуття освіти / уклад. І. С. Дідич. // ТНТУ. – 2025. – С. 92. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/50293>
- 38 Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>
- 39 Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.
- 40 Савків В.Б., Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2021. 50 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35172>
- 41 Digital Representation for Communication of Product definition Data American Society of Mechanical Engineers. 2012.
- 42 Liewald, Michael H. and Kennicott, Philip R. Intersystem Data Transfer via IGES. Computer Graphics and Applications . 2001.
- 43 Meyers, Ware. CAD/CAM: The need for a broader focus. Computer. 2022.
- 44 Eder, Wolfgang Ernst. Theory of Technical Systems – Educational Tool for Engineering / Wolfgang Ernst Eder // Universal Journal of Educational Research.

2016. 4(6). P. 1395–1405. – DOI: 10.13189/ujer.2016.040617. Режим доступа:
<http://www.hrpub.org/download/20160530/UJER17-19506466.pdf>.