

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

РОЗРАХУНКОВО-ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА

на тему: **Використання CAD/CAM систем для автоматизації підготовки**
програм ЧПК

Виконав: здобувач вищої освіти
4 курсу, групи Сінж-2022-1
курс, група

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»

напряму підготовки (спеціальність)

Міленін Артем Олексійович
(прізвище та ініціали)

Керівник Цегельник Є. В., доц. каф. АКІТ
(прізвище та ініціали, наук. ступ., вч. звання)

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

Харків – 2026

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

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

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

 БАРАНОВ О.О.

« 19 » червня 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Міленін Артем Олексійович

1.Тема роботи: Використання CAD/CAM систем для автоматизації підготовки програм ЧПК

Затверджена наказом університету від « 22 » травня 2026 року № 440-03.

Керівник роботи Цегельник Є. В. к. т. н., доцент, доцент кафедри АКІТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)








2. Строк подання роботи здобувачем вищої освіти «19» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи CAD/CAM системи для автоматизації підготовки програм ЧПК

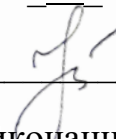
4. Зміст розрахунково пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Теоретичні основи використання CAD/CAM систем у програмуванні ЧПК. Методи та підходи автоматизації програмування ЧПК у CAD/CAM системах. Практична реалізація дослідження. Охорона праці. Висновки.


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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)





Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналіз проблеми	Цегельник Є. В.	11.05.2026 	21.05.2026 
Основна частина	Цегельник Є. В.	22.05.2026 	31.05.2026 
Спеціальний розділ	Цегельник Є. В.	01.06.2026 	20.06.2026 
Охорона праці	Малишева В.В.	08.06.2026 	19.06.2026 

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

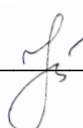
Керівник  _____ Цегельник Є.В.
(підпис)

Завдання прийняв до виконання  _____ Міленін А.О.
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання розділів	Примітка
1	Розробка 1 го розділу бакалаврської роботи	11.05.2026 - 21.05.2026	
2	Розробка 2 го розділу бакалаврської роботи	22.05.2026 - 31.05.2026	
3	Розробка 3 го розділу бакалаврської роботи	01.06.2026 - 20.06.2026	
4	Розробка 4 го розділу з охорони праці	08.06.2026 - 19.06.2026	
5	Рецензування бакалаврської роботи	20.06.2026	Тимофєєв О.В.
6	Захист на ДЕК	26.06.2026	

Здобувача вищої освіти  _____ Міленін А.О.
(підпис)

Керівник _____ Цегельник Є.В.
(підпис) 

РЕФЕРАТ

Використання CAD/CAM систем для автоматизації підготовки програм ЧПК – Міленін Артем Олексійович, дипломна робота бакалавра, Харків, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, кількість сторінок 124, кількість таблиць 2, кількість рисунків 49, кількість джерел літератури 55.

Актуальність дослідження зумовлена сучасними тенденціями розвитку цифрового виробництва та необхідністю підвищення ефективності технологічної підготовки виробництва. В умовах зростання вимог до якості продукції, точності обробки деталей та скорочення термінів виготовлення підприємства активно впроваджують верстати з ЧПК. Використання CAD/CAM систем дозволяє автоматизувати процес створення керуючих програм на основі тривимірних моделей виробів, забезпечити оптимізацію траєкторій руху інструменту, скоротити час підготовки виробництва та підвищити точність виготовлення деталей. Інтеграція CAD/CAM технологій із сучасними концепціями цифрового виробництва та Індустрії 4.0 сприяє створенню єдиного інформаційного простору підприємства та підвищенню його конкурентоспроможності.

Об'єктом дослідження є процес технологічної підготовки виробництва деталей на верстатах з числовим програмним керуванням.

Предметом дослідження є методи, моделі та засоби автоматизованого формування керуючих програм ЧПК із використанням CAD/CAM систем.

Метою дослідження є підвищення ефективності технологічної підготовки виробництва шляхом використання CAD/CAM систем для автоматизації розроблення та оптимізації керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Провести аналіз сучасних підходів до програмування верстатів з ЧПК та дослідити можливості CAD/CAM систем у процесі технологічної підготовки виробництва.
- Розглянути принципи інтеграції CAD і CAM модулів у єдиному інформаційному середовищі виробництва.
- Виконати аналіз функціональних можливостей сучасних CAD/CAM систем для автоматизованого створення керуючих програм.

У роботі використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів дослідження, а саме, аналіз і узагальнення науково-технічної літератури, нормативної документації та сучасних програмних засобів, методи системного аналізу, комп'ютерного моделювання, автоматизованого проєктування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: CAD/CAM-системи, числове програмне керування, комп'ютерно-інтегроване виробництво, автоматизація технологічної підготовки.

ABSTRACT

Use of CAD/CAM systems for automating CNC program preparation – Milenin Artem, bachelor's thesis, Kharkiv, Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov, number of pages 124, number of tables 2, number of figures 49, number of literature sources 55.

The relevance of the study is due to modern trends in the development of digital production and the need to increase the efficiency of technological preparation of production. In the context of increasing requirements for product quality, accuracy of part processing and reduction of production times, enterprises are actively introducing CNC machines. The use of CAD/CAM systems allows you to automate the process of creating control programs based on three-dimensional product models, ensure optimization of tool motion trajectories, reduce production preparation time and increase the accuracy of part manufacturing. Integration of CAD/CAM technologies with modern concepts of digital production and Industry 4.0 contributes to the creation of a single information space of the enterprise and increasing its competitiveness.

The object of the research is the process of technological preparation of parts production on numerically controlled machine tools.

The subject of the research is methods, models and means of automated generation of CNC control programs using CAD/CAM systems.

The purpose of the research is to increase the efficiency of technological preparation of production by using CAD/CAM systems to automate the development and optimization of control programs for numerically controlled machine tools.

To achieve the goal, it is necessary to solve the following tasks:

- To analyze modern approaches to programming CNC machines and explore the capabilities of CAD/CAM systems in the process of technological preparation of production.

- To consider the principles of integration of CAD and CAM modules in a single information environment of production.

- To analyze the functional capabilities of modern CAD/CAM systems for automated creation of control programs.

To achieve the set goal, the work used a complex of general scientific and special research methods, namely, analysis and generalization of scientific and technical literature, regulatory documentation and modern software tools, methods of system analysis, computer modeling, automated design.

KEYWORDS: CAD/CAM systems, numerical program control, computer-integrated production, automation of technological training.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ CAD/CAM СИСТЕМ У ПРОГРАМУВАННІ ЧПК	11
1.1 Історія розвитку CAD/CAM технологій	11
1.2 Основні функції CAD/CAM систем, їх переваги та недоліки	12
1.3 Інтеграція CAD/CAM у процеси підготовки виробництва.....	16
Висновки до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2. АРХІТЕКТУРА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ CAD/CAM СИСТЕМ	25
2.1 Інтеграція CAD/CAM систем із верстатами з ЧПК	25
2.2 Методи автоматизованого програмування.....	27
2.3 Обмеження та проблеми впровадження CAD/CAM у виробництво	29
Висновки до розділу 2	30
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	32
3.1 Моделювання елементів ліфтової тягової машини	32
3.2 Етапи створення 3D-моделі деталі	37
3.3 Порівняння результатів ручного та автоматизованого програмування	105
Висновки до розділу 3	107
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	109
4.1 Організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці.....	109
4.3. Дослідження ризику реалізації потенційних небезпек на об'єкті проектування та розробка заходів щодо їх попередження	111
Висновки до розділу 4	114
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118

ВСТУП

У сучасних умовах цифрової трансформації економіки особливого значення набуває підвищення ефективності виробничих процесів. Машинобудівна галузь України стикається з необхідністю скорочення виробничих циклів, забезпечення високої точності оброблення деталей та впровадження інтелектуальних систем управління. Ці вимоги формуються під впливом глобальних тенденцій четвертої промислової революції (Industry 4.0), яка передбачає інтеграцію інформаційних технологій, автоматизації та штучного інтелекту у виробничі процеси.

Водночас економіка України перебуває у стані глибокої кризи, спричиненої війною. Руйнування виробничих потужностей, порушення логістичних ланцюгів та обмеженість ресурсів створюють додаткові виклики для підприємств, особливо у Харкові, що розташований у прифронтовій зоні. У цих умовах підприємства змушені працювати з максимальною гнучкістю та адаптивністю, використовуючи сучасні цифрові технології.

У цьому контексті Industry 4.0 виступає шансом для відновлення промисловості за рахунок автоматизації та оптимізації ресурсів. Одним із ключових інструментів цієї концепції є системи CAD/CAM, які забезпечують автоматизацію програмування верстатів з ЧПК, моделювання технологічних процесів та зменшення витрат. Їх впровадження дозволяє українським підприємствам залишатися конкурентоспроможними навіть у кризових умовах та створює основу для майбутнього відновлення економіки.

Актуальність теми дипломної роботи визначається поєднанням глобальних тенденцій цифрової трансформації, специфічних викликів воєнної економіки України та локальної ситуації Харкова як прифронтового міста. Автоматизація програмування ЧПК за допомогою CAD/CAM систем стає не лише інструментом

підвищення ефективності виробництва, але й важливим чинником підтримки стабільності та розвитку машинобудівних підприємств.

Об'єктом дослідження є процес технологічної підготовки виробництва деталей на верстатах з числовим програмним керуванням.

Предметом дослідження є методи, моделі та засоби автоматизованого формування керуючих програм ЧПК із використанням CAD/CAM систем.

Метою дослідження є підвищення ефективності технологічної підготовки виробництва шляхом використання CAD/CAM систем для автоматизації розроблення та оптимізації керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Провести аналіз сучасних підходів до програмування верстатів з ЧПК та дослідити можливості CAD/CAM систем у процесі технологічної підготовки виробництва.
- Розглянути принципи інтеграції CAD і CAM модулів у єдиному інформаційному середовищі виробництва.
- Виконати аналіз функціональних можливостей сучасних CAD/CAM систем для автоматизованого створення керуючих програм.

У дипломній роботі використано комплекс методів дослідження. Аналітичний метод застосовано для систематизації наукових джерел та нормативної бази. Порівняльний метод використано для зіставлення ручного та автоматизованого програмування, що дозволило визначити їхні переваги та недоліки. Метод моделювання застосовано для створення тривимірної моделі деталі та симуляції процесу оброблення. Експериментальний метод реалізовано у формі комп'ютерного моделювання та симуляції процесів у CAD/CAM системах, що забезпечило оцінку точності та ефективності автоматизованого програмування.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ CAD/CAM СИСТЕМ У ПРОГРАМУВАННІ ЧПК

1.1 Історія розвитку CAD/CAM технологій

Винахідником числового програмного керування (ЧПК) вважається американський інженер Джон Т. Парсонс, який у 1949 році запропонував застосовувати перфокарти для керування фрезерними верстатами [26]. У 1952 році в лабораторії Servo Mechanisms Laboratory Массачусетського технологічного інституту було продемонстровано перший експериментальний верстат із програмним керуванням [26], а вже у 1954 році компанія Bendix Corporation випустила серійний пристрій ЧПК [26]. З появою мікрокомп'ютерів (PDP-8) та мови G-код у 1960-х роках числове керування набуло більшої гнучкості й стало придатним для широкого промислового використання [26].

Паралельно у США у 1960-х роках розпочалися перші спроби автоматизації проектування та виготовлення деталей. Було створено системи Computer Aided Design (CAD), призначені для креслення та моделювання [26]. У 1970-х роках відбулося поєднання CAD із Computer Aided Manufacturing (CAM), що дало змогу формувати керуючі програми для верстатів з ЧПК безпосередньо з цифрових моделей виробів [26]. Це стало фундаментальним кроком у переході від ручного програмування до автоматизованого [26].

У 1980-х роках розвиток персональних комп'ютерів і поява перших комерційних програмних продуктів зробили CAD/CAM технології доступними для широкого кола підприємств [22]. Важливим етапом стало впровадження міжнародних стандартів обміну даними, зокрема ISO 10303 (STEP), які забезпечили сумісність різних програмних середовищ і виробничого обладнання [6; 27].

У 1990-х роках CAD/CAM системи отримали можливість тривимірного моделювання, симуляції процесів обробки та оптимізації траєкторій інструментів [22]. Це значно підвищило точність і ефективність програмування ЧПК, дозволило інженерам прогнозувати поведінку інструментів та зменшувати кількість помилок у виробництві [22].

На початку XXI століття розвиток CAD/CAM технологій був тісно пов'язаний із концепціями Product Lifecycle Management (PLM) та інтеграцією з ЧПК через стандарт STEP NC [21; 34; 49]. Це забезпечило створення єдиної цифрової моделі виробу, яка супроводжує його від етапу проектування до виготовлення [21; 49].

Сучасний етап (2010-ті – 2020-ті роки) характеризується інтеграцією CAD/CAM із хмарними платформами [32; 41], цифровими двійниками [23; 25; 33; 36; 39; 53; 55] та алгоритмами штучного інтелекту [46]. Такі рішення дозволяють автоматично генерувати керуючі програми, адаптувати їх до конкретних умов виробництва та підвищувати рівень автономності верстатів з ЧПК [42].

В Україні розвиток систем числового програмного керування відбувався переважно шляхом адаптації світових технологій та їх впровадження у навчальних і виробничих процесах університетів та заводів [13]. У 1970–1990-х роках застосовувалися радянські системи NC/CNC на машинобудівних підприємствах Харкова, Києва та Львова [13]. На виробництві поширення отримали системи «Компас ЧПК», «АДЕМ», «Т-Flex» [7; 8], які забезпечували підготовку програм для верстатів з ЧПК та інтеграцію з CAD/CAM середовищами [8].

1.2 Основні функції CAD/CAM систем, їх переваги та недоліки

Розглянемо основні функції CAD/CAM систем, які сьогодні відіграють ключову роль у машинобудуванні та автоматизації виробничих процесів [9; 10].

Насамперед вони забезпечують проєктування виробів у цифровому середовищі [7; 9], що включає створення креслень, геометричних моделей та технічної документації [10]. Наступним етапом є моделювання [14; 18], яке дозволяє будувати тривимірні моделі, проводити симуляцію процесів обробки [14; 18; 20] та аналізувати конструкції на міцність, точність і технологічність [14; 18]. Завершальною функцією є генерація керуючих програм для верстатів з ЧПК [10; 11; 16], що забезпечує інтеграцію між етапами проєктування та виробництва та істотно скорочує час підготовки виробничих процесів [11].

CAD системи виконують функцію проєктування, що полягає у створенні креслень, геометричних моделей та технічної документації у цифровому середовищі [7; 9]. Завдяки параметричному моделюванню інженери можуть швидко змінювати конструкцію виробу, перевіряти її відповідність стандартам та технологічним вимогам ще на ранніх етапах розробки [10].

Другим етапом є моделювання, яке забезпечує побудову тривимірних моделей виробів та їх віртуальну перевірку [14; 18]. Симуляція процесів обробки дозволяє оцінити точність і технологічність конструкції [14; 18; 20], прогнозувати поведінку інструментів та оптимізувати технологічні процеси [14; 18]. Таким чином, інженери отримують можливість мінімізувати кількість помилок у виробництві та підвищити якість кінцевої продукції [14; 18].

Завершальною функцією є генерація керуючих програм для верстатів з ЧПК. САМ-системи автоматично формують G-код та інші формати програмного забезпечення [10; 11; 16], враховуючи специфіку обладнання, режими різання та параметри інструментів [1; 15; 17]. Це забезпечує інтеграцію між етапами проєктування та виробництва [10; 11], істотно скорочує час підготовки виробничих процесів та підвищує рівень їх автоматизації [11]. Три основні функції (проєктування, моделювання та генерація керуючих програм) утворюють

замкнений цикл цифрового виробництва [7; 9; 10], що є фундаментом сучасної автоматизації у машинобудуванні [22].

Впровадження CAD/CAM технологій у машинобудуванні стало якісним проривом у порівнянні з традиційним ручним програмуванням верстатів з ЧПК [22]. Основною перевагою є значне скорочення часу підготовки виробництва: автоматизоване створення керуючих програм дозволяє швидко переходити від етапу проєктування до виготовлення [11]. Важливим чинником є також зменшення кількості помилок завдяки симуляції процесів обробки [14; 18], що дає змогу виявити неточності ще до запуску виробництва [20].

Суттєвою перевагою є оптимізація траєкторій інструментів [1; 17], яка забезпечує економію матеріалів та зменшення часу обробки [44]. Крім того, CAD/CAM системи створюють умови для інтеграції з виробничим обладнанням [2; 7], формуючи єдиний цифровий ланцюг від моделі виробу до готової деталі [10]. Важливою перевагою є також використання міжнародних стандартів обміну даними (ISO 10303 STEP, STEP NC) [6; 21; 27; 34; 49], що гарантує сумісність між різними програмними продуктами та обладнанням. Можливість тривимірного аналізу конструкцій дозволяє інженерам прогнозувати міцність, точність і технологічність виробів [14; 18], що підвищує якість кінцевої продукції [20].

Водночас використання CAD/CAM систем має низку обмежень. Насамперед це висока вартість ліцензійного програмного забезпечення та навчання персоналу [9], що потребує значних інвестицій. Ефективність системи часто залежить від сумісності з обладнанням [9], що може обмежувати її застосування на підприємствах із застарілою технікою [19]. Важливим чинником є також необхідність високої кваліфікації користувачів [9], адже робота з CAD/CAM вимагає спеціальної підготовки та постійного оновлення знань у зв'язку з швидким розвитком технологій [42].

Серед інших обмежень варто відзначити ризик технічних збоїв, пов'язаних із програмними помилками чи несумісністю форматів [19], що може призвести до зупинки виробничого процесу [42]. Крім того, у деяких випадках ручне програмування забезпечує більшу гнучкість [19], дозволяючи швидко внести нестандартні зміни без використання складних інтерфейсів [22]. Важливо враховувати й залежність від ІТ-інфраструктури [32; 41], адже ефективність CAD/CAM систем визначається рівнем розвитку комп'ютерної техніки, серверів та мережевих рішень на підприємстві [42].

CAD/CAM системи формують основу сучасної цифрової трансформації виробництва [28; 29; 30], забезпечуючи високу точність, ефективність та інтеграцію процесів [22]. Проте їх застосування потребує врахування економічних, технічних, кадрових та інфраструктурних факторів [9; 19; 42], що визначають успішність впровадження на конкретному підприємстві [2; 7; 8].

Використання CAD/CAM систем у процесі підготовки керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням має вирішальне значення для сучасного машинобудування [7; 9; 10]. На відміну від традиційного ручного програмування, яке потребує значних витрат часу та високої кваліфікації оператора [22], CAD/CAM технології забезпечують інтегрований цифровий процес, що охоплює всі етапи: від створення моделі виробу до формування готової програми [10; 11; 16].

Функція проєктування дозволяє створювати точні цифрові моделі деталей, які відповідають стандартам та технологічним вимогам [7; 9]. На основі цих моделей здійснюється моделювання процесів обробки [14; 18; 20], що дає змогу інженерам прогнозувати результати виробництва [14; 18], оптимізувати параметри різання [1; 15; 17] та мінімізувати кількість помилок [44]. Завершальним етапом є генерація керуючих програм, яка забезпечує автоматичне формування G- коду та інших форматів, адаптованих до конкретного обладнання [10; 11; 16].

Практичне значення CAD/CAM систем полягає у створенні єдиного цифрового середовища, де всі етапи підготовки виробництва взаємопов'язані та інтегровані [30; 32; 41]. Це дозволяє скоротити час розробки [11], підвищити точність виготовлення деталей [14; 18], зменшити витрати матеріалів [44] і забезпечити стабільну якість продукції [42]. Практичне значення даних систем у автоматизації програмування ЧПК підтверджується прикладами їх застосування у сучасному виробництві [23; 25; 33; 36; 39; 53]. Такі програмні комплекси, як SolidWorks/SolidCAM, Siemens NX та Mastercam, забезпечують повний цикл: від створення тривимірної моделі до автоматичної генерації керуючих програм [10; 11]. В Україні поширення отримали системи T- Flex CAD/CAM, Компас- 3D та ADEM, які інтегрують процеси проектування та програмування [8], формуючи компетентність майбутніх інженерів [8].

CAD/CAM системи не лише скорочують час підготовки виробництва [11] та зменшують кількість помилок [14; 18; 44], але й створюють єдине цифрове середовище [30; 32; 41], що забезпечує ефективну інтеграцію між етапами проектування та виготовлення [10; 11]. Це робить їх ключовим інструментом цифрової трансформації машинобудування [28; 29; 30] та важливим елементом підготовки фахівців у галузі автоматизації [8].

1.3 Інтеграція CAD/CAM у процеси підготовки виробництва

Зв'язок CAD/CAM систем із верстатами з ЧПК реалізується через різні інтерфейси передачі даних. Традиційно для цього застосовуються DNC- системи [2], які забезпечують централізоване керування програмами та їх розподіл між кількома верстатами. У сучасних виробничих умовах поширене пряме підключення через Ethernet [7], що дозволяє швидко передавати великі обсяги даних та інтегрувати обладнання у корпоративні мережі. Для невеликих

підприємств зручним рішенням залишаються USB-інтерфейси [7], які забезпечують просте завантаження програм без складної інфраструктури. Додатково впроваджуються бездротові технології (Wi-Fi) [28], що відповідають вимогам «розумного виробництва» та концепції Industry 4.0 [29; 30]. Таким чином, практичний механізм зв'язку між CAD/CAM і ЧПК забезпечує неперервність цифрового ланцюга та гнучкість у виборі способів інтеграції залежно від рівня розвитку підприємства. Неперервний зв'язок між етапами проектування, моделювання та виготовлення у CAD/CAM системах забезпечується завдяки використанню єдиної цифрової моделі виробу [30; 32]. Передача даних між програмними середовищами здійснюється за допомогою міжнародних стандартів ISO 10303 (STEP) [6] та STEP NC [21; 27; 34; 49; 50; 52], що гарантує сумісність і точність інформації. CAM-модулі автоматично генерують керуючі програми безпосередньо з цифрових моделей [10; 11], а симуляція процесів обробки дозволяє перевірити їх правильність та оптимізувати технологічні параметри [14; 18; 20]. Завдяки інтеграції з системами ЧПК готові програми передаються на верстати без додаткового ручного втручання [22], що формує єдиний цифровий ланцюг від проектування до виготовлення [30; 32].

Неперервність інтеграції CAD/CAM у виробничі процеси посилюється завдяки використанню систем зворотного зв'язку [42], коли дані з датчиків верстатів з ЧПК передаються назад у програмне середовище для корекції моделей та програм [44]. Важливу роль відіграють хмарні платформи [32; 41] та системи PLM [30], які забезпечують збереження й доступність усієї інформації про виріб протягом його життєвого циклу [30; 32]. Додатковим інструментом є цифрові двійники [23; 25; 33; 36; 39; 53; 55], що дозволяють моделювати та оптимізувати весь виробничий процес у віртуальному середовищі [36; 39], підвищуючи точність і ефективність інтеграції [53; 55].

Інтеграція CAD/CAM у процеси підготовки виробництва не обмежується лише автоматичною генерацією програм та симуляцією обробки [10; 11; 14; 18]. Вона формує адаптивний цифровий цикл [30; 32; 41], у якому дані з виробництва повертаються у програмне середовище для корекції моделей [42; 44], а PLM- системи та цифрові двійники [23; 25; 33; 36; 39; 53; 55] забезпечують комплексне управління життєвим циклом виробу. Це створює умови для скорочення виробничих циклів [42], підвищення точності [44] та гнучкості виробництва [28; 29; 30], що є ключовим чинником цифрової трансформації машинобудування [28; 29; 30].

Автоматизація створення керуючих програм у CAD/CAM системах є одним із ключових етапів цифрової трансформації виробництва [28; 29; 30]. Вона забезпечує перехід від тривимірної моделі виробу до готового G-коду, який може бути безпосередньо використаний на верстатах з числовим програмним керуванням [21; 34; 49; 50; 52]. Цей процес охоплює три взаємопов'язані складові: визначення режимів різання, вибір інструментів та перевірку траєкторій [10; 11; 16].

Режими різання формуються автоматично на основі властивостей матеріалу, геометрії деталі та характеристик обладнання [1; 15; 17]. Система розраховує швидкість обертання шпинделя, подачу та глибину різання [43], що дозволяє оптимізувати технологічний процес, зменшити знос інструментів і забезпечити високу якість поверхні [44]. Водночас у складних випадках ці параметри потребують корекції з боку інженера [35], адже універсальні алгоритми не завжди враховують специфіку окремих виробничих умов [31].

Вибір інструментів здійснюється за допомогою бібліотек САМ-систем [10; 11], які містять дані про різні типи ріжучого інструменту [38]. Автоматичний підбір враховує геометрію деталі, тип операції та матеріал інструмента [17], що значно скорочує час підготовки виробництва [42]. Проте ефективність цього етапу

залежить від актуальності бібліотеки та доступності інструментів на конкретному підприємстві [19], адже система може запропонувати варіант, який не відповідає реальним ресурсам [9].

Перевірка траєкторій є завершальним етапом автоматизації [14; 18; 20]. САМ-система здійснює симуляцію руху інструмента [44], візуалізує траєкторії та перевіряє можливі зіткнення [51]. Це дозволяє уникнути аварійних ситуацій [42], оптимізувати час обробки [11] та зменшити витрати матеріалів [44]. Водночас симуляція не завжди враховує всі реальні фактори, наприклад, вібрації чи зношення інструментів [3; 17], що потребує додаткового контролю з боку оператора [35].

Автоматизація створення керуючих програм у CAD/CAM системах поєднує переваги цифрових технологій із необхідністю професійного втручання [22]. Вона забезпечує високу точність і ефективність виробничих процесів [42], скорочує час підготовки [11] та зменшує кількість помилок [14; 18; 44], але водночас вимагає кваліфікованого контролю для адаптації до конкретних умов виробництва [19].

Інтеграція CAD/CAM систем у виробничі процеси має комплексний вплив на точність виготовлення деталей та швидкість підготовки керуючих програм [10; 11; 16]. Це підтверджується як експериментальними дослідженнями [1; 15; 17; 44], так і практикою промислових підприємств [2; 7; 9].

Застосування CAD/CAM дозволяє досягати високих показників точності завдяки автоматизованому розрахунку режимів різання [1; 15; 17] та симуляції процесів обробки [14; 18; 20]. У наукових публікаціях (Springer, IEEE) підкреслюється, що використання цих систем у високоточному машинобудуванні зменшує похибки геометрії деталей до рівня вимог авіаційної та автомобільної промисловості [36; 39; 53; 55]. Симуляційні моделі забезпечують контроль траєкторій інструментів і запобігають зіткненням [44; 51], що підтверджено експериментами у виробничих умовах [3; 17; 35].

За даними Elsevier, автоматизація створення керуючих програм скорочує час переходу від тривимірної моделі до готового G- коду у середньому на 30–40 % порівняно з ручним програмуванням [42]. Це досягається завдяки автоматичному розрахунку режимів різання [1; 15; 17], оптимізації траєкторій [44; 51] та використанню бібліотек інструментів [10; 11]. У вітчизняних дослідженнях зазначається, що впровадження CAD/CAM у навчальний процес дозволяє студентам створювати програми для ЧПК у кілька разів швидше, ніж при традиційному підході [8], що підтверджує ефективність технології у підготовці майбутніх інженерів [8].

У серійному виробництві CAD/CAM забезпечують стабільність якості продукції [7; 9] та зниження відходів на 15–20% [42]. В умовах індивідуального виробництва вони значно скорочують цикл створення прототипів [23; 25; 33], перетворюючи процес із кількох днів на кілька годин [41], що підвищує гнучкість підприємств у реагуванні на нестандартні замовлення [30].

Вплив CAD/CAM систем має двовимірний характер: з одного боку – підвищення метрологічної точності завдяки цифровим моделям і симуляціям [14; 18; 20; 44], з іншого – суттєве скорочення часу підготовки виробничих циклів [42]. У результаті формується адаптивне цифрове середовище [30; 32; 41], яке забезпечує конкурентоспроможність підприємств у контексті сучасних вимог Industry 4.0 [28; 29; 30].

CAD/CAM системи є ключовим елементом сучасної концепції Industry 4.0, яка передбачає інтеграцію цифрових технологій у всі етапи виробничого процесу [28; 29; 30]. Їх застосування забезпечує створення цифрових двійників виробів та процесів [23; 25; 33; 36; 39; 53; 55], що дозволяє моделювати та прогнозувати результати ще до запуску реального виробництва [36; 39].

У наукових публікаціях Springer та IEEE підкреслюється, що використання CAD/CAM у поєднанні з мережевими технологіями (Ethernet, DNC-системи) [2; 7]

створює умови для прямої інтеграції обладнання у корпоративні інформаційні системи [30; 32]. Це забезпечує гнучкість виробництва [28; 29], коли підприємства можуть швидко адаптуватися до змін попиту та індивідуальних замовлень [42].

Важливим аспектом є інтеграція CAD/CAM із PLM-системами [30] та хмарними платформами [32; 41], що дозволяє створювати єдине цифрове середовище для управління життєвим циклом виробу [30; 32]. Це забезпечує доступність даних у корпоративному середовищі [41], підвищує прозорість процесів [30] та сприяє ефективному управлінню ресурсами [32].

У вітчизняних дослідженнях також наголошується на стратегічному значенні CAD/CAM у «розумному виробництві» [8]. Тарас Баган, викладач Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, досліджував застосування AutoCAD та EPLAN у проектуванні систем автоматизації, показав переваги інтеграції CAD-середовищ у виробничі процеси. Професор Олександр Гребеніков та Андрій Гуменний, викладачі Національного аерокосмічного університету імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (ХАІ), описали досвід впровадження CAD/CAM/CAE/PLM у науково-виробничому центрі, використовуючи Siemens NX, CATIA та SolidWorks для авіаційної техніки. Вадим Багмет, викладач Запорізького національного університету (ЗНУ), розробив методологію впровадження технологій Industry 4.0 на українських підприємствах, підкресливши важливість цифровізації для конкурентоспроможності економіки. Оксана Саввова, Олена Бабіч, Олексій Пилпенко, викладачі Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, інтегрують елементи Industry 4.0 у підготовку студентів спеціальності «Хімічні технології та інженерія», використовуючи цифрові платформи та симуляційні моделі. Університет також організував міжнародну конференцію «Розумні технології в міському господарстві», матеріали якої були опубліковані у

видавництві Springer у серії Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS), що індексується у Scopus та Web of Science.

Роль CAD/CAM у концепції «розумного виробництва» полягає у створенні адаптивного цифрового середовища [30; 32; 41], яке забезпечує точність [44], швидкість [42] та гнучкість виробничих процесів [28; 29; 30], відповідаючи сучасним вимогам Industry 4.0 та формуючи інноваційний потенціал українських підприємств [8].

У сучасних умовах розвитку CAD/CAM технологій особливого значення набуває застосування симуляційних моделей [14; 18; 20], які дозволяють здійснювати попередню оцінку точності оброблення ще на етапі проектування [44]. Використання таких моделей забезпечує можливість відтворення реальних виробничих процесів у віртуальному середовищі [36; 39; 53; 55], що дає змогу прогнозувати геометричні відхилення [51], визначати потенційні похибки [43] та оптимізувати режими різання [1; 15; 17].

Наукові дослідження, опубліковані у виданнях Elsevier та IEEE, підкреслюють, що симуляційні моделі здатні забезпечити контроль точності на рівні мікронів [36; 39; 53], що є критично важливим для високотехнологічних галузей: авіаційної, автомобільної та медичної промисловості [42]. Завдяки цьому підприємства отримують можливість скорочувати кількість пробних запусків [44], знижувати витрати на матеріали [42] та підвищувати якість кінцевої продукції [20].

У вітчизняних наукових школах також приділяється увага цьому напрямку [8]. Зокрема, у ХАІ симуляційні моделі застосовуються для аналізу процесів виготовлення авіаційної техніки [8], що дозволяє підвищувати точність та надійність конструкцій [8]. У КПІ вони використовуються як складова освітнього процесу для підготовки фахівців з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій [8]. У ЗНУ симуляційні моделі розглядаються як частина методології

впровадження концепції Industry 4.0 [8], що сприяє цифровій трансформації промисловості [30].

Симуляційні моделі у CAD/CAM системах виконують роль інструменту [14; 18; 20], який поєднує наукове прогнозування з практичними потребами виробництва [42]. Вони забезпечують точність [44] та економічну ефективність процесів [42], інтегруються у цифрові двійники [23; 25; 33; 36; 39; 53; 55] та стають невід’ємною складовою «розумного виробництва» [28; 29; 30], формуючи основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем автоматизації [46].

Сучасна концепція «розумного виробництва» передбачає перехід від традиційних автоматизованих рішень до інтелектуальних систем, здатних самостійно аналізувати дані, приймати рішення та адаптуватися до змін середовища [28; 29; 30]. У світовій науковій літературі (Springer, Elsevier, IEEE) підкреслюється, що до 2030 року ключовими напрямками розвитку стануть інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання у виробничі процеси [46], створення кіберфізичних систем [30], цифрових двійників [23; 25; 33; 36; 39; 53; 55], широке впровадження роботизації виробництва [42] та використання Інтернету речей (IoT) разом із Edge Computing [28; 29; 30]. Ці технології формують основу для самоорганізованих виробничих систем, здатних забезпечувати масову персоналізацію продукції без втрати економічної ефективності [36; 39].

У глобальному вимірі такі рішення вже реалізуються у «розумних фабриках» Німеччини, Японії, США та Південної Кореї [42], де виробничі лінії інтегровані у єдине цифрове середовище [30; 32], а контроль якості здійснюється у реальному часі [41]. Це свідчить про формування нової моделі промисловості, де ключову роль відіграє не лише технічна точність, а й інтелектуальна гнучкість систем [53; 55]. Перспективи розвитку інтелектуальних систем автоматизації у світі визначаються переходом до самоорганізованих «розумних фабрик» [42], де

ключову роль відіграють AI [46], робототехніка [42], IoT [28; 29; 30] та кіберфізичні системи [30]. В Україні ці тенденції знаходять відображення у наукових дослідженнях та освітніх програмах провідних університетів [8], що створює основу для інтеграції інтелектуальних систем у промисловість та підготовки фахівців нового покоління [8].

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз показав, що CAD/CAM системи є фундаментальним елементом концепції Industry 4.0 [28; 29; 30], яка передбачає цифровізацію всіх етапів виробничого процесу. Їх застосування забезпечує створення цифрових двійників виробів та процесів [23; 25; 33; 36; 39; 53; 55], що дозволяє здійснювати моделювання та прогнозування результатів ще до запуску реального виробництва [36; 39], знижуючи ризики та витрати [42].

У світовій науковій літературі (Springer, IEEE, Elsevier) наголошується на важливості інтеграції CAD/CAM із мережевими технологіями [2; 7], PLM-системами [30] та хмарними платформами [32; 41], що створює єдине цифрове середовище для управління життєвим циклом виробу [30; 32]. Це забезпечує гнучкість виробництва [28; 29], прозорість процесів [41] та ефективне використання ресурсів [42].

Світові перспективи розвитку інтелектуальних систем автоматизації визначаються переходом до самоорганізованих «розумних фабрик» [42], де ключову роль відіграють штучний інтелект [46], робототехніка [42], IoT [28; 29; 30] та кіберфізичні системи [30]. В Україні ці тенденції знаходять відображення у наукових дослідженнях та освітніх програмах [8], що створює основу для інтеграції інтелектуальних систем у промисловість та підготовки фахівців нового покоління [8].

РОЗДІЛ 2. АРХІТЕКТУРА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ CAD/CAM СИСТЕМ

2.1 Інтеграція CAD/CAM систем із верстатами з ЧПК

У сучасних умовах цифрової трансформації виробництва архітектура CAD/CAM систем розглядається як ключовий інструмент автоматизації програмування для верстатів з ЧПК [7; 10]. Вона побудована на принципі інтеграції конструкторських і технологічних модулів, що забезпечує перетворення інформації про деталь у готову керуючу програму [4; 11]. Такий підхід дозволяє скоротити виробничі цикли, підвищити точність оброблення та забезпечити адаптивність виробництва до змінних умов [9; 23].

Основними складовими архітектури є CAD-модуль, що відповідає за створення тривимірної моделі деталі [7]; CAM-модуль, який забезпечує автоматизоване формування технологічних маршрутів, вибір інструментів та режимів різання [10]; модуль симуляції, що дозволяє віртуально відтворити процес оброблення та виявити похибки ще до запуску програми на верстаті [19]; а також база даних технологічних параметрів, яка накопичує інформацію про матеріали, інструменти та режими оброблення, забезпечуючи стандартизацію та повторне використання знань [6; 22].

Функціональні можливості CAD/CAM систем у контексті автоматизації програмування ЧПК охоплюють автоматизовану генерацію програм на основі 3D-моделі без необхідності ручного кодування [12], оптимізацію технологічних процесів з урахуванням продуктивності, точності та ресурсозатратності [24], інтеграцію з ЧПК для прямої передачі програм на верстат [2; 13], а також підтримку концепції Industry 4.0, включно з цифровими двійниками та інтелектуальними системами управління [28; 33; 40].

Таким чином, архітектура CAD/CAM систем виступає не лише інструментом створення моделей і програм, а й формує інтегроване середовище, яке забезпечує підприємствам конкурентоспроможність у складних економічних умовах. Її функціональні можливості дозволяють поєднати інноваційні технології з практичними потребами виробництва, що робить CAD/CAM системи стратегічним чинником розвитку машинобудівної галузі України [9; 27; 42].

Інтеграція CAD/CAM систем із верстатами з числовим програмним керуванням (ЧПК) є одним із ключових напрямів розвитку сучасного машинобудування [2; 7]. Вона забезпечує безперервний інформаційний потік від етапу конструювання до безпосереднього виконання технологічних операцій, що дозволяє скоротити час підготовки виробництва та мінімізувати ймовірність помилок [10; 13].

Технічна реалізація інтеграції ґрунтується на використанні стандартів обміну даними, зокрема ISO 14649 (STEP-NC), який забезпечує передачу не лише геометричної інформації, а й технологічних параметрів [21; 36]. Це дає змогу уникнути ручного редагування програм та забезпечує їхню сумісність із різними типами обладнання [31; 47].

Важливим аспектом інтеграції є застосування цифрових двійників виробничих процесів, що дозволяє здійснювати симуляцію та прогнозування результатів оброблення ще до запуску програми на верстаті [23; 33; 40]. Такий підхід відповідає концепції Industry 4.0, де інтеграція CAD/CAM і ЧПК розглядається як елемент кіберфізичних систем виробництва [28; 42]. Наприклад, у середовищі Mastercam створюється тривимірна модель деталі, після чого САМ-модуль автоматично генерує керуючу програму у форматі G-code. Програма передається на верстат з ЧПК через систему DNC-зв'язку, що дозволяє уникнути ручного переписування коду. Перед запуском здійснюється симуляція процесу оброблення, яка виявляє можливі зіткнення інструмента з деталлю чи

оснащенням. У результаті виробничий цикл скорочується на 25-30 % порівняно з традиційним ручним програмуванням [9; 24].

Таким чином, інтеграція CAD/CAM систем із верстатами з ЧПК формує основу для інтелектуального виробництва, де конструкторські рішення безпосередньо трансформуються у технологічні процеси. Це не лише підвищує ефективність виробництва, але й створює передумови для впровадження інноваційних підходів у машинобудівній галузі України [7; 27; 45].

2.2 Методи автоматизованого програмування

Автоматизоване програмування у CAD/CAM системах ґрунтується на комплексі методів, які забезпечують перетворення конструкторської моделі у готову керуючу програму для верстата з ЧПК. Кожен із цих методів виконує специфічну функцію, але у взаємодії вони формують цілісну технологічну систему.

Першим етапом є генерація траєкторій інструмента. На основі тривимірної моделі деталі система автоматично визначає оптимальні шляхи руху інструмента, враховуючи геометрію поверхонь, тип операції та вимоги до точності [7; 11]. Це дозволяє уникнути ручного кодування та забезпечує повторюваність процесу. Далі застосовується автоматичний вибір режимів різання. Система використовує вбудовані бібліотеки матеріалів та інструментів, щоб підібрати швидкість обертання шпинделя, подачу та глибину різання [19]. Такий підхід мінімізує похибки, пов'язані з людським фактором, і водночас підвищує продуктивність.

Важливим елементом є симуляція процесу оброблення. У віртуальному середовищі CAD/CAM система відтворює роботу інструмента, що дозволяє перевірити коректність програми ще до її запуску на верстаті [23]. Симуляція

допомагає виявити потенційні зіткнення, перевірити точність траєкторій та оцінити час виконання операцій.

Завершальним етапом виступає оптимізація технологічних маршрутів. Алгоритми системи аналізують різні варіанти оброблення та пропонують найбільш ефективний, з мінімальними витратами часу та ресурсів [24]. Це забезпечує економічність виробництва та підвищує його конкурентоспроможність. Так, у середовищі SolidCAM інженер створює тривимірну модель деталі, після чого система автоматично генерує траєкторії руху інструмента для операцій фрезерування. На основі бібліотеки інструментів SolidCAM самостійно підбирає режими різання, формує G-code та проводить симуляцію процесу. У ході симуляції виявляється можливе зіткнення з кріпленням, і система коригує траєкторію. У результаті програма готова до передачі на верстат без ручного редагування, а час підготовки скорочується майже удвічі [12; 19; 24].

Методи автоматизованого програмування у CAD/CAM системах поєднують алгоритмічну точність із практичною гнучкістю. Вони дозволяють підприємствам підвищувати ефективність виробництва, зменшувати ризики та забезпечувати стабільність технологічних процесів навіть у кризових умовах [9; 27; 42].

У практиці машинобудування паралельно застосовуються два підходи до створення керуючих програм для верстатів з ЧПК – ручне та автоматизоване програмування. Кожен із них має свої переваги та недоліки, що визначають сферу його застосування. Ручне програмування характеризується такими перевагами: забезпечує гнучкість у створенні програм, дозволяє оператору швидко вносити зміни безпосередньо на робочому місці та не потребує складних програмних середовищ [7; 10]. Цей метод є ефективним для простих операцій або невеликих партій деталей, де автоматизація не дає значної вигоди. Водночас недоліками ручного програмування є висока ймовірність помилок, значна залежність від

кваліфікації оператора, складність у програмуванні деталей зі складною геометрією та значні витрати часу на написання і перевірку коду [19; 23].

Автоматизоване програмування у CAD/CAM системах має інші характеристики. Його перевагами є висока точність та повторюваність процесів, значне скорочення часу підготовки виробництва, зменшення кількості помилок завдяки симуляції та автоматичному вибору режимів різання [11; 24]. Автоматизоване програмування особливо ефективно для складних деталей та серійного виробництва, де потрібна оптимізація технологічних маршрутів і інтеграція з концепцією Industry 4.0 [33; 40]. Недоліками цього методу є висока вартість програмного забезпечення та обладнання, необхідність навчання персоналу та залежність від технічної інфраструктури підприємства [9; 27]. У випадку технічних збоїв або несумісності форматів виникають ризики затримок у виробництві. Наприклад, при створенні програми для корпусної деталі вручну оператор витрачає 6-8 годин, тоді як у середовищі Siemens NX або SolidCAM програма генерується автоматично за 2-3 години, включно з симуляцією. При цьому точність оброблення підвищується, а ймовірність помилок знижується майже на 70 % [12; 19; 24]. Ручне програмування залишається актуальним для простих завдань та індивідуальних налаштувань, тоді як автоматизоване програмування є стратегічно важливим для сучасного машинобудування. Поєднання цих двох підходів дозволяє підприємствам зберігати гнучкість і водночас використовувати переваги цифрової трансформації виробництва [42].

2.3 Обмеження та проблеми впровадження CAD/CAM у виробництво

Впровадження CAD/CAM систем у виробничі процеси розглядається як один із ключових напрямів цифрової трансформації машинобудування. Ці технології забезпечують скорочення часу підготовки виробництва, підвищення

точності оброблення, зменшення кількості помилок завдяки автоматизації та симуляції, а також створюють умови для інтеграції з концепцією Industry 4.0, де виробничі процеси стають частиною кіберфізичних систем. Саме тому CAD/CAM системи вважаються стратегічно важливими для підвищення конкурентоспроможності підприємств навіть у кризових економічних умовах [7; 10; 28; 33; 40]. Однак поряд із перевагами існують і суттєві проблеми, які обмежують ефективність їхнього впровадження. Насамперед це висока вартість програмного забезпечення та обладнання, що робить технологію малодоступною для малих і середніх підприємств [9; 27]. Другою проблемою є необхідність навчання персоналу, адже ефективне використання CAD/CAM систем потребує спеціальних знань і навичок, які не завжди можна швидко здобути [19; 23]. Важливим бар'єром виступає також сумісність форматів та інтеграція з уже існуючими виробничими системами: у багатьох випадках це призводить до затримок у запуску програмного забезпечення та потребує додаткових налаштувань [21; 36]. Нарешті, технічні збої або помилки у програмному забезпеченні здатні спричинити серйозні наслідки для виробництва, включно з простоям обладнання та фінансовими втратами [42].

Впровадження CAD/CAM систем у виробництво є складним і багатогранним процесом. Воно потребує фінансових інвестицій, технічної підтримки та підготовки персоналу, але водночас відкриває шлях до підвищення ефективності, точності та інноваційного розвитку машинобудівних підприємств України [27; 42].

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проаналізовано архітектуру та функціональні можливості CAD/CAM систем, їхню інтеграцію з верстатами з ЧПК, методи

автоматизованого програмування, а також здійснено порівняння ручного та автоматизованого підходів. Дослідження підтвердило, що CAD/CAM технології забезпечують якісно новий рівень автоматизації виробничих процесів, дозволяючи скоротити час підготовки програм, підвищити точність обробки та мінімізувати вплив людського фактора.

Методи автоматизованого програмування поєднують алгоритмічну точність із практичною гнучкістю, що робить їх ефективними для створення програм навіть для деталей зі складною геометрією. Порівняння ручного та автоматизованого програмування показало, що останнє має значні переваги у серійному виробництві та складних технологічних процесах, тоді як ручне програмування залишається актуальним для простих операцій та індивідуальних налаштувань. Водночас впровадження CAD/CAM систем супроводжується низкою проблем: високою вартістю програмного забезпечення та обладнання, потребою у навчанні персоналу, труднощами інтеграції з існуючими виробничими системами та ризиками технічних збоїв. Проте подолання цих бар'єрів відкриває шлях до підвищення ефективності та інноваційного розвитку машинобудівних підприємств України.

Перспективи розвитку CAD/CAM технологій пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту, машинного навчання, цифрових двійників та хмарних сервісів, що дозволить створювати самонавчальні та адаптивні системи програмування. У майбутньому CAD/CAM стане невід'ємною складовою концепції Industry 4.0, забезпечуючи формування «розумного виробництва», де ключову роль відіграватиме не лише технічна точність, а й інтелектуальна гнучкість систем. CAD/CAM системи є ключовим інструментом сучасного виробництва, який забезпечує перехід від традиційних методів програмування до інтегрованих цифрових технологій, формуючи основу для подальшого розвитку промисловості України та світу.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Моделювання елементів ліфтової тягової машини

Сучасні системи автоматизованого проектування відіграють важливу роль у розробленні та вдосконаленні ліфтового обладнання. Використання тривимірного моделювання дає змогу створювати точні цифрові моделі вузлів і деталей, виконувати перевірку їхньої конструкції, оцінювати взаємодію елементів у складі механізму та скорочувати витрати часу на проектування й підготовку виробництва.

Ліфтова тягова машина є одним із ключових вузлів ліфтової установки, від надійності та ефективності якого залежить безпечне функціонування всієї підйомної системи. До її складу входять канатотяговий шків, вал, корпусні деталі, елементи кріплення та інші конструктивні компоненти, що забезпечують передачу механічної енергії для переміщення кабіни ліфта і противаги.

У цьому розділі виконано моделювання основних елементів ліфтової тягової машини із застосуванням сучасної CAD-системи. Розглянуто процес побудови параметричних тривимірних моделей деталей, особливості формування їхньої геометрії та підготовки до подальшого складання у єдину конструкцію. Отримані моделі можуть бути використані для створення складального вузла, підготовки конструкторської документації, проведення інженерного аналізу та подальшої технологічної підготовки виробництва.

Тягова машина є «серцем» ліфта, оскільки саме вона створює рух кабіни. Її робота базується на взаємодії трьох основних елементів: електродвигун створює обертальний рух; канатотяговий шків передає цей рух тяговим канатам; тягові канати з'єднують кабіну ліфта та противагу. Коли двигун обертає шків, між канатами та канавками шківа виникає сила тертя. Завдяки цьому канати переміщуються разом зі шківом: одна сторона піднімає кабіну, а інша опускає

противагу або навпаки. Використання противаги значно зменшує навантаження на двигун, оскільки йому потрібно переміщувати лише різницю між масою кабіни з вантажем і масою противаги.

Безредукторна конструкція має низку переваг, а саме, вищий коефіцієнт корисної дії; менше механічних втрат; нижчий рівень шуму та вібрацій; менші витрати на технічне обслуговування; можливість забезпечення плавного руху ліфта. Саме тому безредукторні тягові машини широко застосовуються в сучасних пасажирських та вантажних ліфтах, особливо у висотних будівлях.

Тягова машина є основним виконавчим механізмом електричного пасажирського або вантажного ліфта. Вона призначена для перетворення електричної енергії на механічну роботу, що забезпечує переміщення кабіни та противаги по напрямних ліфтової шахти. На рисунку 3.1 представлено сучасну безредукторну тягову машину з канатотяговим шківом. Такий пристрій встановлюється у верхній частині ліфтової шахти. Основним елементом тягової машини є канатотяговий шків (рисунок 3.1, поз. 1), виконаний у вигляді колеса з кількома канавками для розміщення тягових канатів (рисунок 3.1, поз. 2).

Канати огинають шків і з'єднують кабіну ліфта з противагою. Передача тягового зусилля здійснюється завдяки силам тертя між поверхнею канавок шківа та канатами. На відміну від барабанних підйомних механізмів, канати не намотуються на шків, а лише охоплюють його під певним кутом. Це забезпечує багаторазове використання канатів і дає змогу обслуговувати ліфти з великою висотою підйому.

Конструктивно тягова машина складається з електродвигуна, канатотягового шківа, гальмівного пристрою, датчиків контролю швидкості та положення, підшипникових опор і силового кронштейна (рисунок 3.1, поз. 3).

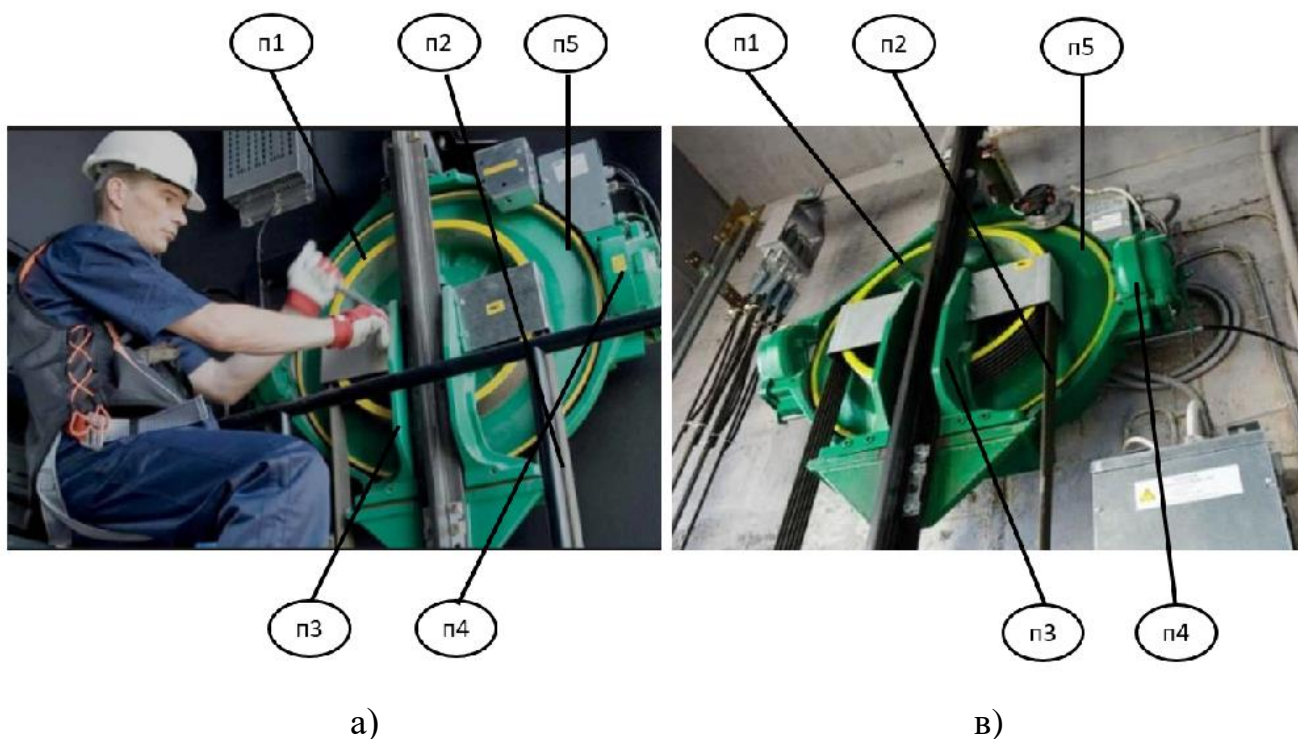


Рисунок 3.1 – Вузол тягової ліфтової машини: а) налаштування керування; в) конструкція пристрою.

У розглянутій конструкції використовується безредукторний привід, у якому шків безпосередньо встановлений на валу електродвигуна. Відсутність механічного редуктора дає змогу зменшити кількість рухомих деталей, підвищити коефіцієнт корисної дії та знизити рівень шуму під час роботи ліфта.

Керування швидкістю здійснюється за допомогою частотного перетворювача, який забезпечує плавний розгін і гальмування кабіни, підвищуючи комфорт пасажирів та зменшуючи динамічні навантаження на механічні елементи системи. Сучасні частотні перетворювачі дають змогу підтримувати високу точність позиціонування кабіни відносно рівня поверху.

Тягова машина є центральним елементом ліфтової установки, оскільки саме вона забезпечує створення тягового зусилля для переміщення кабіни та противаги. Кожен її конструктивний елемент виконує певну функцію. Так електродвигун є джерелом механічної енергії та створює обертальний рух. Канотяговий шків

передає обертальний момент на тягові канати, забезпечуючи рух кабіни ліфта. Гальмівний пристрій утримує кабіну в нерухомому стані під час зупинки та виконує аварійне гальмування у разі виникнення несправностей. Датчики швидкості та положення контролюють роботу приводу та забезпечують точне визначення місцезнаходження кабіни. Підшипникові опори підтримують вал і зменшують втрати на тертя під час обертання. Силовий кронштейн або несуча рама сприймає механічні навантаження та забезпечує надійне кріплення всіх вузлів.

Застосування безредукторного приводу є характерною особливістю сучасних ліфтових систем. У традиційних ліфтах між двигуном і шківом встановлювався редуктор, який знижував швидкість обертання та збільшував крутний момент. Проте редуктор містить значну кількість зубчастих передач, які створюють додаткові втрати енергії, шум і потребують регулярного технічного обслуговування. У безредукторних системах шків жорстко з'єднується з валом електродвигуна, що забезпечує підвищення енергоефективності приводу; зменшення механічних втрат; зниження рівня шуму та вібрацій; підвищення надійності обладнання; зменшення витрат на обслуговування.

Важливу роль у роботі сучасного ліфта відіграє частотний перетворювач, який змінює частоту та напругу живлення електродвигуна. Завдяки цьому швидкість обертання двигуна регулюється плавно, без ривків і ударних навантажень. Це дозволяє забезпечити комфортний рух кабіни для пасажирів, зменшити зношування механічних вузлів та підвищити довговічність обладнання.

Крім того, використання системи частотного керування разом із датчиками зворотного зв'язку забезпечує високу точність зупинки кабіни на рівні поверху, що є однією з основних вимог до сучасних пасажирських ліфтів. Така система гарантує безпечну посадку та висадку пасажирів, а також підвищує загальну якість роботи ліфтової установки.

Важливим елементом конструкції тягової машини є електромагнітне гальмо (рисунок 3.1, поз. 4), яке виконує функцію утримання кабіни ліфта в нерухомому стані під час зупинок та забезпечує безпечну експлуатацію підйомної системи.

У штатному режимі роботи ліфта гальмо перебуває в розгальмованому стані завдяки подачі напруги на електромагніт. Під дією магнітного поля якір гальма притягується до магнітопроводу, унаслідок чого гальмівні колодки відводяться від гальмівного диска і не перешкоджають обертанню вала приводу. Це дозволяє електродвигуну вільно обертати канатотяговий шків і забезпечувати переміщення кабіни та противаги.

У разі відключення живлення, аварійної зупинки або виникнення несправності електромагніт втрачає живлення, після чого пружини автоматично притискають гальмівні елементи до гальмівного диска (рисунок 3.1, поз. 5). У результаті вал приводу блокується, що запобігає самовільному руху кабіни під дією сили тяжіння або нерівномірного навантаження. Такий принцип роботи належить до категорії нормально замкнених гальм, які спрацьовують автоматично при втраті електроживлення, що значно підвищує безпеку експлуатації ліфта.

У розглянутій конструкції приводу гальмівний диск конструктивно об'єднаний із канатотяговим шківом в єдиний нерознімний вузол. Таке технічне рішення дозволяє зменшити кількість окремих деталей та з'єднань, усунути можливість виникнення люфтів між шківом і гальмівним диском, а також підвищити жорсткість і точність роботи механізму. Крім того, інтеграція цих елементів сприяє зменшенню масогабаритних характеристик приводу, спрощує його монтаж і технічне обслуговування.

Поєднання канатотягового шківа та гальмівного диска в єдину конструкцію забезпечує більш надійну передачу крутного моменту, підвищує довговічність вузла та загальну надійність ліфтової установки. Саме тому подібні конструктивні рішення широко застосовуються в сучасних безредукторних ліфтових приводах,

де особливі вимоги висуваються до безпеки, енергоефективності та експлуатаційної надійності обладнання.

Силовий кронштейн (рисунок 3.1, п.3) здійснює об'єднання описаних деталей в єдиний механізм із забезпеченням необхідної точності розташування шківів, його осі та приводного двигуна відносно один одного. До конструкції цього кронштейна висуваються високі вимоги щодо жорсткості та міцності, оскільки вся вага системи ліфта передається на його базові поверхні.

Для реалізації практичного дослідження було обрано деталь типу «кронштейн», яка має складну геометрію з отворами та ребрами жорсткості. Така деталь є показовою для оцінки можливостей CAD/CAM систем, оскільки потребує високої точності моделювання та оптимізації траєкторій інструментів, а також часто використовується у машинобудуванні. (Цей вибір обґрунтовано тим, що подібні деталі дозволяють комплексно оцінити ефективність автоматизованого проєктування та підготовки керуючих програм для обробки на верстатах з ЧПК.)

3.2 Етапи створення 3D-моделі деталі

Створення 3D-моделі деталі є одним із ключових етапів сучасного інженерного проєктування, який забезпечує перехід від ескізних ідей до повноцінного цифрового представлення виробу. Використання CAD-систем дозволяє не лише візуалізувати геометрію деталі, але й виконувати її параметричне моделювання, перевірку конструктивних рішень та підготовку до подальшого виробництва.

У даному розділі розглядається послідовність побудови 3D-моделі деталі з урахуванням її конструктивних особливостей та вимог до точності виготовлення. Описано основні етапи формування геометрії, вибір базових ескізів, операції моделювання (витягування, вирізання, обертання тощо), а також застосування

допоміжних елементів, таких як фаски та скруглення. Особливу увагу приділено принципам раціонального побудування моделі, які дозволяють забезпечити її коректність, параметричну керованість та придатність для подальшого використання в САМ-середовищі для генерації керуючих програм ЧПК-обладнання. Моделювання кронштейна покажемо в контексті його застосування в конструкції тягової ліфтової машини, що дозволяє врахувати взаємне розташування і взаємодію всіх вузлів механізму та є критично важливим для забезпечення правильної роботи й відповідності конструкції експлуатаційним вимогам ліфтової системи. Для цього виконаємо створення складальної одиниці, що складається з основних, описаних вище елементів, які визначають функціональні обмеження конструкції кронштейна. На рисунку 3.2 показано таку складальну одиницю.

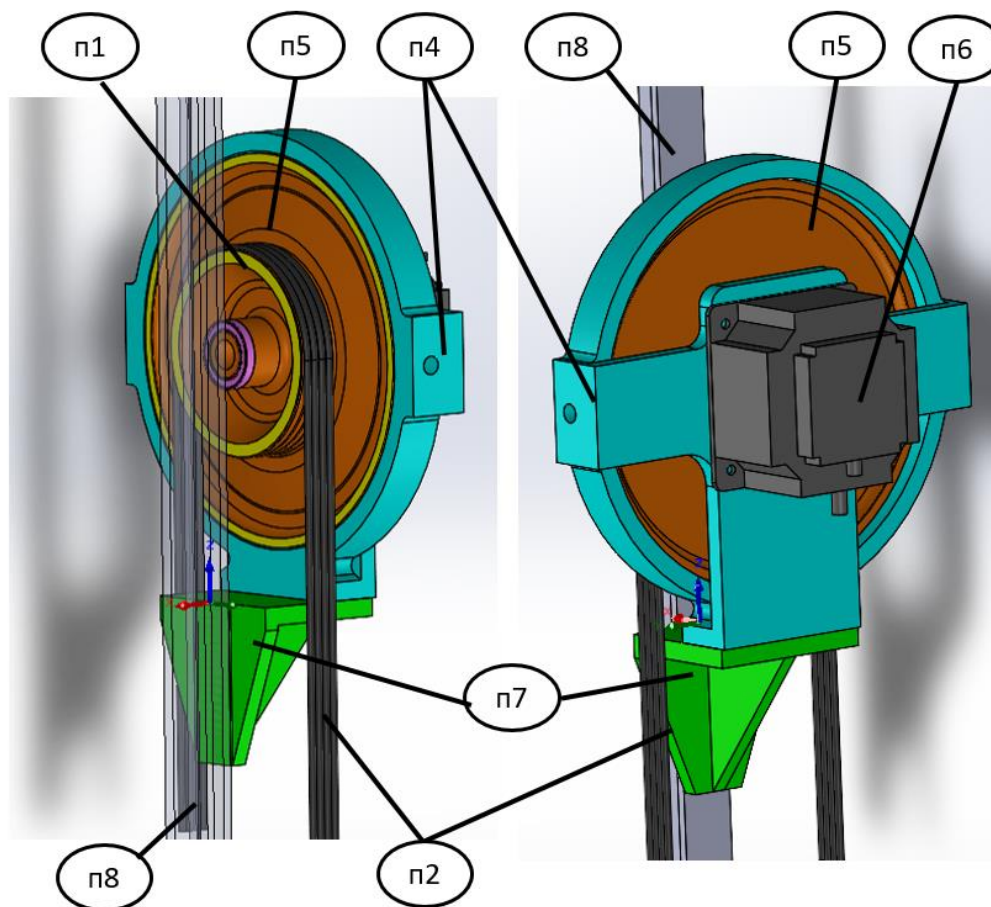


Рисунок 3.2 – Вузол тягової ліфтової машини

Шків (рисунок 3.2, п.1) виконаний із канавками для розташування 4-х тягових тросів (рисунок 3.2, п.2). Основний корпус (рисунок 3.2, п.4) тягової машини виконаний як комплексна лита деталь. У його конструкції передбачено вузли, призначені для закріплення приводного електродвигуна (рисунок 3.2, п.6) та електричних гальм.

Диск гальма (рисунок 3.2, п.5) виконаний із діаметром зовнішньої поверхні, який у два рази перевищує зовнішній діаметр шківа. Таке співвідношення діаметрів функціональних поверхонь забезпечує суттєве зниження необхідної сили тертя на поверхні гальмівного диска та сприяє підвищенню надійності функціонування гальмівної системи ліфта. Основний корпус (рисунок 3.2, п.4) встановлюється на монтажний кронштейн (рисунок 3.2, п.7). У свою чергу, монтажний кронштейн встановлюється на неробочу поверхню напрямної рейки ліфта (рисунок 3.2, п.8). Така схема монтажу приводу тягової ліфтової машини відносно напрямних рейок забезпечує високу точність взаємного розташування елементів вантажопідіймальної системи. Схема забезпечує високу плавність і надійність роботи системи підйому ліфта. Однак це потребує застосування кронштейна складної конструкції.

Наведена схема компоновки дозволяє мінімізувати перекося та вібрації під час роботи ліфта, підвищує точність центрування шківа та гальмівного диска, а також забезпечує стабільність навантаження на опорні елементи конструкції.

Під час створення моделі кронштейна необхідно враховувати основні вимоги до його функціональних характеристик. Основною функцією проєктованого кронштейна є необхідність базування відносно стикової поверхні монтажної кронштейна (рисунок 3.2, Б1) та посадкової поверхні підшипникового вузла шківа (рисунок 3.2, Б2), що забезпечує точне взаємне позиціонування елементів і стабільність роботи всієї конструкції. При цьому необхідно

враховувати весь комплекс обмежень, що виникають внаслідок взаємодії з навколишніми деталями та впливу їх геометрії на можливості компоновання.

Наявність прямої рейки (рисунок 3.2, O1) обмежує можливість збільшення товщини кронштейна, оскільки надмірне збільшення габаритів може призвести до порушення монтажних зазорів і ускладнення роботи рухомих елементів. Геометрія шківів (рисунок 3.2, O2) обмежує можливість розвитку перерізу кронштейна у відповідному напрямку, що пояснюється необхідністю збереження безпечної відстані між обертовими частинами та опорними елементами. Аналогічне обмеження створюють тягові троси (рисунок 3.2, O3), які визначають критичні зони проходження вантажонесучих елементів. Тертя тросів об елементи конструкції категорично неприпустиме, оскільки може призводити до їх катастрофічного руйнування, втрати міцності та аварійних ситуацій. Геометричні параметри монтажного кронштейна (рисунок 3.2, O4) також накладають суттєві обмеження на розміри з'єднувальних поверхонь, визначаючи допустимі межі контакту та способи кріплення.

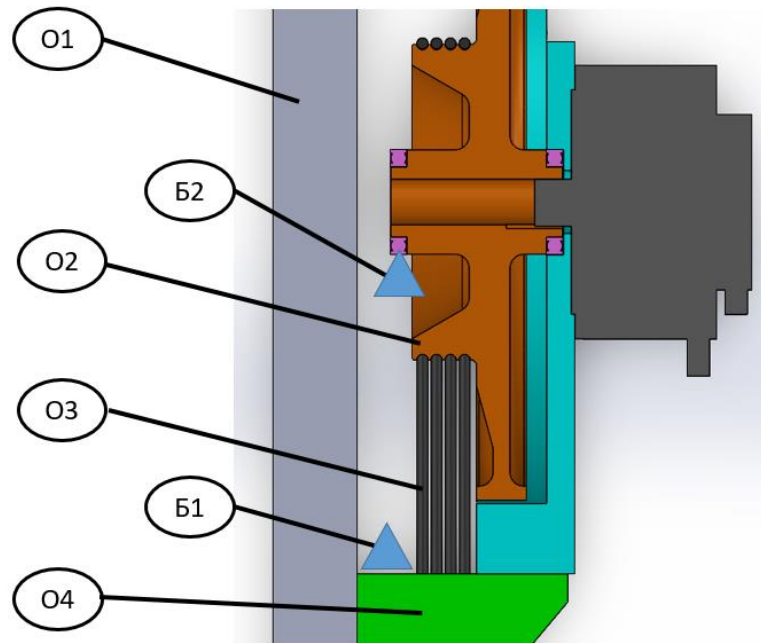


Рисунок 3.3 – Функціональні вимоги до конструкції кронштейна.

Конструкція кронштейна повинна забезпечувати точне базування та стабільне просторове позиціонування елементів тягового механізму відносно базових поверхонь монтажного кронштейна (Б1) та посадкової поверхні підшипникового вузла шківів (Б2), що визначає загальну точність взаємного розташування вузлів системи. Кронштейн виконує функцію силового проміжного елемента, який передає навантаження від тягової машини на напрямну рейку та забезпечує жорсткість усієї конструкції.

При проектуванні необхідно враховувати обмеження, що накладаються навколишніми елементами. Наявність напрямної рейки (О1) визначає граничні габарити кронштейна та обмежує можливість збільшення його товщини, оскільки необхідно зберігати монтажні зазори та забезпечувати безпечну роботу рухомих частин. Геометрія шківів (О2) формує просторові обмеження в зоні розташування кронштейна та не дозволяє надмірного розвитку його перерізу в напрямку обертючих елементів, що необхідно для уникнення механічних зіткнень.

Особливу увагу слід приділити зоні проходження тягових тросів (О3), оскільки будь-який контакт або тертя тросів об елементи кронштейна є неприпустимим через ризик їх пошкодження та втрати міцності, що може призвести до аварійних ситуацій. Додаткові конструктивні обмеження накладає монтажний кронштейн (О4), який визначає геометрію та розміри з'єднувальних поверхонь, а також спосіб і точність кріплення.

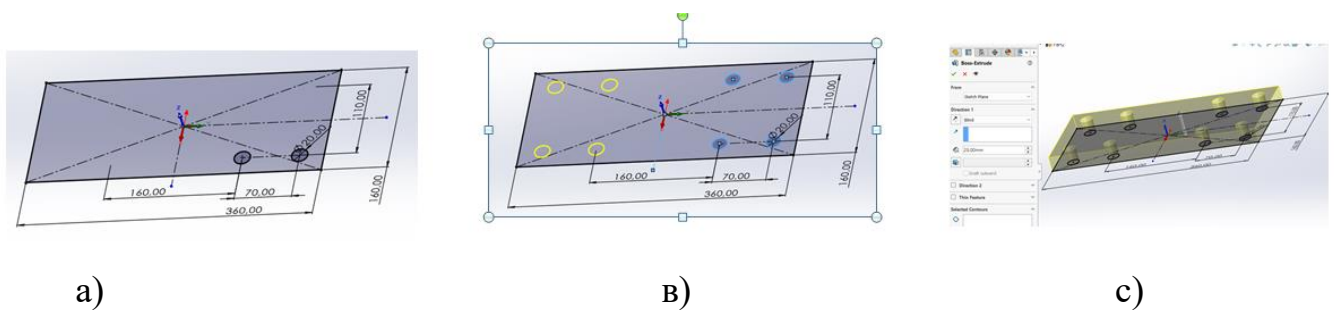


Рисунок 3.4 – Проектування базового елемента.

1 етап – створення базового ескізу (рисунок 3.4, а). На першому етапі виконується побудова 2D-ескізу базового елемента в CAD-системі. Формується контур деталі у вигляді похилої прямокутної пластини з заданими габаритними розмірами (зокрема довжина 360 мм та базові відстані 160 мм і 70 мм, як показано на кресленні). Ескіз будується відносно початку координат із застосуванням геометричних обмежень (паралельність, перпендикулярність, симетрія), що забезпечує його параметричну керованість.

2 етап – формування конструктивних елементів ескізу (рисунок 3.4, в). На наступному етапі в ескізі додаються допоміжні елементи – отвори, які визначаються як майбутні місця кріплення. Вони розташовуються відповідно до конструктивної логіки деталі та вимог до монтажу. На цьому етапі також виконується перевірка взаємного розташування отворів і дотримання мінімальних відстаней між ними для забезпечення міцності деталі.

3 етап – перехід до 3D-формування (рисунок 3.4, с). Після завершення ескізування виконується операція об'ємного формоутворення (Extrude/Витягування). Ескіз перетворюється у твердотільну модель шляхом задання товщини деталі. Далі формуються отвори методом вирізання (Cut Extrude), що забезпечує їх точну геометрію та відповідність монтажним вимогам.

На фінальному етапі виконується перевірка моделі на коректність побудови, відсутність геометричних конфліктів та відповідність заданим розмірам. За необхідності застосовуються операції редагування ескізу, що дозволяє швидко змінювати параметри без перебудови всієї моделі.

Процес проєктування силових ребер і врахування інших елементів складальної одиниці є важливим етапом конструювання деталей, оскільки він безпосередньо впливає на жорсткість, міцність і технологічність виробу.

Проєктування починається з аналізу навантажень, які діють на конструкцію. На цьому етапі визначаються основні силові потоки в деталі, зони концентрації

напружень, а також ділянки, що потребують додаткового підсилення. Саме в цих місцях доцільно передбачати силові ребра жорсткості. Їх розташування має відповідати напрямкам дії основних зусиль, щоб ефективно розподіляти навантаження та зменшувати деформації.

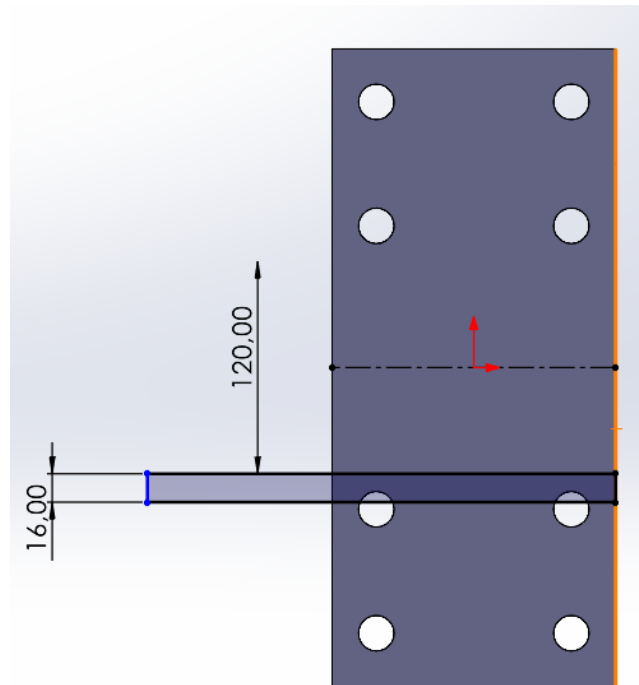


Рисунок 3.5 – CAD-модель (SolidWorks) складальної одиниці, що демонструє процес проєктування кріпильної пластини з силовим ребром (штифтом/валом).

Рисунок 3.5 ілюструє типову задачу: визначення положення силового елемента відносно кріпильних отворів пластини з урахуванням симетрії навантаження та геометричних обмежень складальної одиниці.

Далі виконується вибір геометричних параметрів ребер: товщини, висоти, довжини та форми переходів. Важливим є забезпечення плавного спряження ребер з основною стінкою деталі, оскільки різкі переходи можуть спричинити

концентрацію напружень і зниження міцності. Для цього застосовуються радіуси заокруглення та плавні фаски.

Паралельно враховуються інші елементи складальної одиниці, зокрема отвори, посадочні поверхні, ребра сусідніх деталей, кріпильні елементи та зони контакту. Їх розташування узгоджується з конструкцією ребер, щоб уникнути перетину силових потоків і забезпечити рівномірний розподіл навантаження. Також важливо враховувати можливість складання та доступ інструменту під час монтажу.

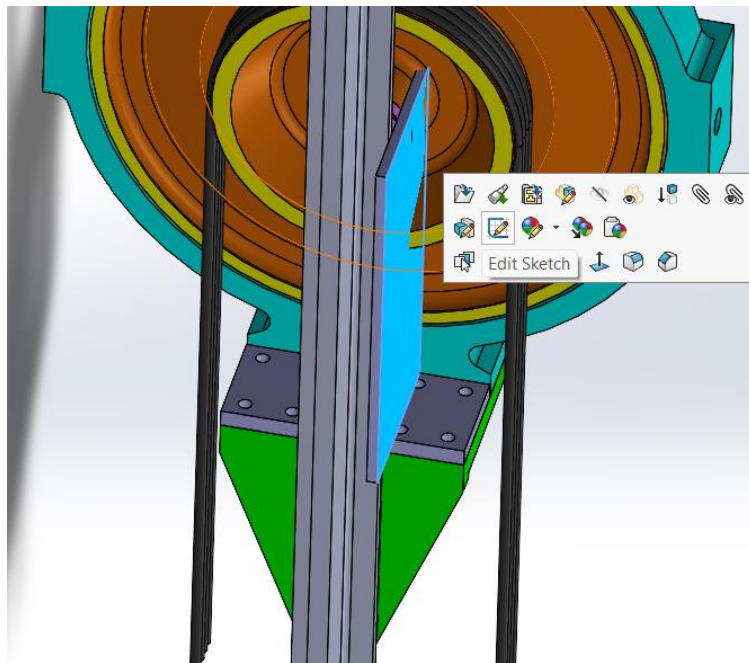


Рисунок 3.6 – 3D-модель складальної одиниці у SolidWorks на етапі проєктування силового ребра з активним режимом редагування ескізу (Edit Sketch)

Активне контекстне меню Edit Sketch та помаранчева лінія прив'язки свідчать про те, що конструктор редагує профіль ребра безпосередньо в контексті складання – тобто форма і розміри ребра узгоджуються в реальному часі з геометрією колони, пластини та конічного елемента. Це типова практика top-down проєктування у SolidWorks, коли силовий елемент адаптується до вже розміщених

деталей складальної одиниці, що мінімізує геометричні конфлікти та забезпечує коректну передачу навантажень між вузлами.

На наступному етапі виконується перевірка конструкції методами інженерного аналізу (наприклад, методом скінченних елементів), де оцінюється напружено-деформований стан деталі з урахуванням ребер і всіх елементів складальної одиниці. За результатами аналізу може здійснюватися коригування товщин ребер або їхнього розташування.

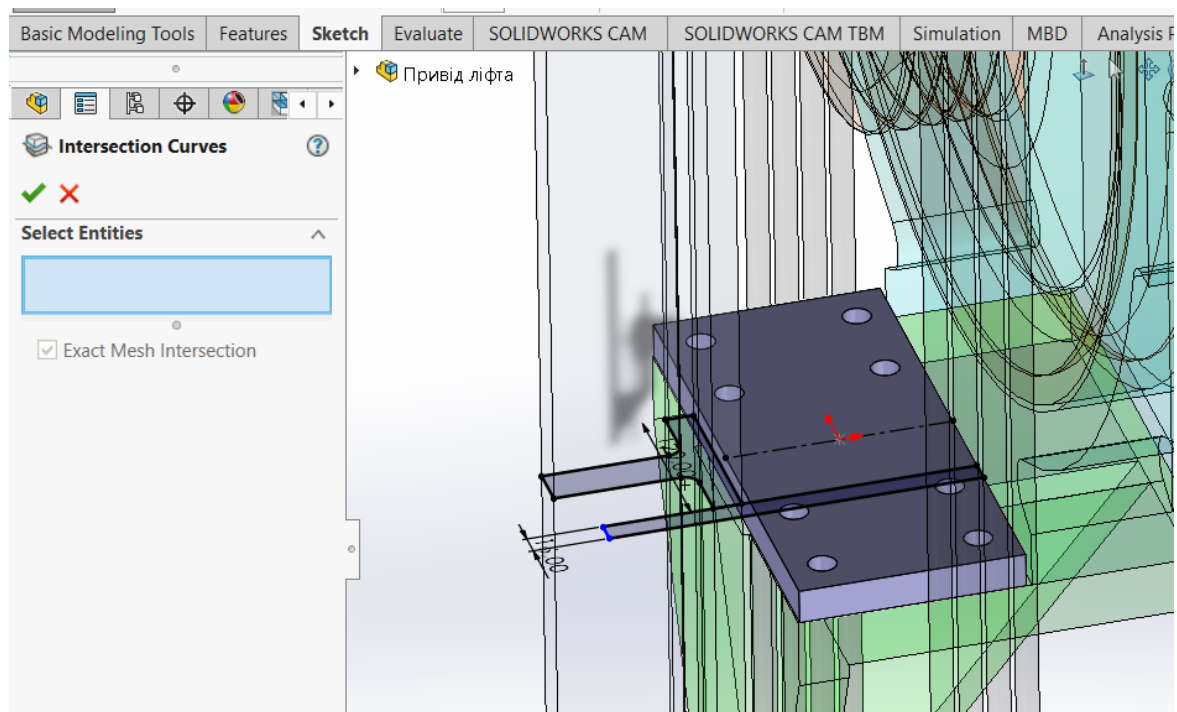


Рисунок 3.7 – SolidWorks у режимі роботи зі складанням «Привід ліфта» з активним інструментом Intersection Curves (Криві перетину) на вкладці Sketch.

Інструмент Intersection Curves автоматично будує криві на перетині обраних геометричних об'єктів (граней, площин, тіл). Використовується для отримання точного контуру перерізу складання в заданій площині. Опція Exact Mesh

Intersection увімкнена – забезпечує точне обчислення перетину без спрощень. Поле Select Entities порожнє – конструктор ще не обрав об'єкти для побудови кривої перетину. Застосування Intersection Curves у контексті складання «Привід ліфта» свідчить про те, що конструктор визначає точний контур перетину пластини або силового ребра з площиною чи суміжною деталлю – для подальшого використання цього контуру як основи ескізу нового елемента. Це характерний крок top-down проектування: геометрія нової деталі прив'язується до реальних перерізів уже існуючих компонентів складання, що гарантує геометричну узгодженість усіх вузлів приводу ліфта.

Завершальним етапом є узгодження конструкції з технологічними вимогами виробництва. Перевіряється можливість лиття, обробки або виготовлення деталі без ускладнень, пов'язаних із надмірною складністю ребер чи їх недоступністю для інструменту. У результаті правильно спроектовані силові ребра разом з урахуванням усіх елементів складальної одиниці забезпечують оптимальне співвідношення між міцністю, жорсткістю та технологічністю конструкції.

Проектування силових ребер з урахуванням геометрії інших деталей складальної одиниці представляє собою узгоджений процес, у якому ребра формуються не як ізольований елемент, а як частина єдиної просторової конструкції. Мета процесу проектування силових ребер – забезпечити жорсткість без конфлікту з сусідніми поверхнями, кріпленнями та функціональними зонами інших деталей.

Процес починається з аналізу просторової компоновки складальної одиниці. На цьому етапі визначається взаємне розташування деталей, характер їхнього контакту (жорсткий, ковзний, посадочний), а також напрямки передачі навантажень між елементами. Геометрія суміжних деталей задає базові обмеження

для розміщення ребер: заборонені зони, області руху, посадочні поверхні та місця кріплення.

Далі виконується побудова силової схеми деталі в складі вузла. Визначаються траєкторії передачі зусиль через контактні поверхні з іншими елементами. Ребра розташовують уздовж цих силових потоків, але з обов'язковим урахуванням геометрії суміжних деталей, щоб уникнути перетину з отворами, виступами, ребрами жорсткості інших елементів або зонами інструментального доступу.

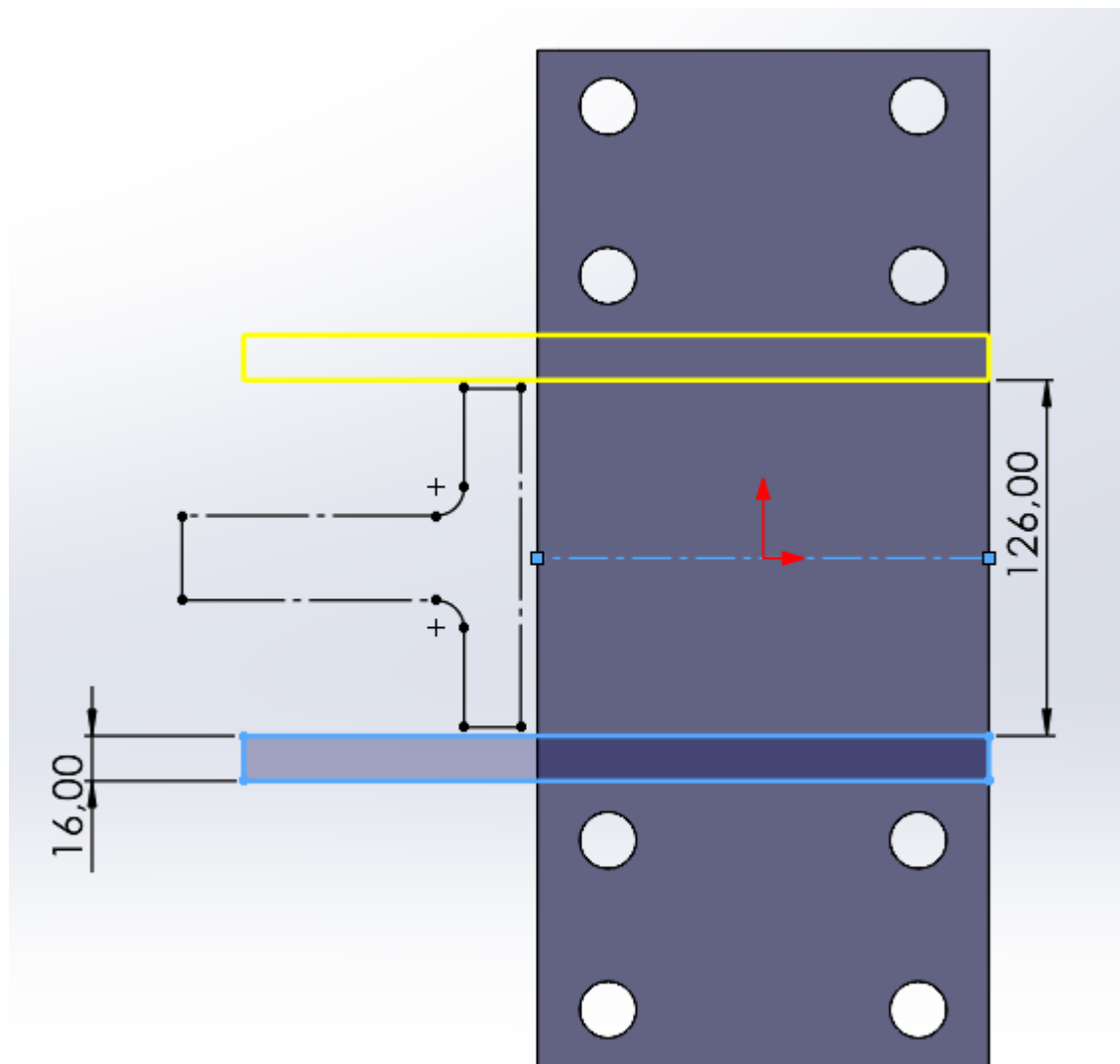


Рисунок 3.8 – Проектування ребер з урахуванням геометрії інших деталей

Особливу увагу приділяють узгодженню ребер із посадочними та базовими поверхнями. Якщо ребро перетинається або підходить надто близько до таких поверхонь, це може спричинити спотворення базування або порушення точності складання. Тому передбачають технологічні зазори, фаски або зміщення ребра від критичних зон.

На етапі геометричного проектування виконується тривимірне моделювання, де ребра формуються як елементи, що адаптуються до вже існуючої геометрії інших деталей. Використовуються операції булевого узгодження, перетину та обмеження об'ємів. При цьому ребра можуть мати змінну товщину або висоту залежно від локальних обмежень простору.

Окремо враховується вплив кріпильних елементів – болтів, гвинтів, штифтів. Ребра не повинні створювати перешкод для встановлення кріплення або доступу інструменту. У разі конфлікту геометрії виконується корекція форми ребра або зміщення його траєкторії.

Завершальним етапом є перевірка колізій та аналіз складання. Перевіряється, чи не перетинаються ребра з геометрією інших деталей при монтажі, чи забезпечений доступ для інструментів, а також чи не виникає локальних концентрацій напружень у місцях взаємодії. За потреби виконується оптимізація форми ребер з урахуванням як міцності, так і геометричних обмежень вузла. У результаті отримується узгоджена конструкція, в якій силові ребра інтегровані в загальну геометрію складальної одиниці та забезпечують необхідну жорсткість без порушення функціональності інших елементів.

Перенесення інформації про обмежуючі поверхні в проєкт контуру ребер є важливим етапом параметричного і геометрично узгодженого проектування, оскільки саме ці поверхні визначають допустимий простір формування ребра та запобігають конфліктам із іншими елементами конструкції.

Процес починається з ідентифікації обмежуючих поверхонь у складі 3D-моделі деталі або складальної одиниці. До них відносять посадочні площини, поверхні контакту з іншими деталями, поверхні рухомих елементів, а також технологічно заборонені зони (зони доступу інструмента, отвори, канали, кріпильні елементи). Ці поверхні фіксують просторові межі, в яких може бути розміщене ребро жорсткості.

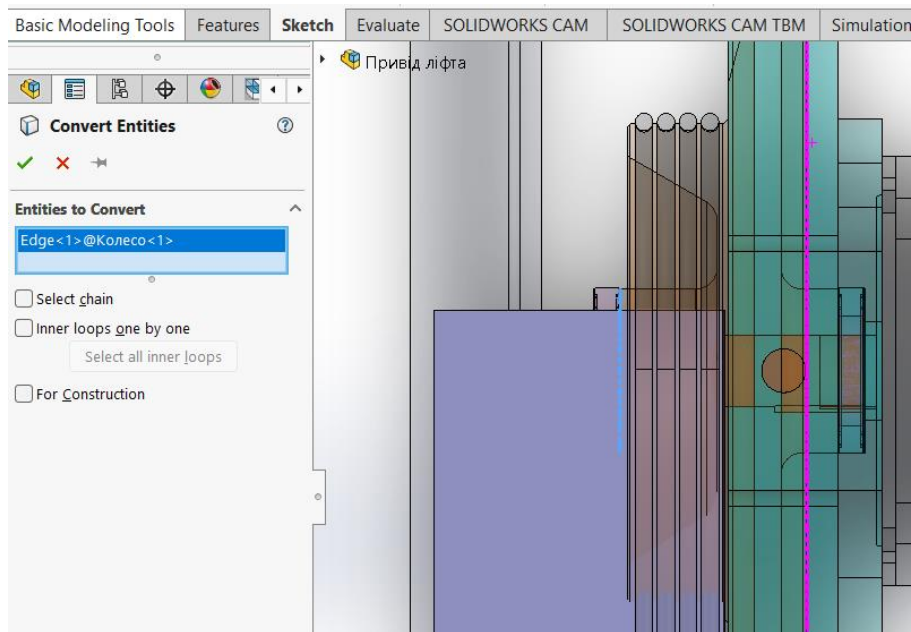


Рисунок 3.9 – SolidWorks у режимі ескізу складання «Привід ліфта» з активним інструментом Convert Entities (Перетворення об'єктів).

Інструмент Convert Entities – це ключовий інструмент перенесення геометричної інформації з існуючих деталей складання в поточний ескіз. Він проектує вибрані ребра, грані або криві суміжних компонентів на площину ескізу, створюючи точні прив'язані контури для подальшого моделювання. На рисунку 3.9 проілюстровано як конструктор переносить контур обмежуючої поверхні колеса безпосередньо в ескіз силового ребра.

Далі виконується їх формалізація у вигляді геометричних обмежень. У CAD-системі обмежуючі поверхні можуть задаватися як *reference geometry* (опорна геометрія), що використовується для побудови ескізів і керування параметрами елементів. На цьому етапі кожна поверхня отримує функціональне значення: заборона перетину, обмеження відстані, паралельність або дотичність. Після цього інформація про обмежуючі поверхні переноситься в проєкт контуру ребра через побудову ескізної площини або 3D-скетчу. Контур ребра формується як геометричний об'єкт, який «відштовхується» від цих поверхонь. Це реалізується через використання прив'язок (constraints): відстань до поверхні, проєкція, перетин із допустимими зонами або обрізання по межах обмеження.

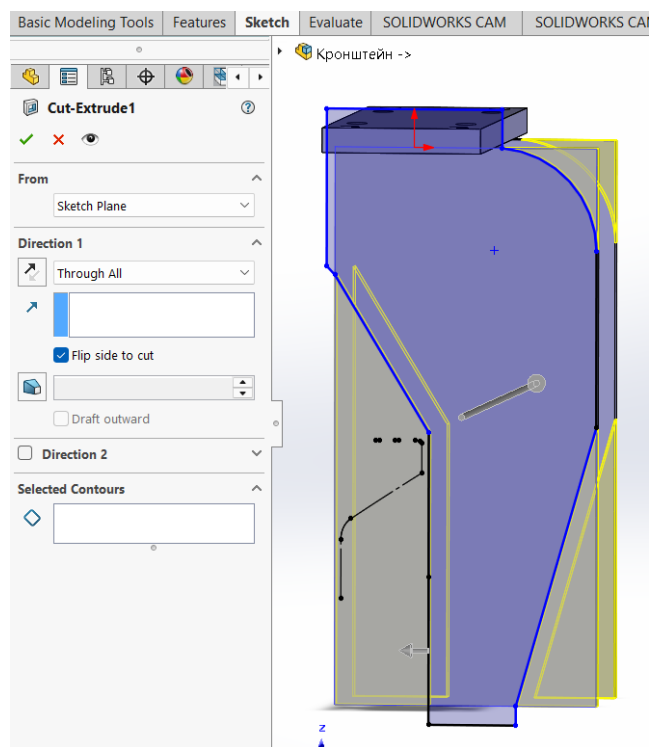


Рисунок 3.10 – SolidWorks у режимі редагування деталі «Кронштейн» з активною операцією Cut-Extrude1 (Вирізка витискуванням).

Операція Cut-Extrude Through All із прив'язкою до геометрії суміжних деталей (жовті контури) є типовим прийомом формування функціональних вирізів

кронштейна в контексті складання. Наскрізний виріз по складному контуру з увімкненим Flip side to cut свідчить про те, що конструктор формує зовнішній профіль або монтажний паз кронштейна, узгоджений із геометрією суміжних вузлів – зокрема, з обрисами елементів приводу ліфта, видимих на жовтих допоміжних лініях.

Особливо важливим є етап проєктування профілю ребра з урахуванням заборонених зон. Контур ребра автоматично або вручну коригується таким чином, щоб жодна його частина не входила в об'єм, визначений обмежувачими поверхнями. При цьому можуть застосовуватись операції відсікання (trim), зміщення (offset) або адаптивного масштабування профілю.

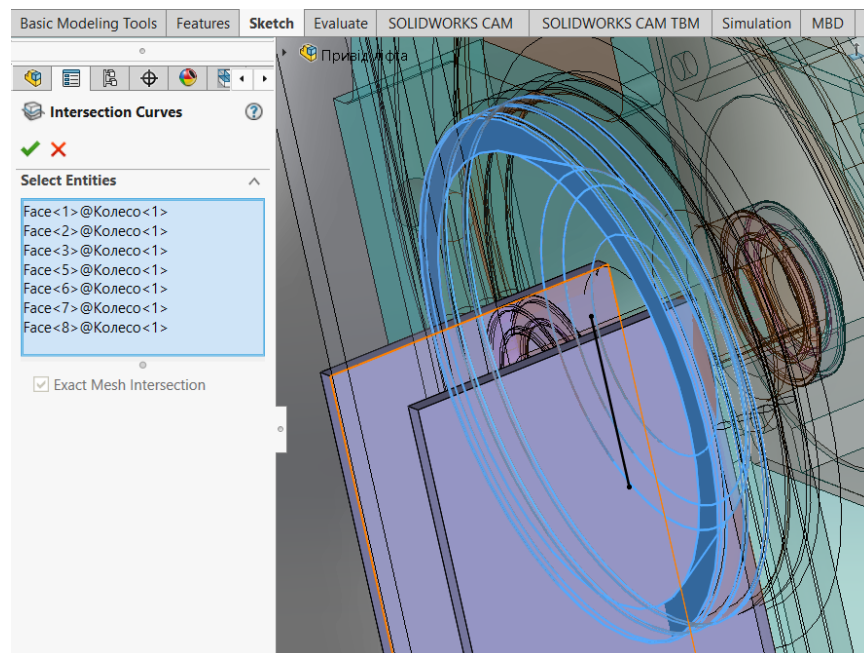


Рисунок 3.11 – SolidWorks у режимі складання «Привід ліфта» з активним інструментом Intersection Curves – побудова кривих перетину граней деталі «Колесо» з площиною ескізу

Конструктор одночасно проєктує всі функціональні поверхні колеса – зубці, ступицю, торцеві та циліндричні грані – на площину ескізу для отримання повного поперечного перерізу. Exact Mesh Intersection увімкнено – розрахунок ведеться з максимальною геометричною точністю. Отримані криві перетину є обмежувачами для проєктування силових ребер кронштейна. Конструктор визначає, яким граням колеса відповідають критичні зони навантаження, і будує профіль ребра так, щоб він не перетинав жодну з восьми граней колеса, точно повторював обмежувачий контур у зоні примикання, автоматично перебудовувався при зміні геометрії колеса завдяки параметричній прив'язці. Intersection Curves по восьми гранях – це повне знімання геометричної інформації з колеса для подальшого коректного вписування силових ребер у простір між колесом і корпусом приводу ліфта.

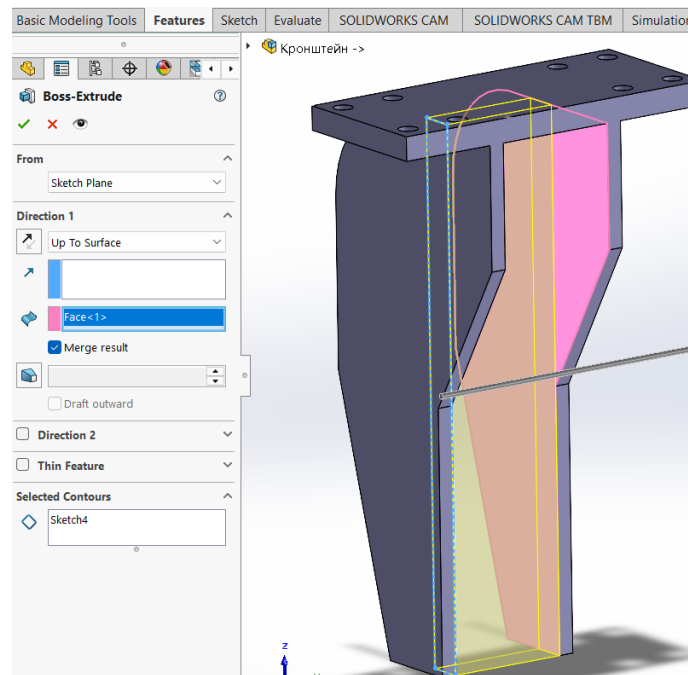


Рисунок 3.12 – SolidWorks у режимі редагування деталі «Кронштейн» з активною операцією Boss-Extrude (Витискування матеріалу) – безпосереднє формування силового ребра.

На рисунку 3.12 демонструється фінальний етап циклу проектування силового ребра: після знімання геометрії колеса (Intersection Curves), перенесення контурів (Convert Entities) та побудови профілю (Sketch4) – формується реальний об'єм ребра, параметрично прив'язаний до всіх обмежуючих поверхонь складальної одиниці «Привід ліфта».

Далі виконується інтеграція цих обмежень у параметричну модель. Це дозволяє при зміні положення або геометрії суміжних деталей автоматично перебудовувати контур ребра. Таким чином забезпечується асоціативність моделі та її стійкість до змін у складальній одиниці.

На завершальному етапі виконується перевірка коректності перенесення обмежень: аналізуються перетини, мінімальні зазори, відповідність технологічним вимогам і можливість виготовлення. За результатами перевірки контур ребра уточнюється або оптимізується.

У підсумку перенесення інформації про обмежуючі поверхні дозволяє сформувати геометрично коректний і технологічно узгоджений контур ребра, який повністю інтегрований у просторову структуру виробу та не конфліктує з іншими елементами конструкції.

Узгодження розташування базової поверхні підшипника з геометрією шківів та самого підшипника є критичним етапом конструювання вузлів обертання, оскільки воно визначає точність роботи, довговічність і відсутність додаткових навантажень у підшипниковому вузлі.

Процес починається з визначення функціональної бази підшипника. Базова поверхня повинна забезпечувати правильне позиціонування підшипника відносно осі обертання шківів. На цьому етапі аналізується геометрія шківів: діаметр посадочного місця, співвісність поверхонь, товщина ступиці, а також наявність буртів або фіксуючих елементів.

Далі виконується узгодження осі шківів з внутрішнім і зовнішнім кільцями підшипника. Ключовою вимогою є забезпечення співвісності всіх елементів системи: шків \rightarrow посадочна поверхня \rightarrow підшипник \rightarrow вал. Будь-яке зміщення призводить до радіальних або осьових перевантажень, що скорочує ресурс підшипника.

Після цього здійснюється вибір і формування базової поверхні під підшипник. Вона може бути торцевою (упорна), циліндричною (посадочною) або комбінованою. Її положення визначається геометрією шківів: шириною ступиці, глибиною посадки та доступним монтажним простором. При цьому важливо враховувати допуски на розміри, щоб забезпечити як щільну посадку, так і можливість складання.

Особливу увагу приділяють узгодженню з геометрією підшипника. Його номінальні розміри (діаметр внутрішнього та зовнішнього кілець, ширина, фаски) визначають мінімально допустимі відстані до суміжних поверхонь. Базова поверхня не повинна перекривати фаски підшипника або створювати локальні контакти, які можуть викликати перекіс.

Далі виконується перевірка контактних умов між шківом і підшипником. Аналізується характер посадки: натяг, перехідна або зазорна. Геометрія базової поверхні коригується з урахуванням монтажу (пресування, нагрів, стопорні елементи) та умов експлуатації.

На етапі 3D-моделювання виконується прив'язка базової поверхні до конструктивної осі шківів. Використовуються геометричні залежності: співвісність, паралельність торців, обмеження зміщення. Це забезпечує асоціативність моделі при зміні параметрів шківів або підшипника.

Завершальним етапом є перевірка вузла на точність і відсутність перекосів. Оцінюється радіальне биття, осьове зміщення та рівномірність навантаження. За

потреби виконується корекція положення базової поверхні або зміна конструкції ступиці шківів.

Проілюструємо покроково процес узгодження розташування базової поверхні підшипника з геометрією шківів та самого підшипника (див. рис 3.13 – 3.17).

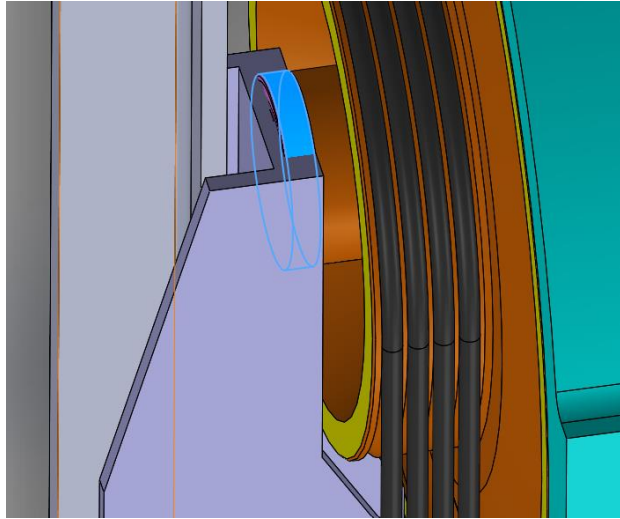


Рисунок 3.13 – 3D-модель вузла приводу ліфта у SolidWorks – зону сполучення підшипникового вузла, кронштейна та шківів з ременями

Силова логіка вузла – підшипник сприймає радіальне навантаження від натягу клинових пасів на шківі та передає його через кронштейн на корпусну стінку. Коректне узгодження базової поверхні гарантує рівномірний розподіл навантаження по тілах кочення підшипника та унеможливорює перекіс осі шківів.

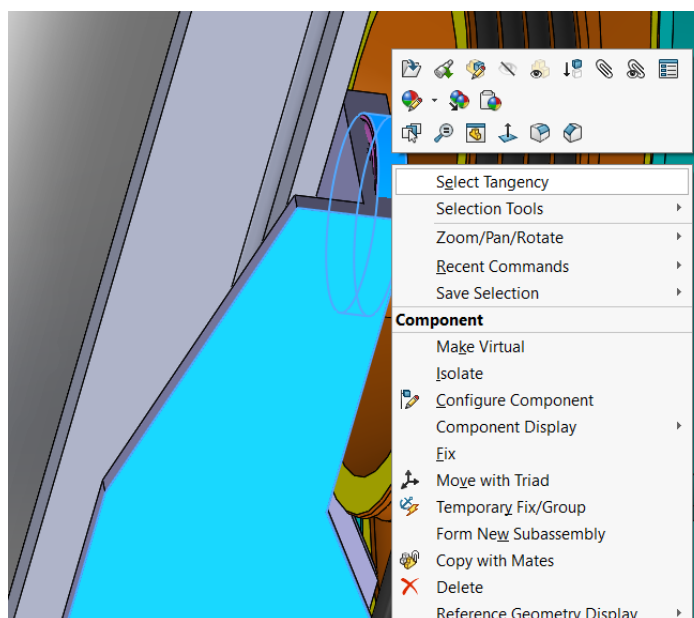


Рисунок 3.14 – SolidWorks у режимі складання приводу ліфта з відкритим контекстним меню компонента (правою кнопкою миші) для підшипникового вузла або кронштейна (виділено блакитним).

Найбільш релевантними для задачі узгодження базової поверхні підшипника є команди Fix, Move with Triad та Temporary Fix/Group – вони дозволяють точно позиціонувати підшипник відносно осі шківів та базової поверхні кронштейна до остаточного задання геометричних спряжень, що є стандартним робочим прийомом при проєктуванні опорних вузлів у складальному середовищі SolidWorks.

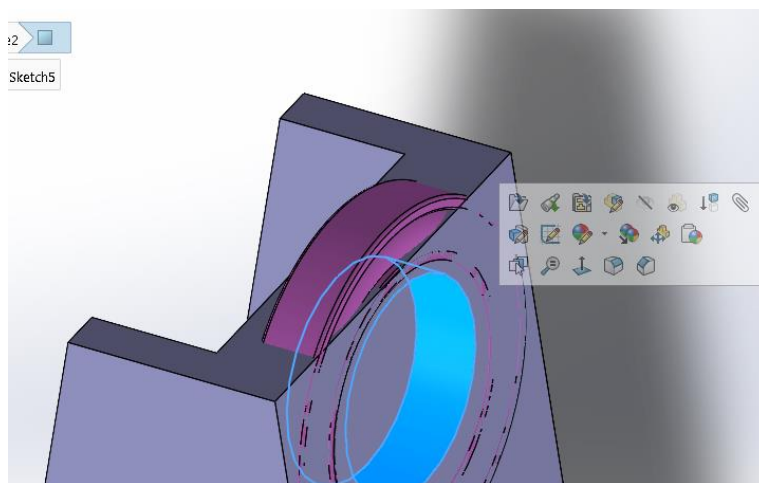


Рисунок 3.15 – SolidWorks, деталь кронштейна підшипника з активним Sketch5 – етап проектування посадкового отвору під підшипник із узгодженням геометрії шківів.

Зображення 3.15 демонструє ключовий момент узгодження трьох елементів вузла, а саме діаметр посадкового отвору ↔ зовнішній діаметр підшипника, осьове положення отвору ↔ геометрія шківів, глибина розточки ↔ ширина підшипника. Sketch5 із перенесеною геометрією шківів є інструментом параметричного узгодження всіх трьох компонентів вузла в єдиній системі координат складання.

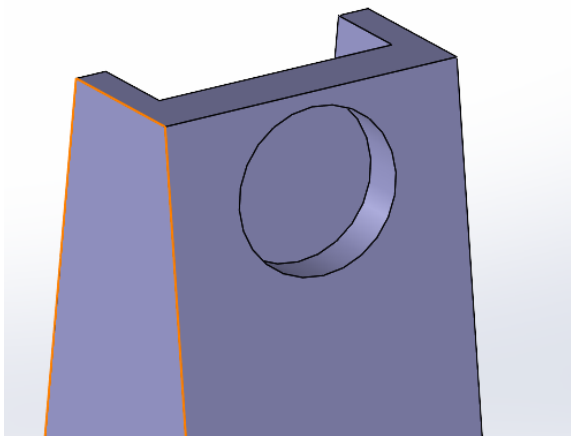


Рисунок 3.16 – Готовий кронштейн підшипника у SolidWorks після виконання операції формування посадкового отвору

На рисунку 3.16 показано кронштейн підшипника у SolidWorks з побудованим ескізом кола – профілем майбутнього посадкового отвору під підшипник. Зображення фіксує результат узгодження положення посадкового отвору з геометрією шківів та підшипника, а саме, діаметр кола, положення центру по висоті та по горизонталі. Діаметр кола – визначений на основі зовнішнього діаметра підшипника з урахуванням поля допуску посадки; геометрія перенесена з попередніх етапів (Sketch5, Intersection Curves). Порівняно з попереднім етапом (ескіз синього кола) виконано операцію Cut-Extrude або Boss-Extrude – у тілі кронштейна сформовано циліндричний посадковий отвір під підшипник із чітко вираженим торцевим буртом (кільцевий виступ навколо отвору). Бурт виконує функцію осевого упору для зовнішньої обійми підшипника, фіксуючи його положення вздовж осі. Сформований посадковий отвір із буртом є фінальним геометричним результатом усього циклу узгодження. діаметр отвору узгоджений із зовнішнім діаметром підшипника, висота бурта узгоджена з шириною зовнішньої обійми підшипника, осьове положення отвору узгоджене з площиною шківів. Деталь готова до розміщення у складанні та встановлення підшипника.

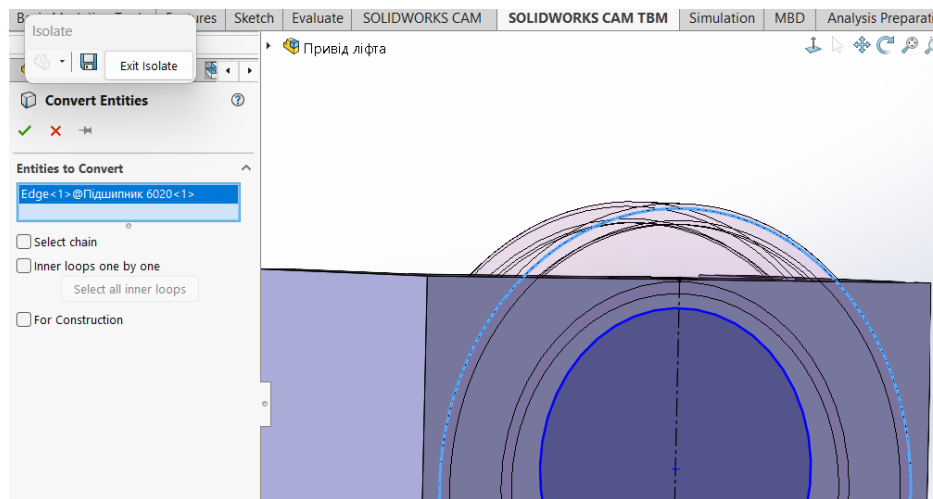


Рисунок 3.17 – SolidWorks у режимі складання «Привід ліфта» в режимі Isolate з активним інструментом Convert Entities

На рисунку 3.17 показано SolidWorks у режимі складання «Привід ліфта» в режимі Isolate з активним інструментом Convert Entities – перенесення геометрії підшипника 6020 у ескіз кронштейна. Активовано режим ізоляції – відображаються лише обрані компоненти вузла (кронштейн та підшипник 6020), решта деталей складання прихована. Кнопка Exit Isolate у верхньому лівому куті дозволяє повернутися до повного відображення складання. Це зручно для точного контролю узгодження геометрії без візуальних перешкод від суміжних деталей. Застосування Convert Entities із прив'язкою до Edge@Підшипник 6020 є прямим параметричним узгодженням – діаметр посадкового отвору кронштейна визначається не вручну введеним розміром, а реальною геометрією стандартного підшипника у складанні. При заміні підшипника на інший типорозмір контур автоматично перебудується, що унеможливорює помилки невідповідності посадкових розмірів.

Положення центру по висоті – узгоджене з віссю обертання шківів, зафіксованою вертикальною прив'язкою; гарантує співвісність підшипника та шківів в складанні. Положення центру по горизонталі – симетричне відносно вертикальної осі симетрії кронштейна, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження на обидва ребра жорсткості. Таким чином, на цьому етапі ескіз кола є фінальним підтвердженням коректності узгодження всіх трьох елементів вузла – підшипника, шківів та базової поверхні кронштейна – перед виконанням операції Boss-Extrude або Cut-Extrude для формування посадкового отвору.

У результаті отримується узгоджена система, в якій базова поверхня підшипника геометрично коректно інтегрована зі шківом і самим підшипником, що забезпечує точну роботу вузла та мінімальні втрати на тертя.

Наступним етапом є редагування габаритних розмірів кронштейна з урахуванням просторового розташування підшипника, що виконується з метою

забезпечення правильного монтажу підшипникового вузла, необхідної жорсткості конструкції та відсутності геометричних конфліктів із суміжними деталями.

Процес починається з аналізу положення підшипника у складальній одиниці. Визначається його просторове розташування відносно осей координат, базових поверхонь кронштейна та суміжних елементів конструкції. При цьому враховуються габаритні розміри підшипника, ширина його кілець, діаметр посадочного місця та необхідні монтажні зазори.

На наступному етапі виконується побудова або коригування посадочного вузла підшипника в конструкції кронштейна. Центр посадочного отвору використовується як один із головних конструктивних орієнтирів. Від його положення визначаються основні розміри кронштейна: висота, ширина, товщина стінок та відстані до базових поверхонь.

Далі здійснюється редагування зовнішнього контуру кронштейна. Геометрія корпусу адаптується таким чином, щоб навколо підшипника забезпечувався достатній запас матеріалу для сприйняття навантажень і розміщення ребер жорсткості. При зміні положення підшипника параметрично перебудовуються пов'язані елементи конструкції, включаючи посадочні поверхні, отвори кріплення та силові ребра.

Особлива увага приділяється перевірці мінімальних відстаней між підшипником і зовнішніми поверхнями кронштейна. Недостатня товщина матеріалу навколо посадочного місця може призвести до втрати жорсткості або появи локальних деформацій під час роботи вузла. Тому після кожної зміни положення підшипника виконується контроль товщини стінок і геометрії перехідних зон.

Наступним кроком є узгодження габаритів кронштейна з геометрією суміжних деталей. Аналізуються можливі перетини зі шківом, валом, кріпильними елементами, захисними кожухами та іншими компонентами механізму. За

необхідності виконується зміщення окремих поверхонь або зміна форми кронштейна для забезпечення нормативних зазорів.

У параметричній CAD-моделі редагування виконується шляхом зміни керуючих розмірів і залежностей. Оскільки посадочне місце підшипника є базовим елементом моделі, його переміщення автоматично викликає перебудову пов'язаних конструктивних елементів, що забезпечує збереження геометричної цілісності виробу та скорочує час внесення змін. Завершальним етапом є перевірка оновленої моделі на відповідність вимогам складання, міцності та технологічності. Контролюється співвісність підшипника з валом і шківом, відсутність колізій, достатність монтажного простору та можливість виготовлення деталей без додаткових технологічних ускладнень.

Продемонструємо як відбувається редагування габаритних розмірів кронштейна з урахуванням просторового розташування підшипника (див. рисунок 3.18 – 3.21).

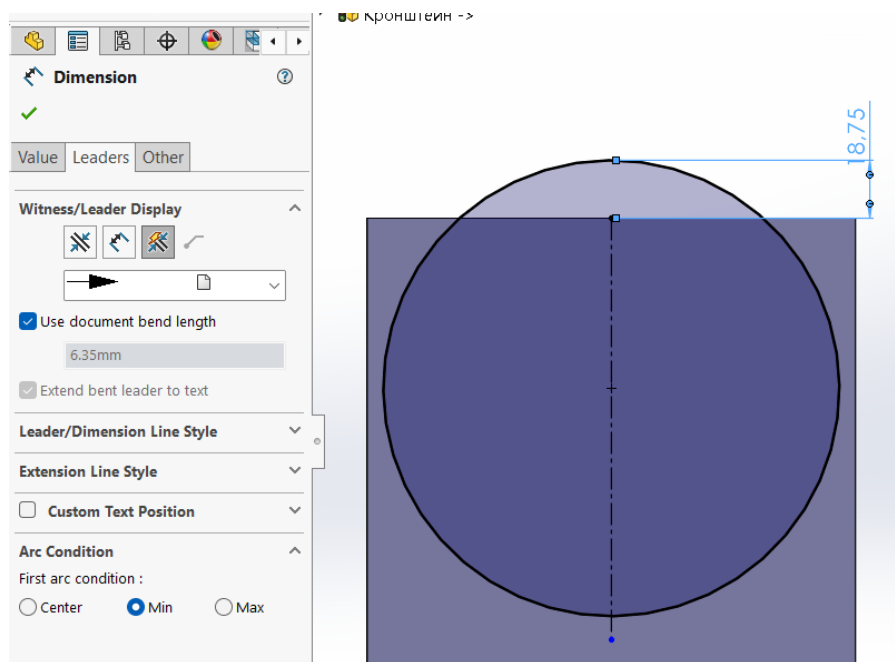


Рисунок 3.18 – SolidWorks у режимі редагування деталі «Кронштейн» з активним інструментом Dimension

На рисунку 3.18 показано SolidWorks, редагування деталі «Кронштейн» з активним інструментом Dimension – простановка розміру для узгодження положення посадкового отвору підшипника відносно верхньої грані кронштейна. Вибір режиму Min для Arc Condition свідчить про контроль мінімальної товщини стінки над отвором – конструктор перевіряє, чи достатньо матеріалу для забезпечення міцності кронштейна в зоні найбільшого ослаблення перерізу.

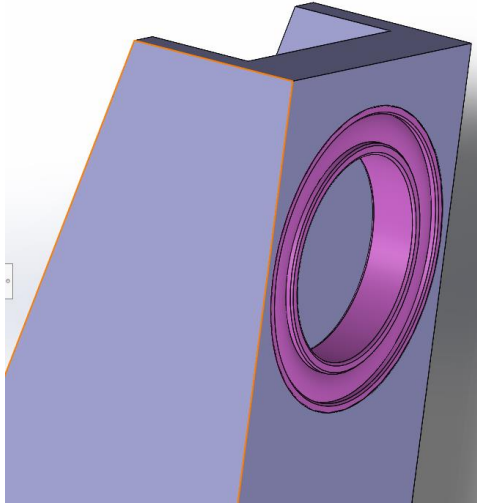


Рисунок 3.19 – Готовий кронштейн підшипника після виконання фінальної операції формування ступінчастого посадкового гнізда під підшипник 6020.

Порівняно з попередніми етапами у тілі кронштейна сформовано ступінчасту розточку – повноцінне посадкове гніздо підшипника з двома циліндричними поясами, виділеними рожево-пурпурним кольором. Ступінчаста конфігурація гнізда є фінальним геометричним результатом усього циклу узгодження підшипника 6020 з кронштейном та шківом. Зовнішній діаметр отримано через Convert Entities із геометрії підшипника 6020. Глибина зовнішнього пояса узгоджена з шириною зовнішньої обойми (24 мм). Положення гнізда по висоті зафіксовано розміром 18.75 мм від верхньої грані. Осьове

положення узгоджене з площиною шківa через Intersection Curves. Деталь повністю готова до встановлення підшипника 6020 у складанні приводу ліфта.

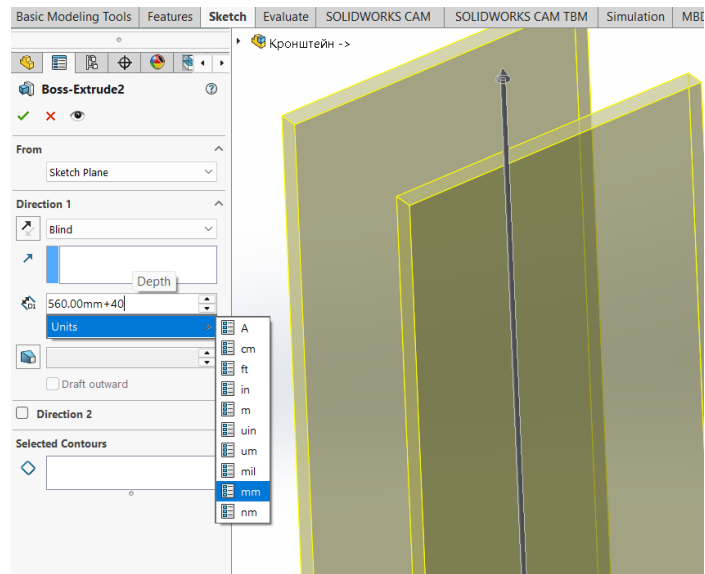


Рисунок 3.20 – SolidWorks у режимі редагування деталі «Кронштейн» з активною операцією Boss-Extrude2.

На рисунку 3.20 показано SolidWorks, редагування деталі «Кронштейн» з активною операцією Boss-Extrude2 – витискування тіла кронштейна на розраховану глибину з параметричним виразом у полі розміру. Використання параметричного виразу $560.00\text{mm} + 40$ замість фіксованого значення 600 мм є свідомим конструктивним рішенням, що забезпечує прозорість логіки розміру, гнучкість при зміні параметрів, узгодженість із загальними розмірами приводу ліфта. Прозорість логіки розміру підтверджується тим, що одразу видно, що 560 мм є базовим параметром конструкції, а 40 мм – технологічний припуск. Гнучкість при зміні параметрів підкріплюється тим, що при зміні базового розміру 560 мм глибина витискування автоматично перераховується зі збереженням припуску.

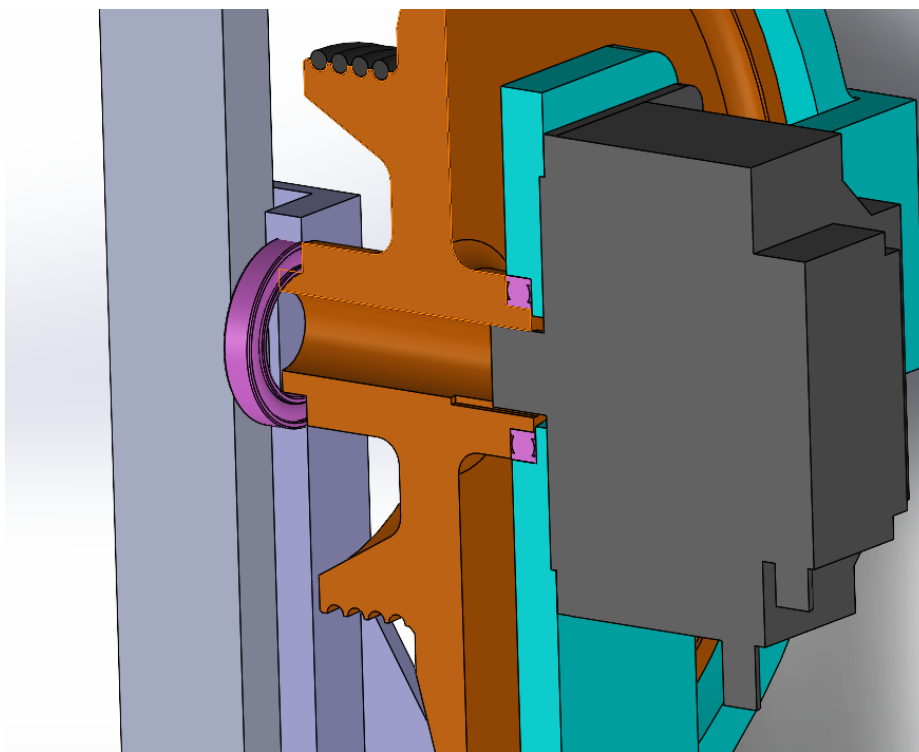


Рисунок 3.21 – Загальний вигляд складання вузла приводу ліфта у SolidWorks

На рисунку 3.21 показано загальний вигляд складання вузла приводу ліфта у SolidWorks – фінальний результат проектування з усіма узгодженими компонентами. Зображення демонструє повністю узгоджену складальну одиницю, де кожен елемент геометрично прив'язаний до суміжних деталей через інструменти, застосовані на попередніх етапах – Intersection Curves, Convert Entities, Boss-Extrude Up To Surface, параметричні розміри. Підшипник 6020, кронштейн, вал і корпус редуктора утворюють єдину кінематичну схему з коректною передачею навантажень по всьому ланцюжку вузлів приводу ліфта.

У результаті редагування габаритних розмірів кронштейна здійснюється адаптація його геометрії до фактичного просторового положення підшипника, що забезпечує правильне функціонування вузла, необхідну жорсткість конструкції та коректну взаємодію всіх елементів складальної одиниці.

Моделювання кріпильних елементів та застосування масивів є важливим етапом проектування складальних одиниць, оскільки дозволяє забезпечити коректне розташування елементів кріплення та значно скоротити час створення тривимірної моделі.

Процес починається з визначення типу кріпильних елементів відповідно до конструктивних вимог вузла. Залежно від умов експлуатації та характеру навантажень обираються болти, гвинти, шпильки, гайки, шайби або інші стандартні вироби. При цьому враховуються діаметри різьби, довжина кріплення, класи міцності та особливості монтажу.

На наступному етапі у CAD-системі створюються або імпортуються параметричні моделі стандартних кріпильних виробів із бібліотеки компонентів. Для кожного елемента визначаються базові поверхні прив'язки та умови взаємного позиціонування із деталями складальної одиниці. Розташування кріплення узгоджується з геометрією отворів, посадочних поверхонь та конструктивними обмеженнями виробу.

Після розміщення першого кріпильного елемента виконується аналіз повторюваних структур. У випадку наявності декількох однакових точок кріплення доцільно використовувати інструменти масивів, які автоматизують створення копій елемента за заданими правилами. Це дозволяє уникнути багаторазового ручного моделювання однакових компонентів.

Для рівномірно розташованих отворів застосовуються лінійні масиви, які формують копії елементів уздовж одного або декількох напрямків із заданим кроком. Якщо отвори розташовані по колу, наприклад навколо посадочного місця підшипника або фланця, використовуються кругові масиви, де кількість копій і кутовий крок задаються параметрично.

При використанні масивів усі копії залишаються пов'язаними з базовим елементом. Завдяки цьому будь-які зміни геометрії або параметрів початкового

кріплення автоматично застосовуються до всіх елементів масиву. Такий підхід забезпечує узгодженість моделі та спрощує її супровід під час внесення конструктивних змін.

Додатково застосовуються спрощені конфігурації кріпильних виробів. Для складальних моделей великого розміру замість повної геометрії різьби використовуються умовні або спрощені представлення, що зменшують обчислювальне навантаження на CAD-систему та прискорюють регенерацію моделі.

Після формування масивів виконується перевірка коректності розташування всіх елементів кріплення. Аналізуються міжосьові відстані, відступи від країв деталей, можливість доступу монтажного інструмента та відсутність перетинів із суміжними компонентами.

На рисунках 3.22 – 3.23 продемонстровано етап моделювання кріпильних елементів та застосування масивів.

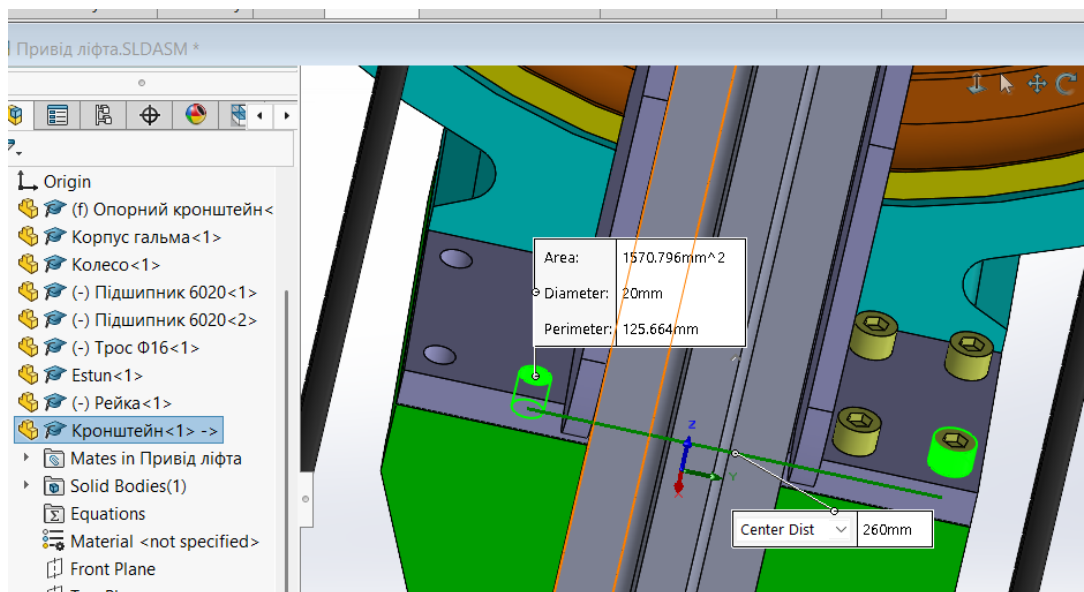


Рисунок 3.22 – SolidWorks у режимі складання «Привід ліфта.SLDASM» з активним вимірюванням геометричних параметрів кріпильного отвору та відстані між центрами

На рисунку 3.22 показано SolidWorks у режимі складання «Привід ліфта.SLDASM» з активним вимірюванням геометричних параметрів кріпильного отвору та відстані між центрами. Вимірювання $\varnothing 20$ мм та Center Dist 260 мм є фінальною перевіркою відповідності кріпильних отворів кронштейна стандартним монтажним розмірам опорної конструкції приводу ліфта. Ці параметри узгоджуються з розташуванням різьбових отворів у корпусі та забезпечують коректне силове замикання всього вузла при монтажі.

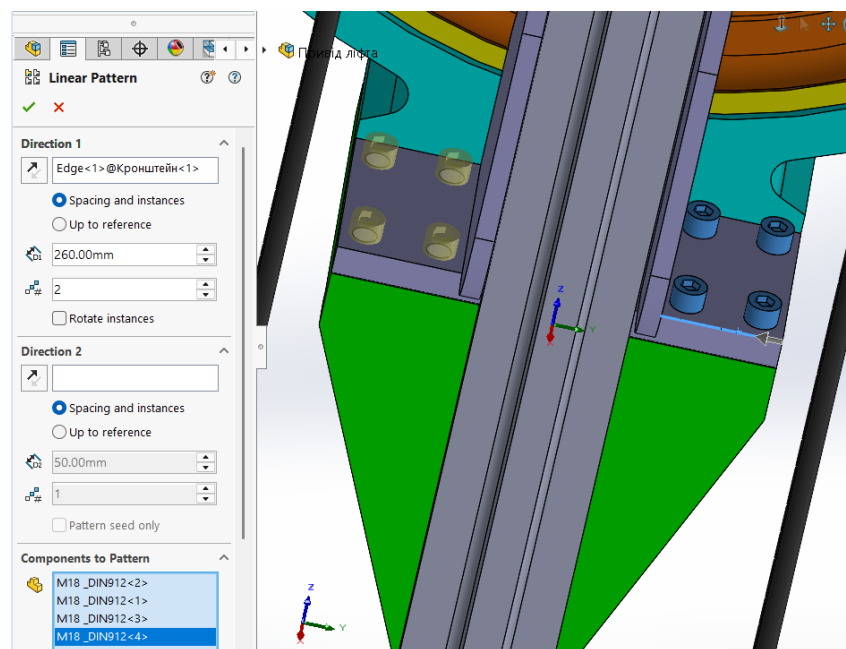


Рисунок 3.23 – SolidWorks у режимі складання «Привід ліфта» з активною операцією Linear Pattern

На рисунку 3.23 показано SolidWorks у режимі складання «Привід ліфта» з активною операцією Linear Pattern – лінійне масивування кріпильних болтів DIN 912 вздовж кронштейна. Масивуються чотири болти M18 DIN 912 одночасно.

Застосування Linear Pattern із прив'язкою до Edge@Кронштейн та кроком 260 мм замикає весь цикл проєктування вузла, а саме, крок 260 мм отримано

вимірюванням на попередньому етапі та перенесено в параметр масивування; прив'язка до ребра кронштейна гарантує, що при зміні геометрії кронштейна болти автоматично перебудують своє положення; чотири болти M18 DIN 912 забезпечують рівномірний розподіл монтажного зусилля по всій довжині кріпильної полиці кронштейна приводу ліфта.

У результаті використання параметричних моделей кріпильних елементів та інструментів масивів забезпечується швидке створення складальних моделей, підвищується точність розташування кріплення, спрощується внесення змін до конструкції та покращується керованість проектом у середовищі CAD-системи.

Підготовка середовища проєктування ЧПК-обробки є початковим етапом технологічної підготовки виробництва, під час якого створюються умови для розроблення траєкторій руху інструменту та генерації керуючих програм. Від правильності налаштування середовища залежить точність моделювання процесу обробки, якість готового виробу та ефективність використання обладнання (див. рисунок 3.24 – 3.27).

На першому етапі здійснюється імпорт або відкриття тривимірної моделі деталі, створеної в CAD-системі. Перевіряється коректність геометрії моделі, відсутність розривів поверхонь, дубльованих елементів та інших помилок, які можуть вплинути на подальше формування траєкторій обробки. За необхідності виконується спрощення геометрії шляхом видалення допоміжних конструктивних елементів, що не беруть участі в процесі виготовлення.

Далі виконується створення нового технологічного проєкту САМ-обробки. У налаштуваннях проєкту задаються одиниці вимірювання, система координат, точність розрахунків та інші загальні параметри. Особливу увагу приділяють вибору технологічної системи координат, яка повинна відповідати реальному базуванню деталі на верстаті.

Наступним кроком є вибір моделі верстата з числовим програмним керуванням. У САМ-системі завантажується цифровий двійник обладнання або його кінематична схема. Визначаються кількість осей, допустимі переміщення, характеристики шпинделя та особливості системи керування. Це дозволяє врахувати реальні можливості обладнання під час розрахунку траєкторій.

Після налаштування верстата формується модель заготовки. Визначаються її геометричні параметри, матеріал, припуски на обробку та спосіб закріплення. Заготовка може бути створена автоматично на основі габаритів деталі або імпортована як окрема тривимірна модель. Одночасно задаються пристрої базування та закріплення, які враховуються під час перевірки можливих зіткнень.

На наступному етапі виконується налаштування інструментальної бібліотеки. Для кожного інструмента задаються геометричні характеристики, матеріал різальної частини, довжина, діаметр, параметри кріплення та режими різання. За необхідності створюються нові інструменти або редагуються існуючі записи бібліотеки.

Далі встановлюються технологічні параметри обробки. Визначаються стратегії чорнової, напівчистої та чистої обробки, глибини різання, подачі, швидкості обертання шпинделя та інші режими. Параметри вибираються з урахуванням матеріалу деталі, характеристик інструмента та можливостей верстата.

Після завершення налаштувань виконується перевірка правильності підготовленого середовища. Аналізується взаємне розташування деталі, заготовки, інструмента та елементів оснащення. Перевіряється коректність систем координат, доступність усіх зон обробки та відсутність потенційних колізій.

Завершальним етапом є збереження налаштованого проєкту та підготовка його до створення технологічних операцій. Після цього середовище вважається готовим для розроблення траєкторій руху інструмента, проведення віртуальної

симуляції та генерації керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням.

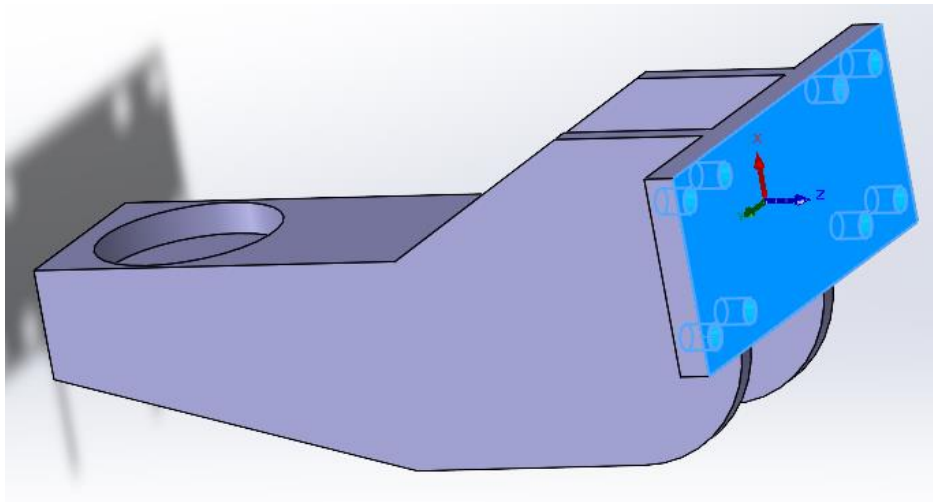


Рисунок 3.24 – Деталь опорного кронштейна з активною торцевою гранню та масивом кріпильних елементів у SolidWorks

Рисунок 3.24 фіксує результат операції Linear Pattern із попереднього етапу – вісім болтів M18 DIN 912 розміщені на монтажній торцевій грані кронштейна з кроком 260 мм у двох напрямках. Активна блакитна грань свідчить про те, що конструктор готується до наступної операції — задання спряжень у складанні або розміщення кронштейна відносно корпусної деталі приводу ліфта. Деталь є геометрично завершеною та готовою до фінального складання вузла.

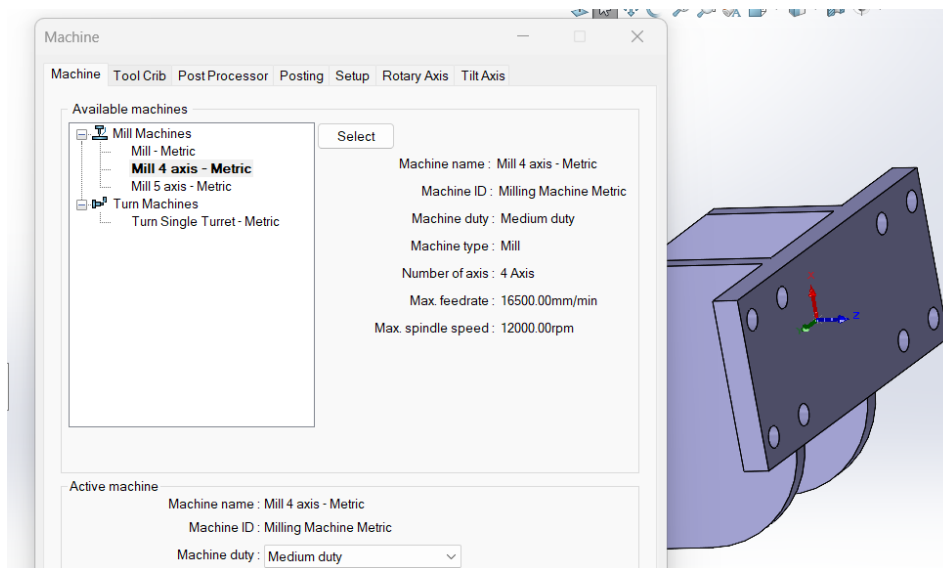


Рисунок 3.25 – SolidWorks CAM

На рисунку 3.25 показано SolidWorks CAM – діалогове вікно Machine (налаштування верстата) для підготовки керуючої програми обробки кронштейна підшипника. Показано вкладки налаштувань: Machine / Tool Crib / Post Processor / Posting / Setup / Rotary Axis / Tilt Axis – повний набір параметрів для конфігурування віртуального верстата у САМ-середовищі. Ми бачимо параметри обраного верстата Mill 4 axis – Metric (таблиця 3.1)

Таблиця 3.1 – Параметри верстата Metric

Machine name	Mill 4 axis-Metric – чотиривісний фрезерний верстат у метричній системі
Machine ID	Milling Machine Metric – ідентифікатор у базі САМ
Machine duty	Medium duty – середнє навантаження; відповідає обробці сталевих деталей середньої маси (кронштейн підшипника)
Machine type	Mill – фрезерний тип
Number of axis	4 Axis – чотири керовані осі (X, Y, Z + одна обертова); дозволяє обробляти похилі поверхні та отвори під кутом без перевстановлення деталі
Max. feedrate	16500.00 mm/min – максимальна подача; забезпечує продуктивну чорнову обробку

Max. spindle speed	12000.00 rpm – максимальна частота обертання шпинделя; достатня для чистової обробки фрезами малого діаметра
Active machine (внизу) підтверджує вибір	Mill 4 axis - Metric, Medium duty

Кронштейн підшипника з видимими монтажними отворами та посадковим гніздом – деталь, для якої розробляється керуюча програма. Тривісний маніпулятор визначає систему координат заготовки у САМ-середовищі. Вибір 4-осьового фрезерного верстата для обробки кронштейна є обґрунтованим рішенням, оскільки деталь має похилу несучу стінку – потребує нахилу інструмента або столу (4-та вісь); ступінчасту розточку під підшипник 6020 – потребує точного розточування з контролем діаметра та глибини; кріпильні отвори на різних гранях – обробляються за один установ на 4-осьовому верстаті без перевстановлення; заокруглення та радіусні переходи – обробляються сферичними фрезами при керуванні 4-ма осями одночасно.

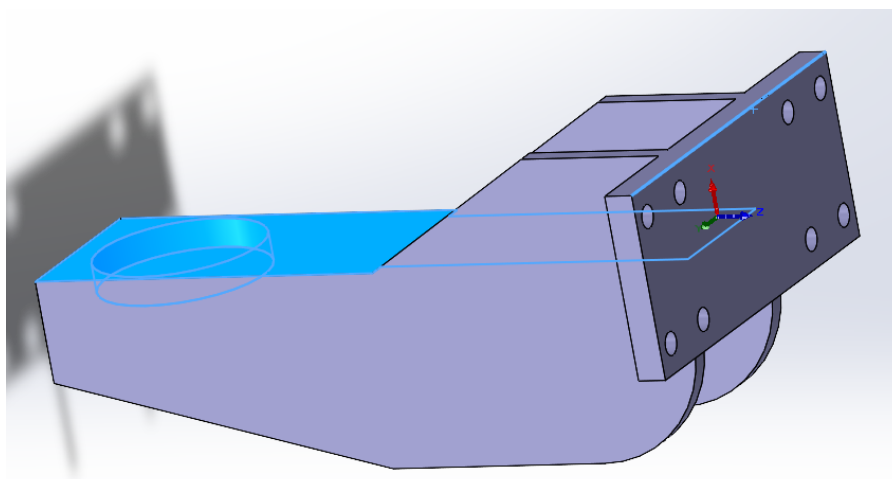


Рисунок 3.26 – SolidWorks CAM – кронштейн підшипника з визначеною заготовкою (Stock) для САМ-обробки.

На рисунку 3.26 показано SolidWorks CAM – кронштейн підшипника з визначеною заготовкою (Stock) для САМ-обробки.

З точки зору САМ-підготовки визначення заготовки є першим технологічним кроком після вибору верстата (Mill 4 axis - Metric). Форма та розміри заготовки впливають на стратегію чорнової обробки, час обробки, точність базування. Стратегія чорнової обробки представляє собою об'єм матеріалу для видалення та визначає кількість проходів і вибір інструменту, час обробки ілюструє мінімальний рівномірний припуск, який скорочує машинний час, точність базування демонструє як заготовка забезпечує зручне базування у лещатах або на столі 4-осьового верстата по трьох взаємно перпендикулярних площинах.

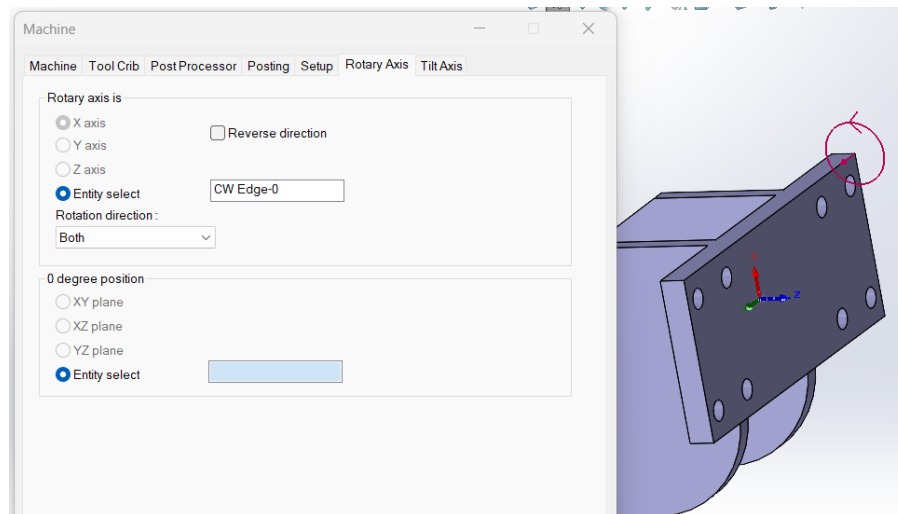


Рисунок 3.27 – SolidWorks CAM – вкладка Rotary Axis діалогового вікна Machine

На рисунку 3.27 показано SolidWorks CAM – вкладка Rotary Axis діалогового вікна Machine для налаштування четвертої обертової осі 4-осьового фрезерного верстата. Налаштування Rotary Axis через Entity select (CW Edge-0) замість стандартних осей X/Y/Z є точним технологічним рішенням для

кронштейна підшипника, оскільки похила несуча стінка деталі не паралельна жодній стандартній координатній площині (вісь обертання прив'язується до реального ребра деталі). Rotation direction: Both дозволяє обробляти отвори та поверхні з обох боків без переустановлення. Entity select для нульової позиції забезпечує прив'язку нуля четвертої осі до конкретної площини кронштейна, що гарантує повторюваність установу при серійному виробництві.

Побудова моделі заготовки є одним із ключових етапів підготовки ЧПК-обробки, оскільки вона визначає початковий об'єм матеріалу, який буде видалятися в процесі механічної обробки (рисунок 3.28 – 3.30). Правильно сформована модель заготовки забезпечує коректне розрахування траєкторій інструмента, оцінку припусків та достовірність результатів технологічного моделювання.

Процес починається з аналізу геометрії готової деталі та визначення способу отримання заготовки. Залежно від технології виготовлення це може бути прокат, литво, поковка або стандартна заготовка з листового чи сортового матеріалу. На основі габаритних розмірів деталі визначаються початкові параметри заготовки та величини припусків, необхідних для подальшої механічної обробки. Далі у САМ-системі створюється тривимірна модель заготовки. У найпростішому випадку її форма формується як габаритний паралелепіпед або циліндр, розміри якого перевищують відповідні розміри готової деталі на величину технологічних припусків. Для складніших виробів можуть використовуватися моделі литих або кованих заготовок, які максимально наближені до реальної форми напівфабрикату.

Наступним етапом є формування припусків на оброблюваних поверхнях. Для цього виконується зміщення зовнішніх контурів деталі на задану величину в напрямку нормалі до поверхні. Величина припуску визначається вимогами до точності, шорсткості поверхні, матеріалу заготовки та типу подальшої обробки.

При цьому необроблювані поверхні можуть залишатися без змін, що дозволяє отримати більш точну модель початкового стану виробу.

Після створення геометрії заготовки виконується її позиціонування відносно системи координат обробки. Визначається базова точка, напрямки осей та положення заготовки на столі верстата або в пристрої закріплення. Правильне базування є необхідною умовою для подальшого формування коректних траєкторій руху інструмента.

На етапі перевірки проводиться аналіз співвідношення між моделлю деталі та заготовкою. Контролюється наявність достатнього припуску на всіх оброблюваних поверхнях, відсутність ділянок із недостатнім запасом матеріалу та надлишкових об'ємів, які можуть призвести до збільшення часу обробки.

Завершальним кроком є інтеграція моделі заготовки до технологічного проекту. Створена заготовка використовується під час розрахунку траєкторій інструмента, симуляції процесу обробки та аналізу залишкового матеріалу після виконання кожної операції, що дозволяє отримати реалістичну модель процесу виготовлення та підвищити ефективність підготовки керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням. Проілюструємо процес побудови моделі заготовки.

На рисунку 3.28 показано SolidWorks CAM – визначення Setup (установу) для обробки кронштейна підшипника з орієнтацією деталі відносно системи координат верстата. Зображення фіксує критичний етап визначення установу – орієнтацію деталі у системі координат верстата перед генерацією траєкторій інструмента. Орієнтація по Right Plane означає, що вісь Z спрямована перпендикулярно до правої площини кронштейна – це напрямок підведення шпинделя при обробці торцевої грані з кріпильними отворами. Вісь X – вздовж довжини кронштейна; визначає напрямок подачі при чорновому фрезеруванні горизонтальних поверхонь, вісь Y – по ширині деталі. Кут нахилу деталі відносно

горизонту – похила несуча стінка кронштейна розміщена під кутом, що підтверджує необхідність 4-осьової обробки з використанням обертової осі, налаштованої на попередньому етапі (Rotary Axis / CW Edge-0). Габаритний контейнер з помаранчевими межами та синіми вузловими точками дозволяє САМ-системі автоматично розрахувати безпечні зони прискореного переміщення інструмента (rapid moves) поза межами заготовки та уникнути зіткнень при обробці складнопрофільної деталі.

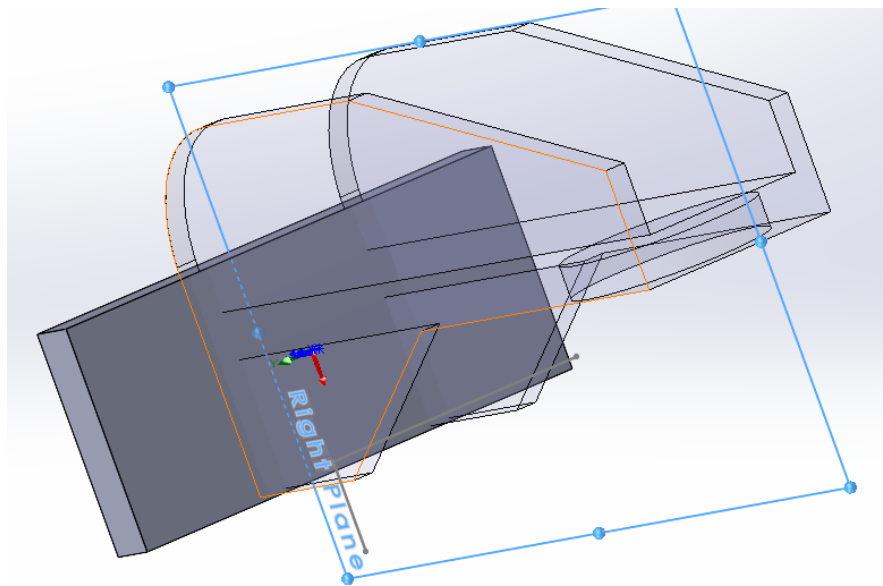


Рисунок 3.28 – SolidWorks CAM у режимі визначення Setup (установи) для обробки кронштейна підшипника з орієнтацією деталі відносно системи координат верстата

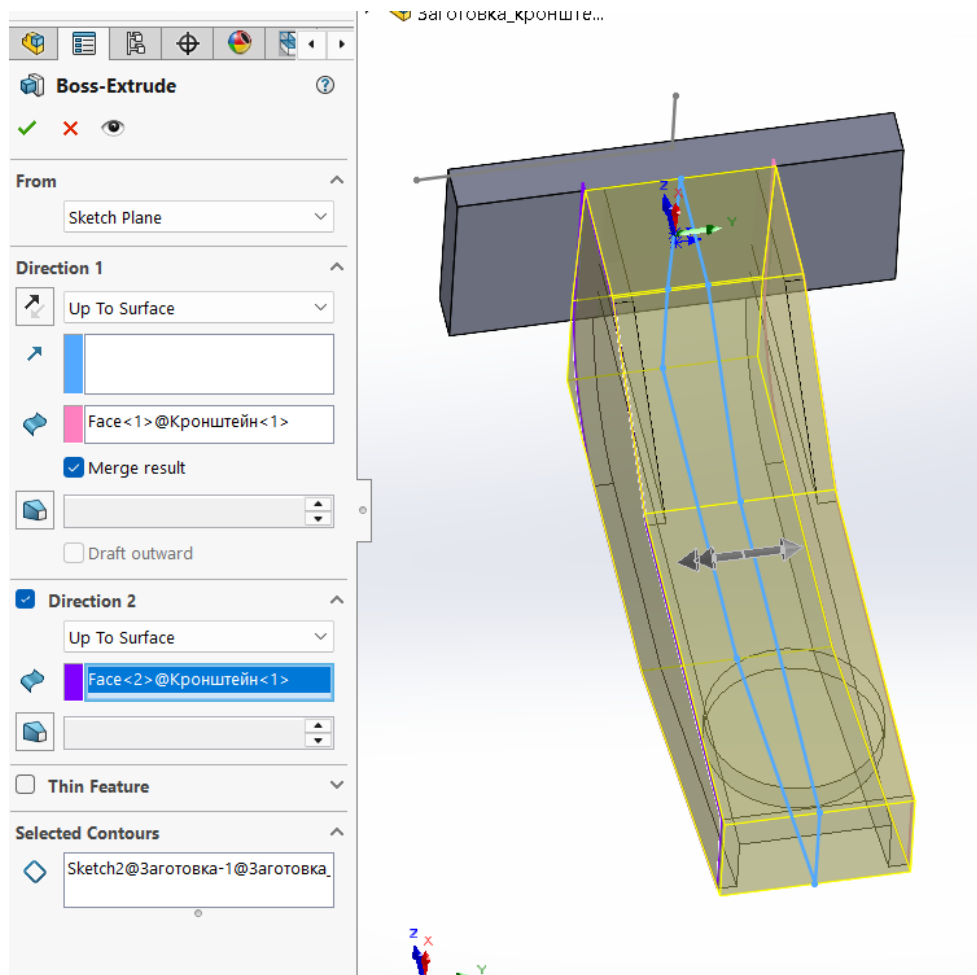


Рисунок 3.29 – SolidWorks CAM з активною операцією Boss-Extrude для формування тіла заготовки з двостороннім витискуванням до поверхонь кронштейна

На зображенні показано SolidWorks CAM – файл «Заготовка_кронште...» з активною операцією Boss-Extrude для формування тіла заготовки з двостороннім витискуванням до поверхонь кронштейна. З точки зору CAM-підготовки застосування двостороннього Boss-Extrude Up To Surface із прив'язкою до Face<1> та Face<2>@Кронштейн є принципово важливим технологічним рішенням, що обумовлено наступними факторами:

- точний припуск – заготовка формується не з фіксованим розміром, а точно між реальними гранями кронштейна; при зміні геометрії деталі заготовка автоматично перебудовується

- мінімальний матеріал – двостороннє витискування до граней усуває надлишковий припуск, що скорочує машинний час обробки

- коректний розрахунок траєкторій – САМ-система точно знає об'єм матеріалу між двома гранями і генерує оптимальні траєкторії чорнового та чистового фрезерування для кожної зони кронштейна підшипника.

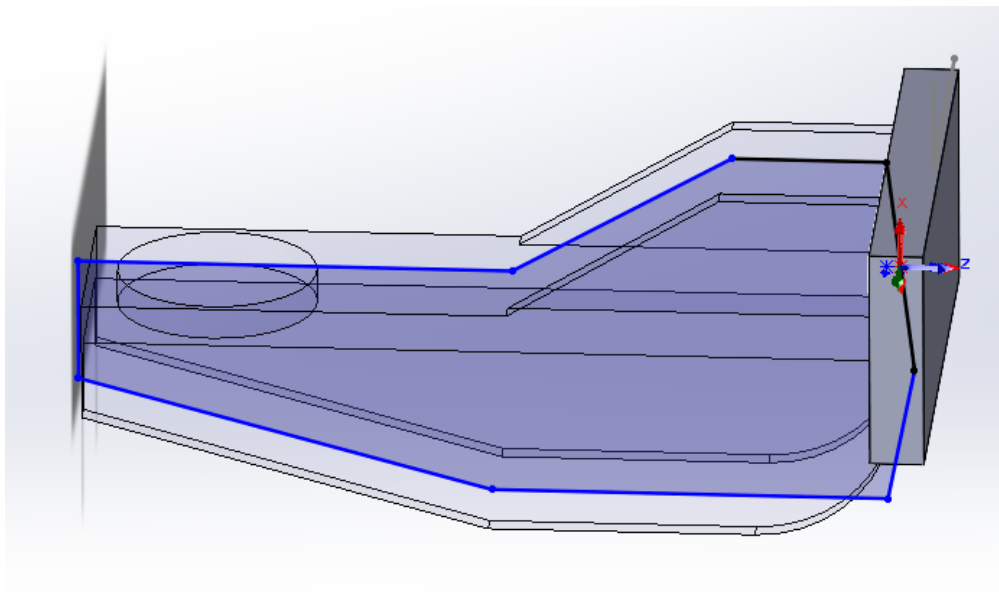


Рисунок 3.30 – Кронштейн підшипника з визначеними САМ-установом та межами зони обробки

На зображенні показано SolidWorks CAM – кронштейн підшипника з визначеними САМ-установом та межами зони обробки (Machining Boundary). Зображення фіксує завершення етапу визначення установу та перехід до генерації траєкторій. Синій контур межі охоплює всі функціональні поверхні деталі, включаючи похилу стінку, горизонтальну полицю та зону посадкового отвору – це

гарантує повне оброблення всіх поверхонь за один установ. Горизонтальні та похилі рядки траєкторій свідчать про автоматичне розпізнавання SolidWorks CAM різних типів поверхонь і призначення відповідних стратегій обробки. Прив'язка осі Z до торцевої грані узгоджується з налаштуванням Rotary Axis (CW Edge-0) та забезпечує коректну орієнтацію інструмента при 4-осьовій обробці похилих поверхонь кронштейна підшипника приводу ліфта.

Проектування базової площини кронштейна є одним із початкових етапів створення тривимірної моделі деталі, оскільки саме вона визначає положення кронштейна у виробі, забезпечує його базування під час складання та слугує основою для побудови інших конструктивних елементів.

Процес починається з аналізу функціонального призначення кронштейна та умов його встановлення в складальній одиниці. На цьому етапі визначаються поверхні, через які деталь контактуватиме з корпусом, рамою або іншими елементами конструкції. Саме ці поверхні розглядаються як потенційні базові площини, оскільки вони забезпечують фіксацію положення деталі в просторі та передачу навантажень.

Після визначення функціональної бази створюється опорна площина в середовищі САД-системи. Як правило, вона формується відносно глобальної системи координат або відносно геометрії суміжних деталей складальної моделі. Положення площини узгоджується з напрямками основних навантажень і вимогами до монтажу виробу.

Далі виконується побудова ескізу базової поверхні. На площині задаються контури майбутньої опорної частини кронштейна з урахуванням необхідних габаритних розмірів, зон розташування кріпильних елементів та вимог до жорсткості конструкції. Геометричні розміри визначаються на основі навантажень, умов кріплення та просторових обмежень складальної одиниці.

Наступним етапом є формування тривимірної геометрії базової частини кронштейна. За допомогою операцій витягування або побудови тонкостінних елементів створюється основний об'єм деталі, який надалі використовується як конструктивна база для проектування ребер жорсткості, посадочних поверхонь, отворів та інших елементів.

Паралельно виконується узгодження базової площини з геометрією суміжних деталей. Перевіряються монтажні зазори, відстані до рухомих елементів, можливість встановлення кріплення та доступ інструменту під час складання. За необхідності коригуються розміри або положення площини для усунення можливих конфліктів.

Після формування базової поверхні визначаються технологічні вимоги до неї. Задаються параметри шорсткості, допуски на площинність і взаємне розташування відносно інших конструктивних елементів. Це забезпечує необхідну точність базування під час виготовлення та експлуатації виробу.

Завершальним етапом є перевірка функціональності створеної базової площини в складі загальної моделі кронштейна. Аналізується її здатність забезпечувати стійке встановлення деталі, сприймати експлуатаційні навантаження та виконувати роль основної конструктивної і технологічної бази. Після підтвердження коректності побудови базова площина використовується як вихідний елемент для подальшого проектування всіх інших складових кронштейна.

На зображенні показано SolidWorks CAM — діалогове вікно New Operation: Face Mill з вибором інструменту для торцевого фрезерування горизонтальних поверхонь кронштейна.

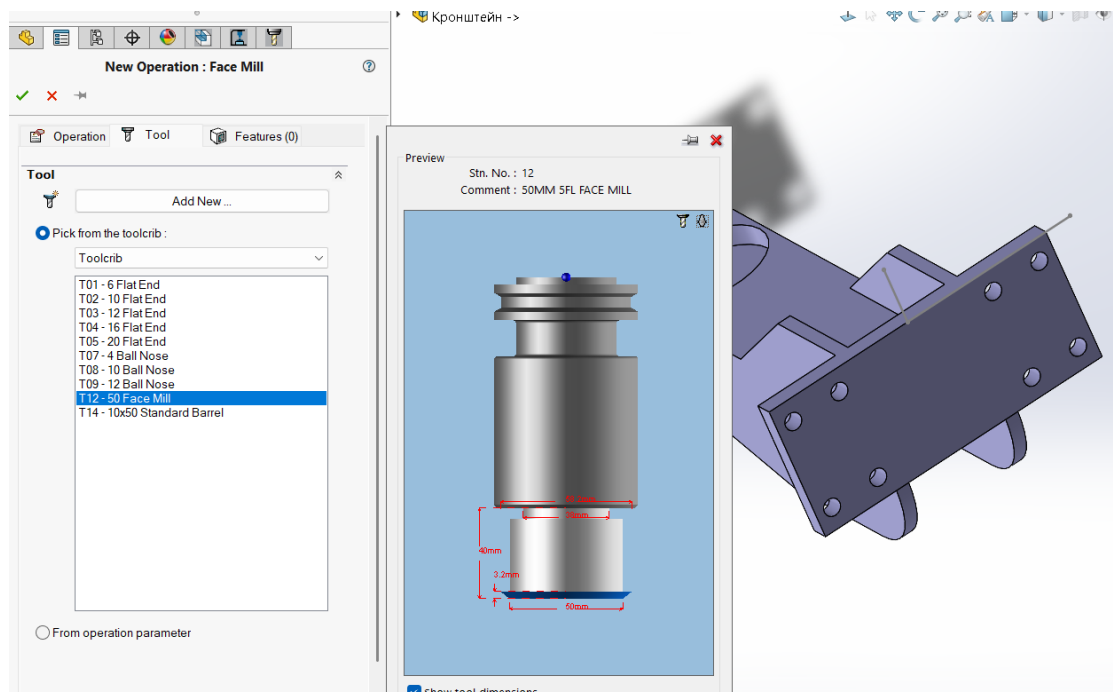


Рисунок 3.31 – Face Mill з вибором інструменту для торцевого фрезерування горизонтальних поверхонь кронштейна

На рисунку 3.31 показано SolidWorks CAM – діалогове вікно New Operation: Face Mill з вибором інструменту для торцевого фрезерування горизонтальних поверхонь кронштейна. З точки зору вибору інструменту вибір 50MM 5FL Face Mill (T12) для операції торцевого фрезерування кронштейна є технологічно обґрунтованим рішенням, адже діаметр 50 мм є оптимальним для обробки горизонтальної полиці кронштейна; забезпечує перекриття поверхні за 2–3 проходи з урахуванням ширини деталі. П'ять ріжучих пластин – підвищена кількість зубів забезпечує високу продуктивність знімання матеріалу при чорновому фрезеруванні, кращу якість поверхні при чистовому проході, рівномірне навантаження на шпиндель при Max. feedrate 16500 мм/хв верстата Mill 4 axis. Швидкісна головка (Face Mill) зі змінними пластинами – стандартний інструмент для торцевого фрезерування корпусних деталей; пластини

замінюються без переточування, що забезпечує стабільність розмірів при серійній обробці кронштейнів підшипника приводу ліфта.

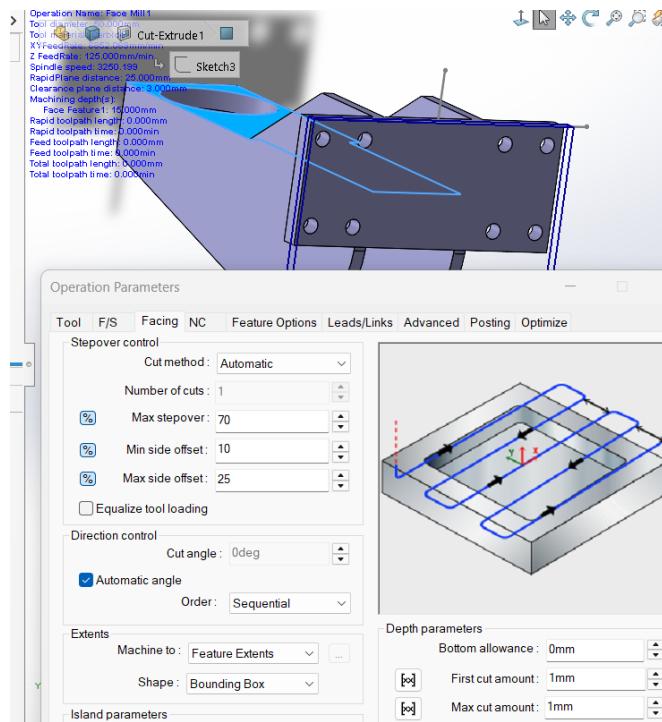


Рисунок 3.32 – Визначення параметрів оброблюваної області та редагування параметрів операції

На рисунку 3.32 показано SolidWorks CAM – операція Face Mill1 з активним вікном Operation Parameters та попереднім переглядом траєкторії інструмента. На 3D-моделі (синя траєкторія на кронштейні) зображено зигзагоподібні паралельні проходи торцевої фрези по горизонтальній полиці кронштейна з підведеннями та відведеннями по контуру. Обрані параметри є технологічно обґрунтованими для обробки кронштейна підшипника: max stepover 70 % при 50 мм – крок 35 мм забезпечує баланс між продуктивністю та якістю поверхні; при 5 пластинах фрези гарантує шорсткість Ra 1,6–3,2 мкм. First/Max cut amount 1 мм – малий знімання за прохід при торцевому фрезеруванні чавуну або сталі кронштейна мінімізує

вібрації та забезпечує точність площинності поверхні під підшипниковий вузол. Bottom allowance 0 мм – чистова обробка до фінального розміру без додаткового припуску; відповідає вимогам до базової поверхні посадкового гнізда підшипника 6020. Sequential order – послідовна обробка проходів без підйому інструмента між рядками скорочує машинний час та знижує знос інструмента.

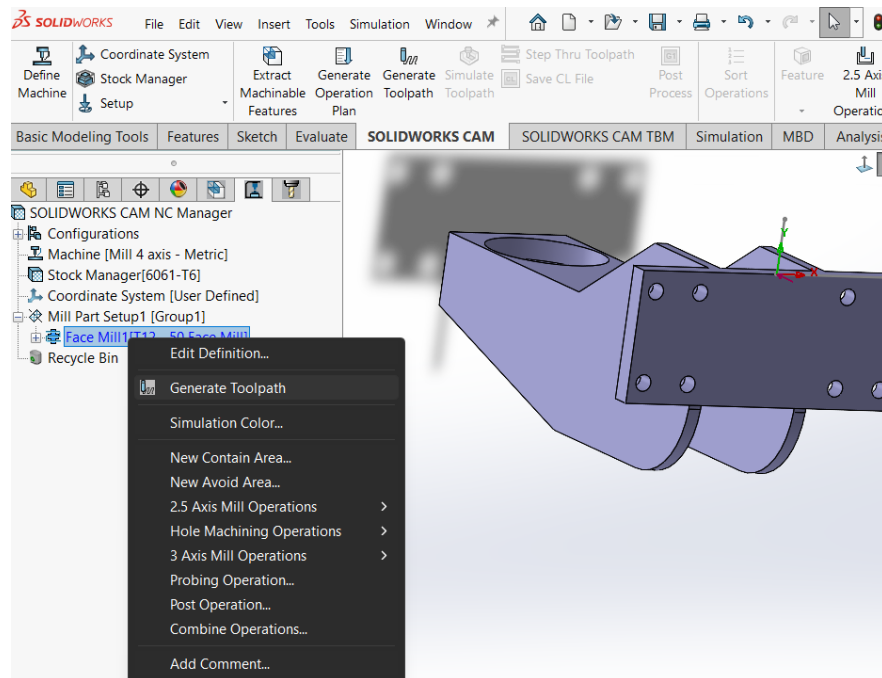


Рисунок 3.33 – Етап генерації траєкторії руху інструменту (Generate Toolpath) для операції торцевого фрезерування поверхні у середовищі SOLIDWORKS CAM

На рисунку 3.33 представлено робочий простір модуля SOLIDWORKS CAM, призначеного для автоматизації технологічної підготовки виробництва (CAM-системи). Цей етап безпосередньо ілюструє концепцію наскрізного комп'ютерно-інтегрованого проектування (CAD \rightarrow CAM). Базовими параметрами для генерації G-коду є:

Machine [Mill 4 axis - Metric]: Вибрано конфігурацію верстата – це 4-осьовий фрезерний верстат із метричною системою вимірювання.

Stock Manager [6061-T6]: Визначено матеріал заготовки. Використовується поширений конструкційний алюмінієвий сплав марки 6061-T6 (це критично для автоматичного розрахунку режимів різання: швидкості шпинделя та подачі).

Coordinate System [User Defined]: Задано систему координат деталі (нульову точку верстата – Work Coordinate System, WCS), від якої ведеться відлік усіх переміщень інструменту.

Mill Part Setup1 \rightarrow Face Mill1: Створено установ для фрезерування, в межах якого виділено першу технологічну операцію – Face Mill1 (Торцеве фрезерування).

На основі розробленої CAD-моделі у модулі SOLIDWORKS CAM було виконано налаштування координатної системи обробки та обрано матеріал заготовки (алюмінієвий сплав 6061-T6). Для первинної обробки базової площини використано торцеву фрезу $D = 50$ мм (інструмент T12). За допомогою функції "Generate Toolpath" ініційовано автоматичний розрахунок наскрізних траєкторій руху інструменту з наступним переходом до симуляції та генерації керуючої програми (G-коду) для 4-осьового верстата з ЧПК.

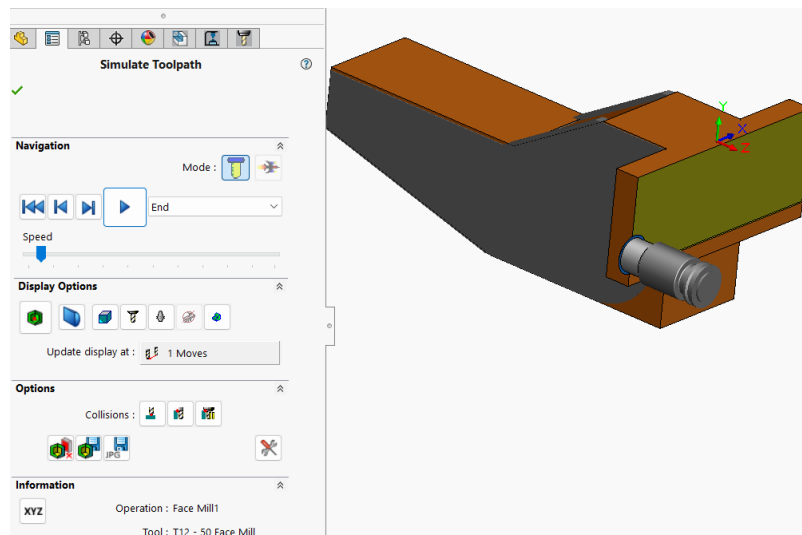


Рисунок 3.34 – Симуляція та верифікація процесу торцевого фрезерування (візуалізація зняття припуску) операції Face Mill1 у середовищі SOLIDWORKS CAM

На рисунку 3.34 представлено процес візуалізації та симуляції обробки деталі (Simulate Toolpath). Цей етап є обов'язковою верифікацією (перевіркою) згенерованих траєкторій інструменту перед їх безпосереднім завантаженням на верстат з ЧПК у вигляді G-коду. Симуляція дозволяє уникнути поломки дорогого обладнання та інструменту.

Для запобігання виникненню аварійних ситуацій, поломки інструменту чи зарізів чистової геометрії деталі, у модулі SOLIDWORKS CAM було проведено комп'ютерну симуляцію траєкторії руху інструменту. Під час симуляції операції «Face Mill1» (інструмент T12 – торцева фреза 50 мм) було виконано візуальну перевірку траєкторій зняття припуску матеріалу заготовки (позначено коричневим кольором) до отримання чистових поверхонь деталі (позначено сірим кольором).

Завдяки активації функції контролю зіткнень (Collisions), програмне середовище підтвердило відсутність геометричних та кінематичних конфліктів між елементами верстата, інструментальним нарядженням та деталлю. Процес зняття шару матеріалу відповідає розробленому технологічному маршруту, що дозволяє перейти до фінального етапу – постпроцесування та генерації керуючої програми у G-кодах.

На рисунку 3.35 представлено результат симуляції траєкторії інструмента під час ЧПК-обробки кронштейна в САМ-системі. Візуалізація відображає контроль відхилень між номінальною геометрією деталі та поверхнею, сформованою внаслідок моделювання обробки.

Зелений колір поверхонь свідчить про відповідність отриманої геометрії номінальній моделі в межах заданого допуску. Шкала кольорів праворуч відображає величину відхилень від $-0,4$ мм до $+0,4$ мм. Теплі кольори (жовтий, помаранчевий, червоний) характеризують наявність надлишкового матеріалу або позитивного відхилення від номінального контуру, тоді як холодні кольори (блакитний та синій) вказують на надмірне зняття матеріалу або негативне

відхилення. Оскільки на більшості оброблених поверхонь спостерігається зелений колір, можна зробити висновок про коректність сформованої траєкторії інструмента та забезпечення необхідної точності обробки.

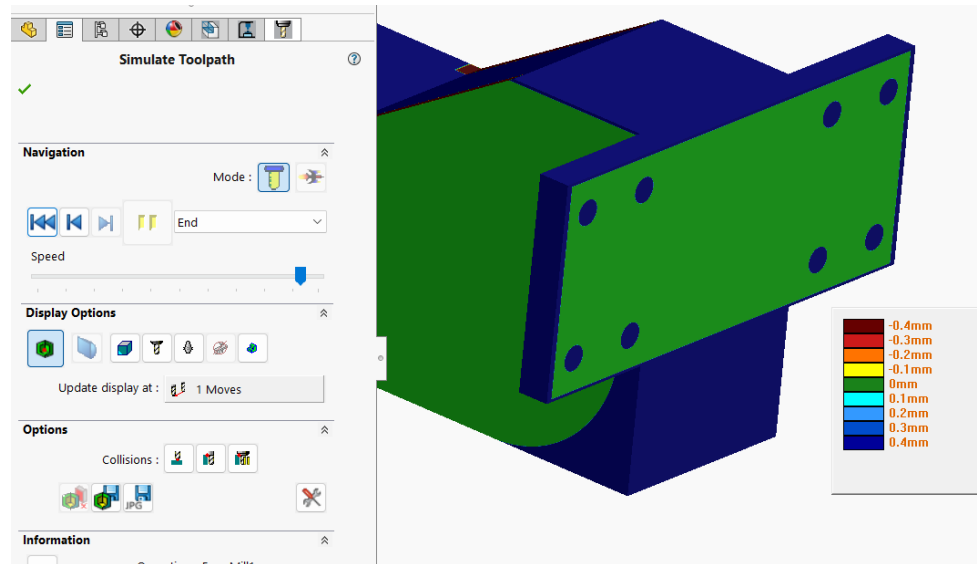


Рисунок 3.35 – Результати симуляції траєкторії інструмента та аналізу відхилень поверхні кронштейна після ЧПК-обробки.

У лівій частині вікна розташовані засоби керування симуляцією, які дозволяють запускати, зупиняти та покроково відтворювати процес обробки, регулювати швидкість відображення, а також контролювати можливі колізії між інструментом, заготовкою та елементами оснащення. Використання такого режиму моделювання дає можливість виявити потенційні помилки керуючої програми ще до її передачі на верстат з ЧПК, що знижує ризик браку та пошкодження обладнання.

Проектування операцій свердління отворів є важливим етапом підготовки керуючої програми для верстата з числовим програмним керуванням. Метою цього етапу є створення технологічно обґрунтованих траєкторій руху

інструмента, які забезпечують отримання отворів необхідного діаметра, глибини та точності при мінімальних витратах часу на обробку.

Процес починається з аналізу тривимірної моделі деталі та виявлення всіх отворів, які необхідно обробити. Для кожного отвору визначаються його геометричні характеристики: діаметр, глибина, просторове розташування, тип дна (наскрізне або глухе), а також вимоги до точності та шорсткості поверхні. На основі цих параметрів приймається рішення щодо послідовності виконання операцій і вибору різального інструмента.

Наступним етапом є автоматичне або ручне розпізнавання отворів у САМ-системі. Система аналізує геометрію моделі та формує список технологічних елементів, які можуть бути оброблені стандартними циклами свердління. Для груп отворів однакового діаметра створюються спільні операції, що дозволяє скоротити кількість переходів і оптимізувати переміщення інструмента.

Після визначення об'єктів обробки виконується вибір свердел відповідно до розмірів отворів та матеріалу деталі. Для кожного інструмента задаються параметри різання: швидкість обертання шпинделя, подача, глибина врізання, висота безпечного переміщення та режими відведення стружки. При обробці глибоких отворів можуть застосовуватися цикли переривчастого свердління, які забезпечують ефективне видалення стружки та охолодження інструмента.

Далі створюється операція свердління. У налаштуваннях операції задаються координати центрів отворів, порядок їх обробки, напрямок підходу інструмента та параметри технологічного циклу. Для груп отворів використовується автоматичне сортування траєкторій, що мінімізує холості переміщення та скорочує машинний час.

Після формування траєкторій виконується моделювання процесу обробки. САМ-система відображає рух інструмента, процес формування отворів та дозволяє контролювати можливі колізії між інструментом, деталлю та елементами

оснащення. На цьому етапі перевіряється правильність вибраних режимів різання та відповідність отриманої геометрії вимогам конструкторської документації.

Особлива увага приділяється оптимізації операцій. Якщо на деталі присутня значна кількість однакових отворів, застосовуються шаблони обробки та циклічні підпрограми, що спрощують структуру керуючої програми та зменшують її обсяг. Додатково аналізується можливість використання одного інструмента для виконання декількох переходів без зміни оснащення.

Завершальним етапом є постпроцесування та генерація керуючої програми. САМ-система перетворює побудовані траєкторії у G-код, адаптований до конкретної системи ЧПК. Після цього виконується фінальна верифікація програми та її підготовка до передачі на верстат.

У результаті проєктування операцій свердління формується оптимізований технологічний процес обробки отворів, який забезпечує необхідну точність виготовлення, високу продуктивність та безпечне виконання операцій на верстаті з числовим програмним керуванням.

Проілюструємо процес проєктування операцій свердління отворів.

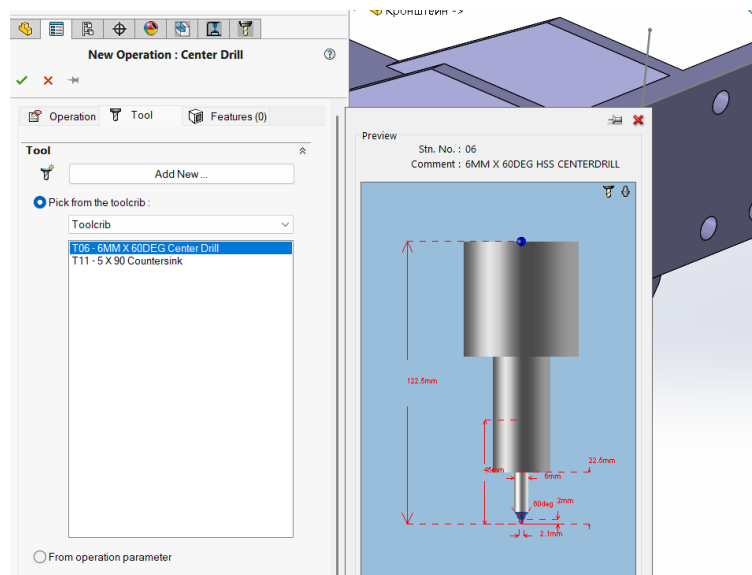


Рисунок 3.36 –Вибір інструменту у середовищі SOLIDWORKS CAM

На рисунку 3.36 зображено етап вибору та параметричного налаштування геометрії інструменту T06 для операції Center Drill у середовищі SOLIDWORKS CAM. Наступним етапом проектування комп'ютерно-інтегрованого технологічного процесу механічної обробки деталі є формування інструментального забезпечення для підготовки до отримання кріпильних отворів. На базі створеного раніше установка ініційовано нову технологічну операцію зацентрування отворів – «Center Drill».

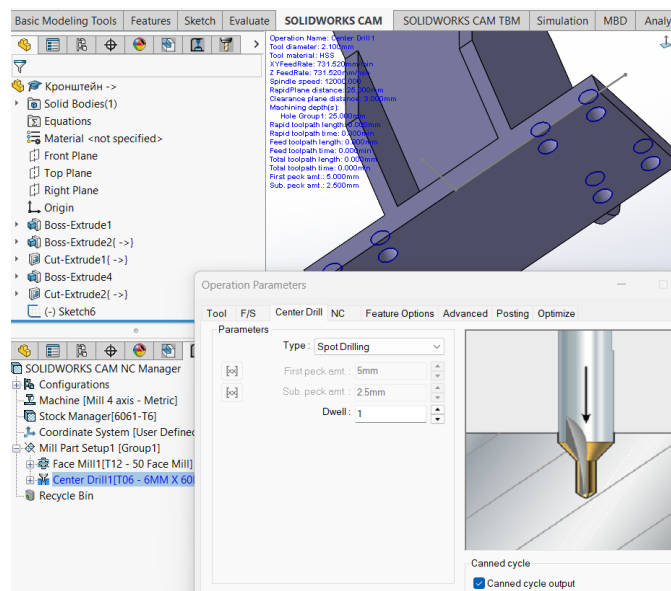


Рисунок 3.37 – Вікно налаштування параметрів циклу центрування (Operation Parameters) та розрахункових режимів різання операції Center Drill у середовищі SOLIDWORKS CAM

На зображенні 3.37 представлено крок розробки технологічного процесу в середовищі SOLIDWORKS CAM – налаштування параметрів технологічної операції центрування (Operation Parameters). На цьому етапі для обраного на попередньому кроці інструменту T06 задаються режими різання, глибина обробки та характер циклу переміщення шпинделя верстата з ЧПК. Для забезпечення

точності взаємного розташування осей кріпильних отворів на фланцях кронштейна було виконано параметризацію операції зацентрування «Center Drill1». У вікні параметрів операції (Operation Parameters) встановлено цикл типу «Spot Drilling» з витримкою інструменту в нижній точці торкання (Dwell) тривалістю 1 с для калібрування конічної фаски.

Забезпечено автоматичне виведення постійного циклу обробки (Canned cycle output) у майбутній G-код (кадр циклу G 82), що оптимізує структуру керуючої програми. На основі фізико-механічних властивостей матеріалу заготовки (алюміній 6061-T6) та геометрії інструменту T06 модулем САМ розраховано оптимальні режими різання: швидкість обертання шпинделя $n=12000$ об/хв, робоча вертикальна подача $S_z=731,52$ мм/хв та висота площини безпечного підводу інструменту 3 мм.

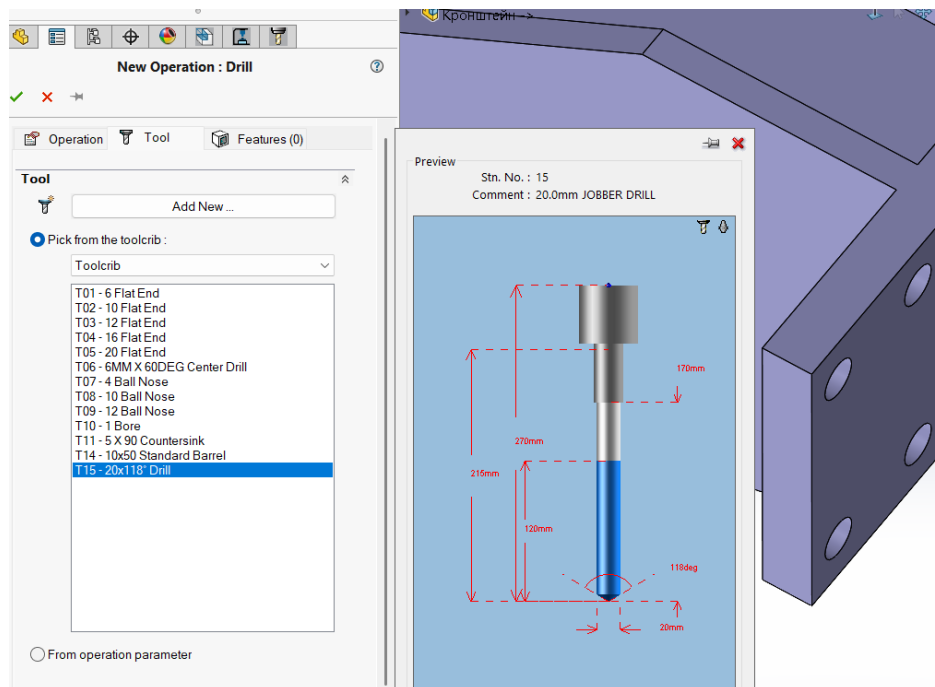


Рисунок 3.38 – Вікно вибору інструменту T15 (спіральне свердло $\varnothing 20$ мм, 118°) та верифікація його геометричних параметрів у модулі SOLIDWORKS CAM

Для виконання операції наскрізного свердління групи кріпильних отворів «Drill1» у середовищі SOLIDWORKS CAM було виконано підбір та геометричне моделювання різального інструменту. Обрано спіральне свердло середньої серії типу «Jobber Drill» діаметром 20 мм, якому присвоєно позицію в револьверній головці/магазині №15 (Т15). У діалоговому вікні попереднього перегляду (Preview) проведено параметризацію геометричних характеристик інструментального нарядження. Встановлено стандартний для обробки кольорових сплавів кут при вершині свердла $2\phi=118^\circ$, довжину робочої різальної частини 120 мм та виліт інструменту з патрона 215 мм. Внесення точних просторових параметрів тримача та свердла забезпечує коректну роботу алгоритму контролю зарізів та колізій (Collisions) під час розрахунку робочих та холостих ходів виконавчих органів верстата з ЧПК по осях X, Y, Z.

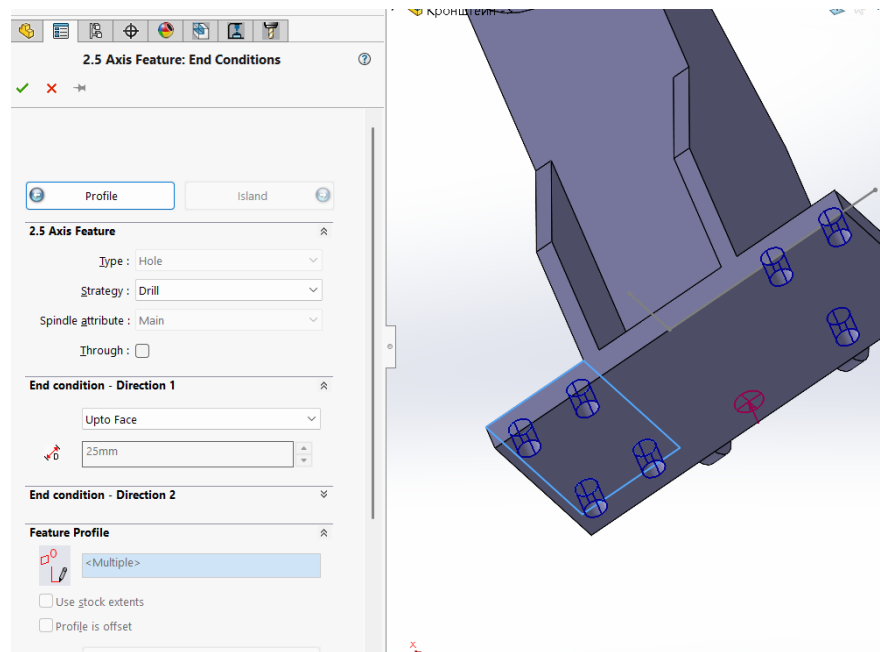


Рисунок 3.39 – Вікно параметризації граничних умов 2.5-осьового конструктивного елемента (End Conditions) для групи отворів фланця у середовищі SOLIDWORKS CAM

Для переходу до наступного етапу обробки – отримання масиву кріпильних отворів кронштейна – в автоматизованому модулі було виконано процедуру визначення геометричних та граничних умов конструктивних елементів. Системою ідентифіковано геометрію типу «Hole» із призначенням базової технологічної стратегії обробки «Drill». З метою забезпечення гнучкості та асоціативності проектування, для напрямку «Direction 1» було обрано граничну умову типу «Up to Face» (До поверхні). Програмний модуль автоматично зчитав товщину фланця з CAD-моделі, яка становить 25 мм, та сформував координатні вектори осевих ліній (візуалізовані синіми циліндричними контурами у графічній зоні) для групи отворів. Такий підхід виключає похибки ручного введення координат та є основою для подальшого автоматичного підбору різальних інструментів із бази даних і розрахунку циклів їх переміщення..

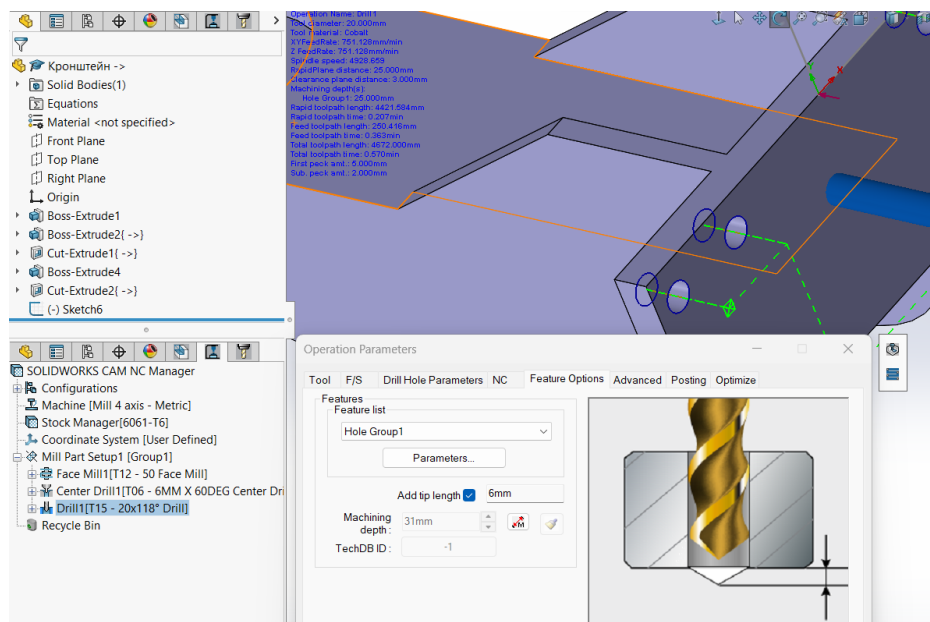


Рисунок 3.40 – Вікно вибору інструменту T15 та верифікація його геометричних параметрів у модулі SOLIDWORKS CAM

На рисунку 3.40 представлено п'ятий логічний крок розробки технологічного процесу в SOLIDWORKS CAM – налаштування параметрів операції глибокого (наскрізного) свердління отворів. Цей етап виконується відразу після попереднього зацентрування. На скріншоті показано процес визначення глибини свердління та врахування геометрії різальної кромки інструменту. На рисунку наочно проілюстровано фізику процесу: показано спіральне свердло в момент виходу з нижньої площини заготовки. Стрілками та розмірними лініями акцентовано увагу саме на вильоті кінчної вершини свердла, що відповідає активованій функції Add tip length.

Проектування обробки зовнішнього контуру базової плити кронштейна є важливим етапом розроблення технологічного процесу виготовлення деталі на верстаті з числовим програмним керуванням (див. рисунок 3.41 – 3.42). Метою операції є формування остаточних габаритних розмірів плити, забезпечення необхідної точності контурів та підготовка базових поверхонь для подальших технологічних переходів.

Процес починається з аналізу геометричної моделі кронштейна та визначення поверхонь, що утворюють зовнішній контур базової плити. На основі конструкторської моделі виділяються оброблювані грані, радіусні переходи, фаски та інші елементи, які повинні бути сформовані під час фрезерування. Одночасно оцінюються величини припусків, залишених після попередніх операцій або

Наступним етапом є вибір інструмента для контурної обробки. Залежно від товщини плити, матеріалу деталі та конфігурації контуру підбирається кінцева фреза відповідного діаметра. При цьому враховуються мінімальні внутрішні радіуси, доступність інструмента до окремих ділянок та необхідна продуктивність процесу.

Після вибору інструмента створюється операція контурного фрезерування. У САМ-системі автоматично формується траєкторія руху інструмента вздовж

зовнішнього профілю базової плити. Для забезпечення стабільності процесу задаються параметри врізання, напрямок обходу контуру, величина бокового перекриття та стратегія входу й виходу інструмента із зони різання.

Особлива увага приділяється розрахунку припусків на чорнову та чистову обробку. На чорновому етапі виконується видалення основного об'єму матеріалу із залишенням невеликого шару для остаточного проходу. Чистова обробка забезпечує досягнення необхідних геометричних розмірів, точності та якості поверхні зовнішнього контуру.

У випадку складної геометрії базової плити застосовується багатопрохідна обробка. САМ-система автоматично розраховує кількість проходів залежно від глибини різання та допустимого навантаження на інструмент. Це дозволяє зменшити вібрації, підвищити стійкість фрези та забезпечити стабільну якість поверхні.

Після побудови траєкторій виконується симуляція процесу обробки. Перевіряється правильність формування контуру, відсутність зіткнень інструмента із заготовкою або елементами оснащення, а також відповідність отриманих розмірів конструкторській моделі. Додатково аналізується залишковий матеріал і можливі необроблені ділянки.

Завершальним етапом є постпроцесування траєкторій та формування керуючої програми. САМ-система генерує G-код для конкретного верстата з ЧПК, у якому містяться команди переміщення інструмента, режими різання та допоміжні функції. Отримана програма проходить фінальну перевірку та передається на виробниче обладнання.

У результаті проектування обробки зовнішнього контуру базової плити кронштейна формується оптимальна траєкторія фрезерування, яка забезпечує отримання необхідних габаритних розмірів, високу точність геометрії та ефективне використання ресурсів верстата й різального інструмента.

отриманих у результаті використання заготовки (див. рисунок 3.41).

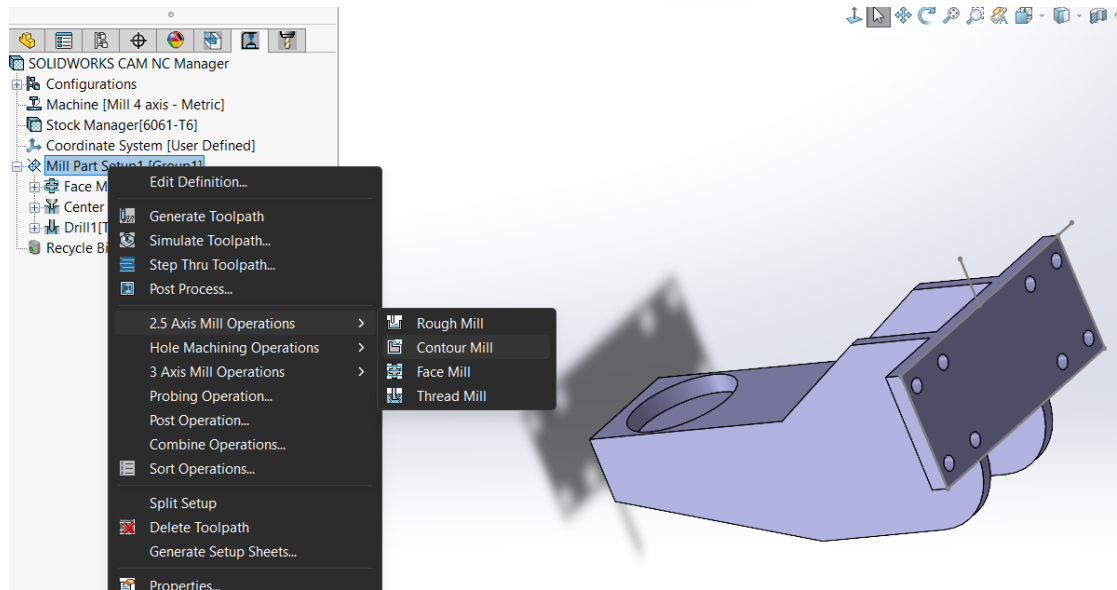


Рисунок 3.41 – Створення операції Contour Mill для обробки зовнішнього контуру базової плити кронштейна в середовищі SOLIDWORKS CAM.

На рисунку 3.41 показано етап створення операції Contour Mill у середовищі SOLIDWORKS CAM для обробки зовнішнього контуру базової плити кронштейна. Дана операція використовується для формування остаточних габаритних розмірів деталі шляхом фрезерування її зовнішнього профілю відповідно до конструкторської моделі. Після створення технологічного налаштування та визначення системи координат користувач обирає команду 2.5 Axis Mill Operations → Contour Mill, яка призначена для контурної обробки зовнішніх поверхонь. На цьому етапі система автоматично аналізує геометрію моделі та дозволяє вибрати ланцюжки контурів, що підлягають фрезеруванню.

У процесі налаштування операції визначаються оброблювані грані зовнішнього контуру базової плити, вибирається кінцева фреза необхідного діаметра та задаються технологічні параметри різання. До основних параметрів

належать частота обертання шпинделя, подача інструмента, глибина різання, величина бокового зміщення та припуск на чистову обробку.

Для забезпечення ефективного видалення матеріалу обробка зовнішнього контуру виконується у два етапи. На першому етапі проводиться чорнове контурне фрезерування, під час якого видаляється основний об'єм припуску із залишенням невеликого шару матеріалу. На другому етапі здійснюється чистове фрезерування, яке забезпечує досягнення необхідних геометричних розмірів, точності та якості поверхні.

Після вибору контуру система автоматично розраховує траєкторію руху інструмента вздовж зовнішнього профілю деталі. Для зменшення динамічних навантажень на інструмент використовуються плавні підходи та відходи від контуру, а також оптимізовані переходи між ділянками обробки.

На наступному етапі виконується генерація траєкторії (**Generate Toolpath**) та її віртуальна перевірка. Симуляція дозволяє оцінити правильність формування зовнішнього профілю, перевірити відсутність зіткнень інструмента із заготовкою та елементами оснащення, а також визначити залишковий матеріал після завершення обробки.

Після успішної верифікації здійснюється постпроцесування траєкторії, у результаті чого формується керуюча програма у форматі G-коду для конкретного верстата з ЧПК. Отримана програма використовується для виготовлення базової плити кронштейна із забезпеченням необхідної точності геометричних параметрів та високої якості оброблених поверхонь.

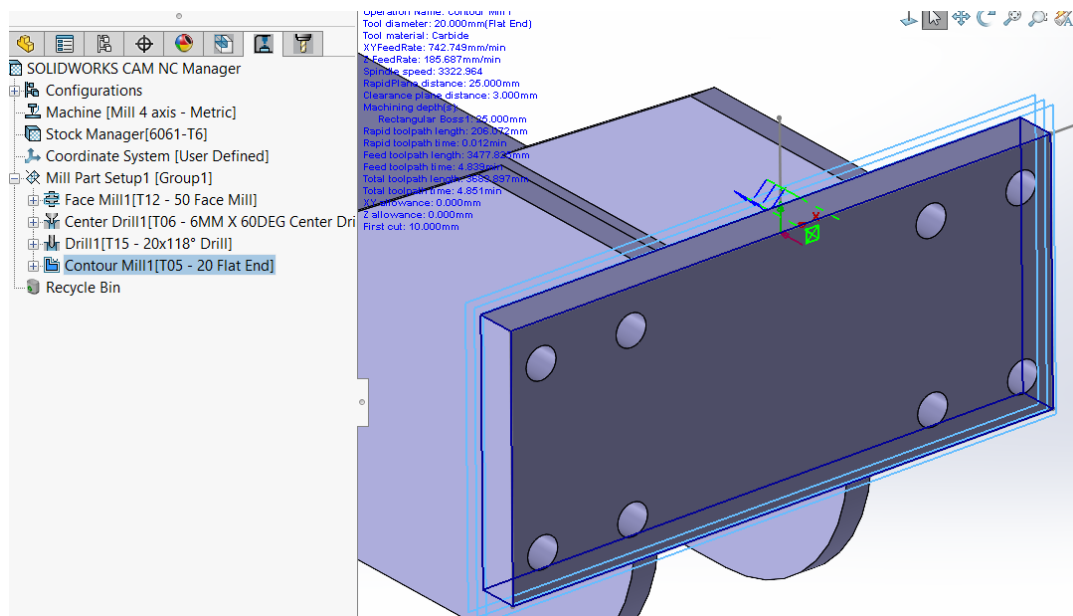


Рисунок 3.42 – Результат формування траєкторії інструмента для операції Contour Mill, призначеної для обробки зовнішнього контуру монтажної плити кронштейна

На рисунку наведено результат формування траєкторії інструмента для операції Contour Mill, призначеної для обробки зовнішнього контуру монтажної плити кронштейна. Після створення операції та генерації траєкторії SOLIDWORKS CAM відображає маршрут переміщення фрези, що дозволяє виконати попередню перевірку коректності обробки до формування керуючої програми.

Для виконання операції використовується кінцева циліндрична фреза діаметром 20 мм, яка забезпечує ефективне фрезерування прямолінійних ділянок контуру та формування необхідних габаритних розмірів плити. Система автоматично будує замкнену траєкторію навколо зовнішнього профілю деталі з урахуванням радіуса інструмента, припусків на обробку та заданої стратегії обходу контуру.

На екрані відображаються сині лінії траєкторії, які визначають послідовність руху інструмента під час виконання операції. Зовнішня траєкторія проходить вздовж контуру монтажної плити, забезпечуючи видалення припуску та формування остаточних геометричних розмірів поверхні. Точка входу інструмента вибрана таким чином, щоб мінімізувати навантаження на фрезу та уникнути утворення дефектів на відповідальних ділянках контуру. У верхній частині робочого вікна наведені основні параметри операції. Серед них діаметр інструмента, швидкість подачі, частота обертання шпинделя, глибина обробки, довжина траєкторії та орієнтовний машинний час виконання переходу. Ці параметри використовуються для оцінювання ефективності технологічного процесу та подальшої оптимізації режимів різання. Особливістю даної операції є те, що контурна обробка виконується після завершення операцій свердління отворів та фрезерування базових поверхонь.

Візуальний контроль послідовності обробки – це метод перевірки правильності виконання технологічних операцій, при якому оператор або система спостерігає за черговістю та якістю виконання переходів обробки деталі (див. рисунок 3.43 – 3.47)

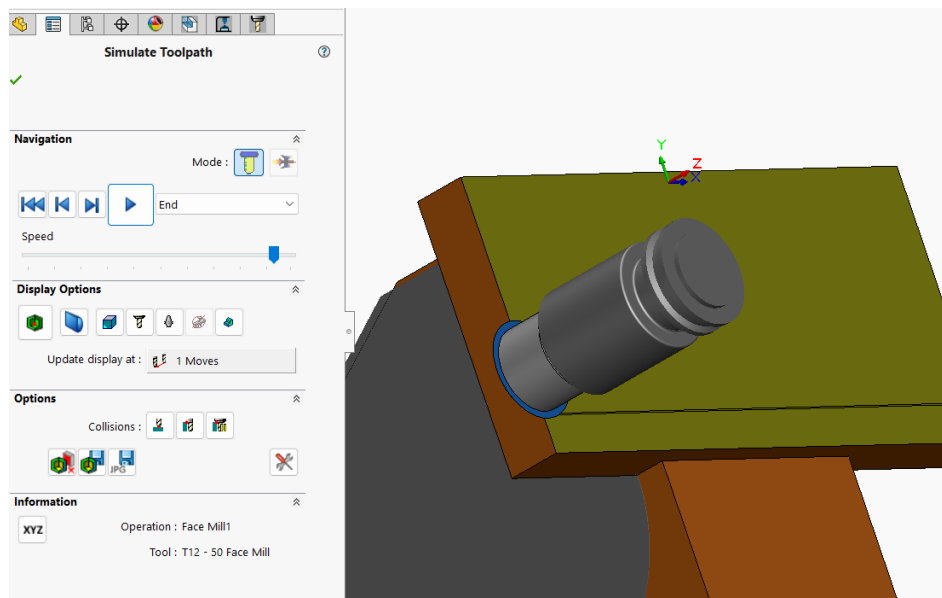


Рисунок 3.43 – Обробка площини

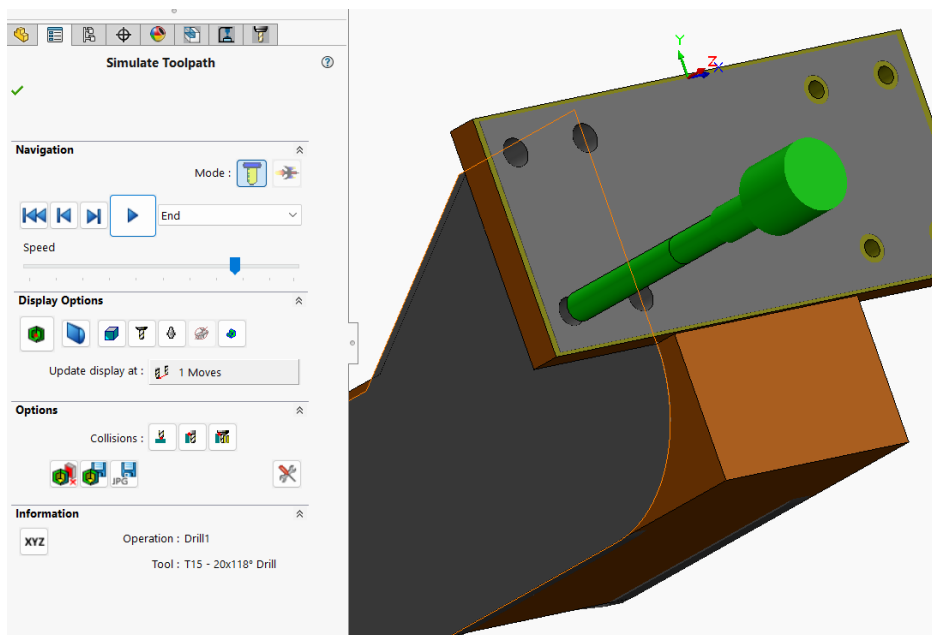


Рисунок 3.44 – Центрування отворів

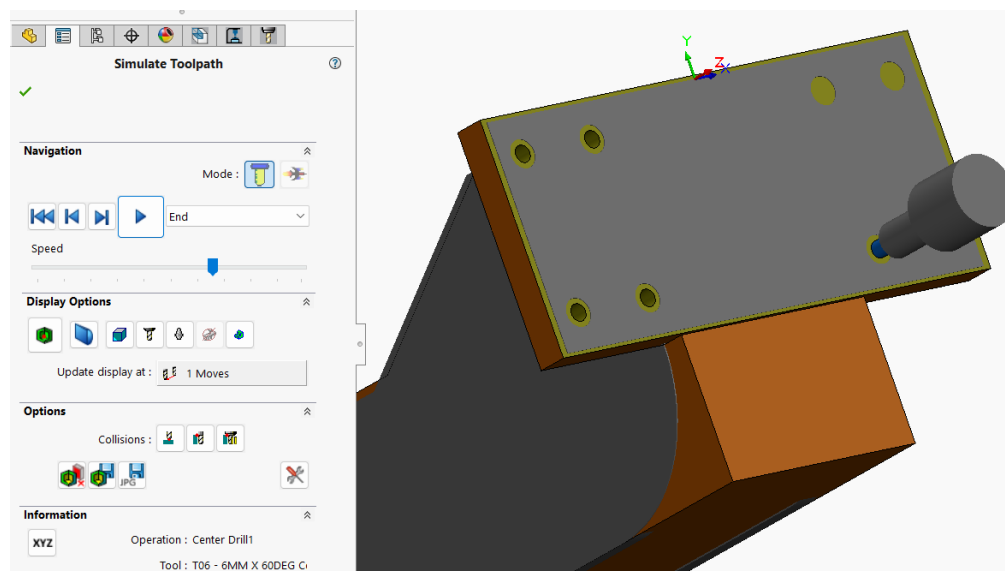


Рисунок 3.45 – Свердління отворів

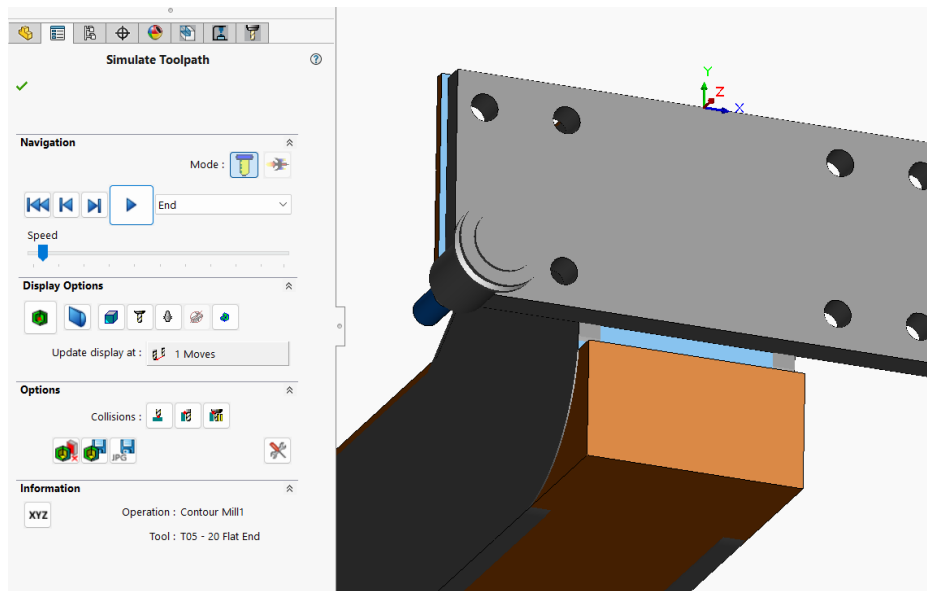


Рисунок 3.46 – Обробка зовнішнього контуру базової плити кронштейна

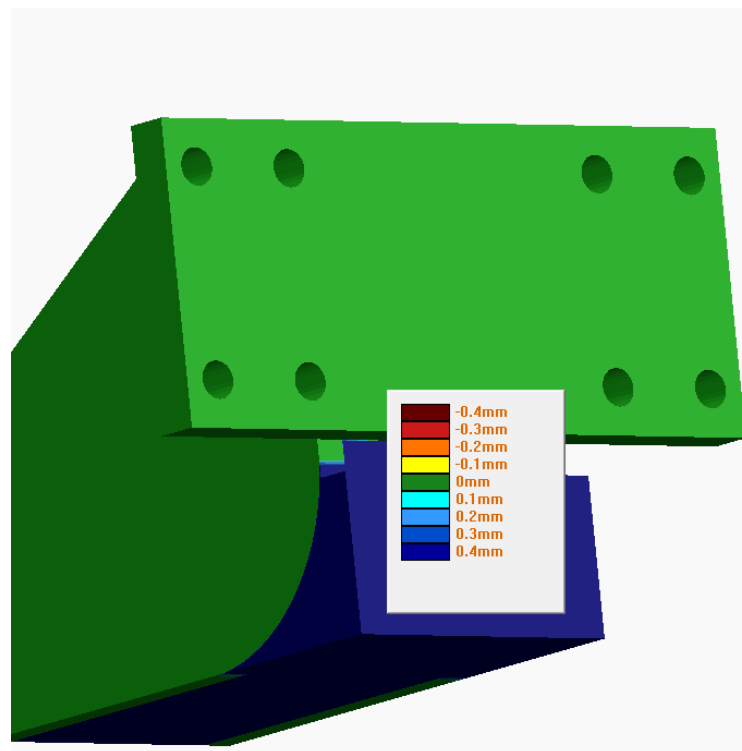


Рисунок 3.47 – Контроль залишкового припуску

У виробничих процесах (зокрема в механічній обробці на верстатах з ЧПК) він використовується для підтвердження того, що всі операції виконуються відповідно до технологічного маршруту: від базування заготовки до завершальних переходів (свердління, фрезерування, розточування тощо).

Основні аспекти візуального контролю послідовності обробки:

- Перевірка правильності маршруту обробки – оператор контролює, чи виконується кожна операція у заданій технологічній черзі.
- Спостереження за зміною інструментів – візуально підтверджується коректність заміни інструментів згідно з програмою ЧПК.
- Контроль базування та закріплення заготовки – оцінюється правильність установки перед початком обробки.
- Виявлення відхилень у процесі – наприклад, пропуск операції, неправильний рух інструмента або некоректна траєкторія.
- Контроль проміжних станів деталі – порівняння фактичного стану з очікуваним після кожного етапу.

У сучасних CAD/CAM та ЧПК-системах цей контроль часто доповнюється симуляцією обробки (digital twin), 3D-візуалізацією траєкторій інструменту, системами машинного зору та датчиками стану верстата.

Візуальний контроль послідовності обробки забезпечує підвищення надійності технологічного процесу, зниження ймовірності браку та помилок програмування ЧПК.

Генерація коду керуючої програми – це етап автоматизованого формування програми для верстатів з ЧПК (найчастіше у вигляді G-коду), який виконується на основі 3D-моделі деталі та заданого технологічного процесу обробки.

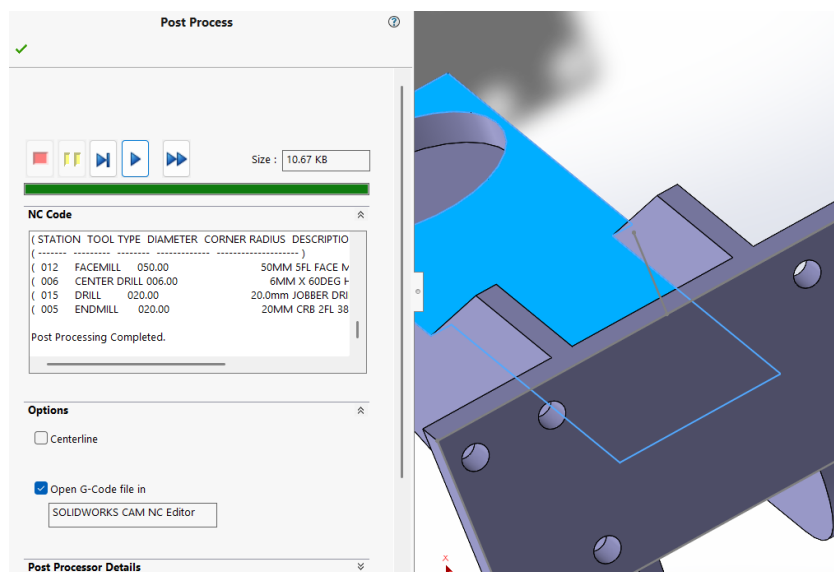


Рисунок 3.48 – Виконання процедури пост процесорної обробки генерації коду керуючої програми

Виконання процедури постпроцесорної обробки генерації коду керуючої програми – це завершальний етап у CAD/CAM-підготовці виробництва, під час якого універсальні траєкторії руху інструмента перетворюються у конкретний машинозалежний керуючий код (G-код) для певного верстата з ЧПК. На цьому етапі САМ-система не просто формує траєкторію, а адаптує її під кінематичні особливості та мову конкретного обладнання (Fanuc, Siemens, Heidenhain тощо).

Основні етапи постпроцесорної обробки:

Аналіз САМ-даних траєкторій інструмента – використання CL-data (cutter location data), які містять координати та параметри руху інструмента.

Врахування кінематики верстата – тип (3-осьовий, 4-осьовий, 5-осьовий), обмеження переміщень, напрямки осей.

Конвертація у G/M-коди – перетворення універсальних команд у специфічний синтаксис ЧПК-системи.

Встановлення технологічних параметрів – швидкість подачі, оберти шпинделя, зміна інструментів.

Формування структури програми – блоки ініціалізації, обробки та завершення циклу.

Оптимізація коду – видалення зайвих рухів, скорочення холостих переміщень, згладжування траєкторій.

Контроль сумісності з верстатом – перевірка відповідності синтаксису та обмежень конкретної системи керування.

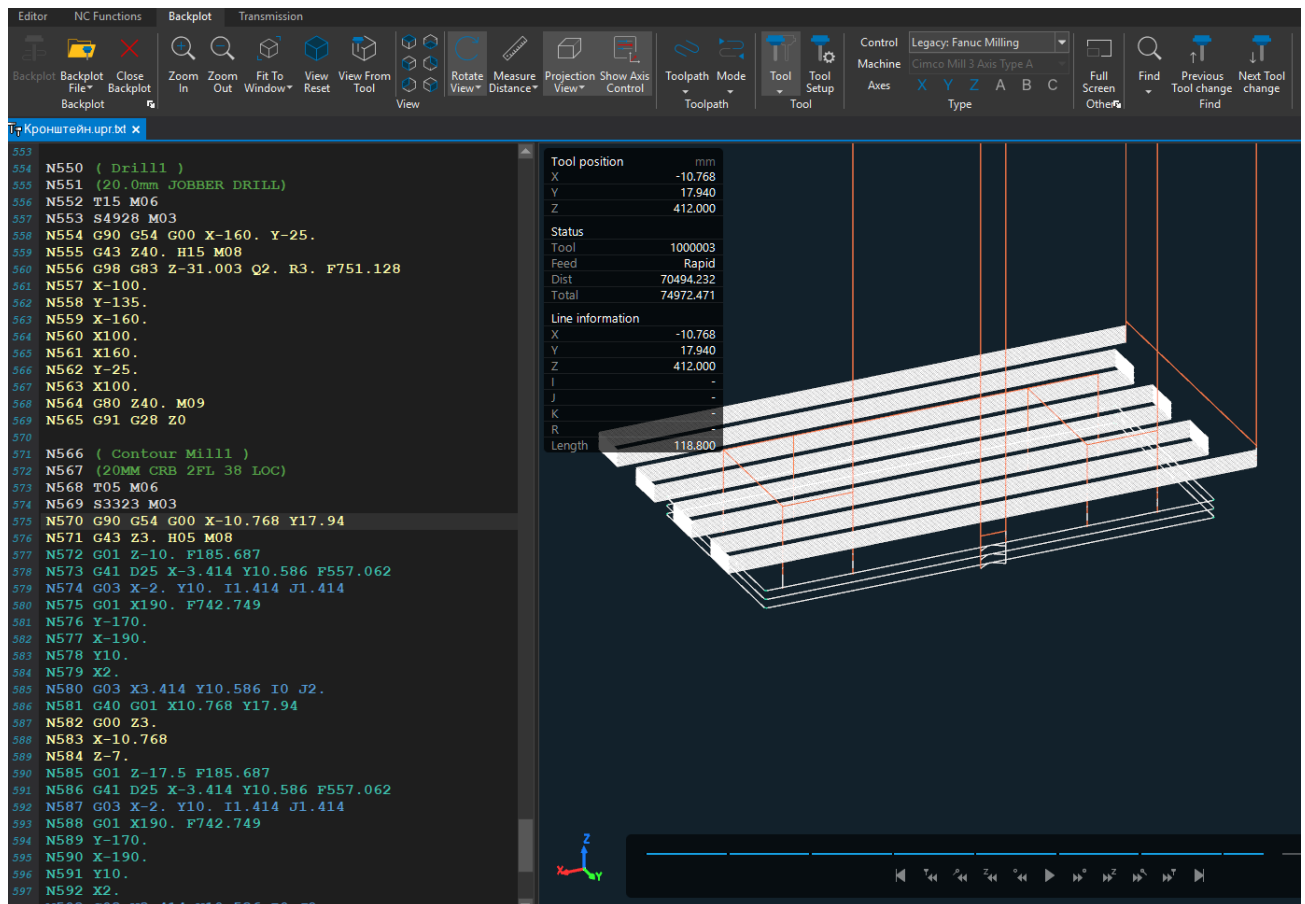


Рисунок 3.49 – Контроль керуючої програми за межами середовища SOLIDWORKS

Контроль керуючої програми за межами середовища SOLIDWORKS – це етап перевірки та верифікації згенерованого G-коду після його експорту з

CAD/CAM-системи, який виконується у зовнішніх програмних середовищах або безпосередньо на рівні ЧПК-симуляторів і виробничого обладнання.

На відміну від внутрішньої симуляції SOLIDWORKS CAM, зовнішній контроль дозволяє оцінити коректність програми з урахуванням реальних умов роботи верстата та його системи керування.

Основні завдання такого контролю:

- Перевірка синтаксису G/M-коду – відповідність стандарту конкретної ЧПК-системи (Fanuc, Siemens, Heidenhain тощо).
- Виявлення логічних помилок у програмі – неправильна послідовність команд, відсутність скасування циклів, помилки переходів.
- Аналіз траєкторії руху інструмента – перевірка відсутності зіткнень, перевищення подач або некоректних переміщень.
- Перевірка технологічної коректності – відповідність режимів різання матеріалу та інструменту.
- Імітація роботи на віртуальному ЧПК-верстаті – моделювання обробки з урахуванням реальної кінематики обладнання.
- Оптимізація програми – усунення зайвих переміщень та підвищення ефективності обробки.

Для такого контролю використовуються зовнішні програмні середовища, наприклад, NC Viewer або CIMCO Edit (перегляд і редагування G-коду), Vericut або NCSIMUL (повноцінна симуляція обробки), вбудовані симулятори ЧПК-систем.

Практичне значення етапу полягає в тому, що він дозволяє запобігти аваріям обладнання (зіткнення інструмента з деталлю або пристроєм), зменшити кількість браку, скоротити час налагодження програми на верстаті, підвищити надійність переходу від САМ-моделі до виробництва.

Контроль керуючої програми за межами SOLIDWORKS є критично важливим етапом перевірки, який забезпечує безпечне та коректне виконання обробки на реальному обладнанні з ЧПК.

У системах CAD/CAM цей процес є завершальним кроком технологічної підготовки виробництва і включає перетворення траєкторій інструмента, розрахованих програмним забезпеченням, у машинно-читаний код.

Основні етапи генерації керуючої програми:

- Імпорт геометрії деталі з CAD-системи (3D-модель або креслення).
- Вибір заготовки та базування (визначення системи координат).
- Призначення операцій обробки (фрезерування, свердління, розточування тощо).
- Вибір інструментів і режимів різання (швидкість, подача, глибина різання).
- Побудова траєкторій руху інструмента у CAM-системі.
- Постпроцесування (post-processing) — перетворення траєкторій у G-код, сумісний з конкретним верстатом ЧПК.
- Перевірка та симуляція програми перед запуском на обладнанні.

Створення 3D моделі стало базовим етапом практичного дослідження, який забезпечив основу для автоматизованої генерації керуючих програм та симуляції процесу оброблення.

3.3 Порівняння результатів ручного та автоматизованого програмування

Для оцінки ефективності використання CAD/CAM систем було проведено порівняльний аналіз двох підходів: традиційного ручного програмування та автоматизованого програмування у CAD/CAM середовищі. Основними

критеріями стали час підготовки програми, точність оброблення та ресурсозатратність.

Таблиця 3.2 – Порівняння ручного та автоматизованого програмування ЧПК

Критерій	Ручне програмування	Автоматизоване програмування
Час підготовки програми	6–8 годин (залежно від складності деталі)	2–3 години (завдяки автоматизації та оптимізації)
Кількість помилок	Висока ймовірність (до 5–7 помилок на програму)	Мінімальна (1–2 помилки, виявлені на етапі симуляції)
Точність оброблення	Відхилення до $\pm 0,2$ мм	Відхилення до $\pm 0,05$ мм
Ресурсозатратність	Висока (значні витрати часу та інструментів)	Низька (оптимізація траєкторій та режимів різання)
Гнучкість внесення змін	Вимагає переписування значної частини програми	Зміни вносяться швидко завдяки параметричному моделюванню
Економічний ефект	Витрати на підготовку значно вищі	Скорочення витрат на 30-40%

Автоматизоване програмування у CAD/CAM системах забезпечує скорочення часу підготовки програм у 2–3 рази, підвищує точність оброблення та зменшує кількість браку. Використання симуляції дозволяє виявляти помилки до запуску виробництва, що мінімізує ризики. Оптимізація траєкторій інструментів сприяє економії ресурсів і зниженню собівартості продукції. У результаті CAD/CAM системи демонструють суттєві переваги над традиційним ручним програмуванням і є доцільними для впровадження на сучасних машинобудівних підприємствах.

На основі проведеного дослідження можна сформулювати низку практичних рекомендацій для підприємств машинобудівної галузі, які прагнуть ефективно інтегрувати CAD/CAM системи у процеси підготовки виробництва.

Необхідно забезпечити сумісність CAD/CAM систем із наявним обладнанням ЧПК, що дозволить уникнути проблем на етапі інтеграції. Важливим

є використання міжнародних стандартів обміну даними (ISO 10303 STEP, STEP-NC), які гарантують коректну взаємодію різних програмних продуктів. Окрему увагу слід приділити підготовці персоналу: ефективність системи безпосередньо залежить від кваліфікації користувачів, їхнього розуміння принципів параметричного моделювання та автоматизованого програмування.

Впровадження CAD/CAM технологій забезпечує скорочення часу підготовки програм у 2-3 рази, зменшення кількості помилок у 4-5 разів завдяки використанню симуляції, а також оптимізацію траєкторій інструментів, що знижує витрати на матеріали та інструменти на 20-30%.

Подальший розвиток CAD/CAM систем пов'язаний із їх інтеграцією у концепцію цифрових двійників, що дозволяє прогнозувати результати виробництва ще на етапі проектування. Використання алгоритмів штучного інтелекту відкриває можливості для автоматичної оптимізації технологічних процесів. Перехід на хмарні платформи забезпечує спільну роботу інженерів і технологів у режимі реального часу, а розширене застосування симуляційних моделей дозволяє оцінювати надійність та довговічність виробів. Застосування CAD/CAM систем у виробничих процесах дозволяє підприємствам не лише підвищити ефективність та якість продукції, але й забезпечити стійкість у кризових умовах, зокрема в умовах воєнної економіки України, що створює основу для подальшої цифрової трансформації та інтеграції у концепцію Industry 4.0.

Висновки до розділу 3

У ході практичного дослідження було реалізовано повний цикл автоматизації програмування верстата з ЧПК у CAD/CAM середовищі: від

створення тривимірної моделі деталі до симуляції процесу оброблення та порівняння результатів із традиційним ручним програмуванням.

Основні результати дослідження:

- створення 3D-моделі забезпечило точне відтворення геометрії деталі типу кронштейн, що стало базою для подальшої генерації керуючої програми;
- генерація керуючої програми у САМ-модулі дозволила автоматично сформувати G-код з урахуванням параметрів інструментів та режимів різання, що скоротило час підготовки виробництва;
- порівняння ручного та автоматизованого програмування показало, що автоматизація скорочує час підготовки програм у 2-3 рази, зменшує кількість помилок у 4-5 разів та підвищує точність оброблення до рівня $\pm 0,05$ мм;
- практичні рекомендації підтвердили доцільність впровадження CAD/CAM систем у виробничі процеси, оскільки вони забезпечують економію ресурсів, зниження собівартості та підвищення конкурентоспроможності підприємств.

Використання CAD/CAM систем дозволяє скоротити витрати на підготовку виробництва на 30–40%, зменшити кількість браку та оптимізувати використання інструментів і матеріалів. Практичне дослідження підтвердило, що CAD/CAM системи є ефективним інструментом цифрової трансформації виробництва. Їх застосування забезпечує високу точність, швидкість та надійність процесів програмування ЧПК, що робить їх доцільними для впровадження на сучасних машинобудівних підприємствах України, особливо в умовах воєнної економіки та обмежених ресурсів.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці

Організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці охоплюють сукупність законодавчих норм, нормативно-правових актів і організаційних заходів, що регулюють питання охорони праці на підприємстві. Вони спрямовані на запобігання виробничому травматизму та професійним захворюванням, забезпечення безпечних умов праці, а також визначають права, обов'язки й відповідальність роботодавців і працівників у сфері безпеки праці. Важливими складовими є організація навчання та інструктажів з охорони праці, проведення оцінювання професійних ризиків і контроль за дотриманням вимог безпеки. Реалізація цих заходів сприяє збереженню життя, здоров'я та працездатності працівників.

У сучасних умовах розвитку виробничих технологій важливим завданням є забезпечення безпечної експлуатації верстатів з числовим програмним керуванням при використанні автоматизованих систем підготовки програм. Використання CAD/CAM-систем значно підвищує ефективність процесів проектування та виготовлення деталей [7; 10; 11], проте водночас змінює характер ризиків, що потребує системного підходу до охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

4.2 Характеристика об'єкта та виявлення потенційних небезпек

Постановка завдання даного розділу полягає у визначенні комплексу заходів, спрямованих на забезпечення відповідності умов праці вимогам чинних нормативно-правових актів України, зокрема Закону України «Про охорону

праці» та Кодексу цивільного захисту України [12], а також міжнародних стандартів у сфері безпеки праці, таких як ISO 45001:2018 та ISO 14649:2003 [21; 26]. Важливим є ідентифікація та систематизація потенційних небезпек, що виникають у процесі автоматизації програмування ЧПК [9; 13], розробка підходів до їх мінімізації шляхом застосування організаційних, технічних та програмних рішень [24; 31], а також формування культури безпечної роботи серед інженерно-технічного персоналу та операторів верстатів [8; 14].

Ідентифікування потенційних небезпек розглядається як початковий етап системи управління ризиками [30; 33], що забезпечує методологічну основу для їх подальшого аналізу та оцінки. У контексті використання CAD/CAM-систем можна виділити кілька ключових груп небезпек. До механічних факторів належать контакт із рухомими частинами верстата, утворення стружки та уламків інструменту, що можуть спричинити травмування [1; 3; 18]. Електротехнічні ризики пов'язані з можливістю ураження електричним струмом у разі несправності систем живлення чи порушення ізоляції [6; 26]. Програмні ризики виникають унаслідок помилок у CAD-моделі або CAM-постпроцесорі, що здатні призвести до некоректної траєкторії інструмента та аварійної ситуації [7; 11; 19]. Пожежонебезпечні фактори охоплюють перегрів електродвигунів, іскроутворення при обробці металів та накопичення мастильно-охолоджувальних рідин [15; 17; 20]. Нарешті, психофізіологічні фактори безпеки включають перевтому оператора, зниження концентрації уваги та стресові умови роботи, що підвищують ймовірність помилок [9; 14].

Таким чином, постановка завдання та ідентифікація небезпек формують методологічну основу для подальшого аналізу та оцінки ризику. Це дозволяє забезпечити комплексний підхід до охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях у процесі автоматизації підготовки програм ЧПК, що відповідає

сучасним вимогам виробничої практики, законодавства України та міжнародних стандартів.

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

Аналіз та оцінка ризику у виробничих процесах, що використовують CAD/CAM-системи для автоматизації програмування верстатів з ЧПК, є важливим етапом управління охороною праці та безпекою. Він передбачає визначення ймовірності виникнення небезпечних ситуацій та оцінку їхнього потенційного впливу на персонал, обладнання й кінцевий результат виробництва [30; 33]. У сучасній практиці машинобудування цей процес спирається на міжнародні стандарти, зокрема ISO 31000 «Risk management – Guidelines» та ISO 45001:2018 «Occupational health and safety management systems» [21; 26], що задають методологічні рамки для системного підходу до управління ризиками.

Застосування CAD/CAM-систем змінює характер небезпек. Поряд із традиційними механічними та електротехнічними факторами виникають програмні та організаційні ризики. Наприклад, некоректне налаштування траєкторії інструмента може призвести до травмування оператора або пошкодження обладнання [1; 3; 18], тоді як відмови систем живлення здатні спричинити аварійні зупинки виробничого процесу [6; 26]. Помилки у CAD-моделі чи CAM-постпроцесорі створюють загрозу некоректної роботи верстата, що може мати серйозні наслідки для якості продукції та безпеки персоналу [7; 11; 19]. Водночас недостатня кваліфікація працівників або відсутність належних інструкцій підвищують імовірність виникнення організаційних ризиків [8; 14]. Не менш важливими залишаються

пожежонебезпечні фактори, пов'язані з перегрівом обладнання та накопиченням мастильно-охолоджувальних рідин [15; 17; 20].

Оцінка ризику здійснюється шляхом визначення рівня небезпеки за шкалою «низький – середній – високий». Це дозволяє обґрунтувати пріоритетність заходів безпеки та спрямувати ресурси на найбільш критичні аспекти. Так, програмні ризики мають високу ймовірність виникнення, але середню тяжкість наслідків, тоді як механічні ризики характеризуються середньою ймовірністю та високою тяжкістю наслідків [30; 33]. Подібна класифікація дає змогу розробити ефективні заходи управління безпекою, які враховують специфіку автоматизованих виробничих процесів.

У практиці машинобудування для аналізу ризиків застосовуються сучасні методики, зокрема матричний підхід (Risk Assessment Matrix), що співвідносить ймовірність виникнення події з тяжкістю її наслідків [31; 35]. Крім того, методика FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) дозволяє виявити можливі відмови у програмному забезпеченні та обладнанні, а HAZOP-аналіз використовується для дослідження складних технологічних систем, включаючи інтеграцію CAD/CAM у виробничі процеси [24; 32].

Таким чином, аналіз та оцінка ризику – це комплексний процес, що поєднує ідентифікацію небезпек, їх дослідження, класифікацію та розробку заходів управління. Він створює основу для подальшого розгляду питань безпеки у надзвичайних ситуаціях, забезпечуючи системний підхід до охорони праці у процесі автоматизації підготовки програм ЧПК.

Відповідно до Кодексу цивільного захисту України, надзвичайна ситуація – це обстановка на окремій території чи об'єкті, спричинена аварією, катастрофою, стихійним лихом або іншою небезпечною подією, яка призводить чи може призвести до загибелі людей, значних матеріальних втрат або порушення нормальних умов життєдіяльності населення [12]. У виробничих процесах, що

використовують CAD/CAM-системи та верстати з ЧПК, надзвичайні ситуації можуть бути пов'язані як із технічними відмовами обладнання, так і з програмними помилками чи людським фактором.

Важливим аспектом є визначення відповідальних осіб. Згідно із Законом України «Про охорону праці» та Кодексом цивільного захисту, керівник підприємства, служба охорони праці та безпосередні керівники виробничих підрозділів несуть основну відповідальність за створення безпечних умов праці та організацію дій у випадку надзвичайних ситуацій. Працівники, у свою чергу, зобов'язані дотримуватися правил безпеки, брати участь у навчаннях та виконувати інструкції, що формує колективну відповідальність за охорону праці.

Система забезпечення безпеки включає проведення інструктажів та навчання з охорони праці. Вступний інструктаж ознайомлює працівників із загальними правилами безпеки, первинний інструктаж формує навички безпечної роботи на конкретному робочому місці, а цільовий готує персонал до дій у випадках аварій чи надзвичайних ситуацій. Періодично працівники проходять навчання з охорони праці (не рідше одного разу на три роки). Така багаторівнева система забезпечує реальну готовність персоналу до дій у критичних умовах.

Забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях ґрунтується на нормативно-правових вимогах та міжнародних стандартах, зокрема ISO 45001:2018 [21; 26]. Важливим є формування системи превентивних заходів: регулярний інструктаж, навчання персоналу, розробка планів евакуації, створення резервних алгоритмів у CAD/CAM-середовищах для запобігання аварійним режимам роботи.

Практика сучасних підприємств машинобудування підтверджує ефективність комплексного підходу. Використання систем моніторингу стану обладнання дозволяє своєчасно виявляти перегрів електродвигунів чи критичні вібрації [1; 3; 18]. Технології цифрових двійників дають змогу моделювати

можливі сценарії надзвичайних ситуацій та прогнозувати їхні наслідки [30; 33]. Додатково резервні системи живлення та автоматичне відключення обладнання у випадку аварії значно знижують ризик масштабних пошкоджень [6; 26].

Не менш важливим є врахування людського фактору. Перевтома, стрес або недостатня кваліфікація працівників можуть стати причиною помилок, що призводять до аварійних ситуацій [8; 14]. Тому підприємства впроваджують тренінги та навчання, які моделюють дії у випадку надзвичайних ситуацій, а також розробляють плани евакуації персоналу під час пожежі чи аварії, що підвищує психологічну готовність колективу до дій у критичних умовах.

Таким чином, безпека у надзвичайних ситуаціях у процесі автоматизації підготовки програм ЧПК базується на поєднанні законодавчих норм, сучасних технологій, системи інструктажів та навчання працівників. Це формує комплексний підхід, який забезпечує не лише реагування на аварії, але й їх ефективне попередження, створюючи умови для стабільної та безпечної роботи виробничих систем.

Висновки до розділу 4

Розділ «Охорона праці» узагальнює ключові аспекти забезпечення безпеки у процесі автоматизації підготовки програм для верстатів з числовим програмним керуванням із використанням CAD/CAM-систем. Розкрито постановку завдання та ідентифікацію потенційних небезпек, здійснено аналіз і оцінку ризиків, а також розглянуто питання організації безпеки у надзвичайних ситуаціях.

Ідентифікація небезпек дала змогу визначити основні фактори ризику, що виникають у виробничих процесах (механічні, електротехнічні, програмні, пожежонебезпечні та психофізіологічні). Їх систематизація створила методологічну основу для подальшого аналізу. Оцінка ризиків, проведена

відповідно до міжнародних стандартів ISO 31000 та ISO 45001:2018, дозволила визначити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій та тяжкість їхніх наслідків, що забезпечує обґрунтоване планування заходів безпеки. Використання сучасних методик, таких як Risk Assessment Matrix, FMEA та HAZOP, підтвердило ефективність системного підходу до управління ризиками у виробничих процесах. Особливу увагу приділено організації безпеки у надзвичайних ситуаціях. Законодавче визначення надзвичайної ситуації стало основою для аналізу практичних заходів, які застосовуються на підприємствах. Було зазначено відповідальних осіб за охорону праці, охарактеризовано систему інструктажів та навчання персоналу, а також наведено приклади технічних і організаційних рішень, що забезпечують готовність колективу до дій у критичних умовах. Важливим доповненням є врахування людського фактору, адже психологічна стійкість і дисципліна працівників суттєво впливають на рівень безпеки виробничого процесу.

Таким чином, розділ 4 демонструє, що охорона праці та цивільний захист у процесі автоматизації програмування ЧПК є багаторівневою системою, яка поєднує законодавчі норми, міжнародні стандарти, сучасні технології та організаційні заходи. Комплексний підхід забезпечує не лише реагування на небезпечні події, але й їх ефективне попередження, створюючи умови для стабільної, безпечної та результативної роботи виробничих систем.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі здійснено комплексне дослідження процесів автоматизації програмування верстатів з числовим програмним керуванням у середовищі CAD/CAM. Результати підтвердили, що сучасні системи комп'ютерного проектування та виробництва є ключовим інструментом цифрової трансформації машинобудівних підприємств, забезпечуючи інтеграцію високоточного моделювання з реальними технологічними процесами.

Основні результати дослідження:

Створення тривимірної моделі забезпечило точне відтворення геометрії деталі та стало базою для подальшої автоматизації виробничих процесів.

Генерація G-коду у CAM-модулі дозволила скоротити час підготовки програм у 2-3 рази та підвищити точність оброблення до рівня $\pm 0,05$ мм.

Порівняння ручного та автоматизованого програмування засвідчило переваги CAD/CAM систем: зменшення кількості помилок у 4-5 разів, скорочення витрат на підготовку виробництва на 30-40% та підвищення якості кінцевої продукції.

Практичні рекомендації підтвердили доцільність їх впровадження у виробничі процеси, особливо в умовах воєнної економіки України, де ефективність використання ресурсів та зниження собівартості продукції мають стратегічне значення.

Робота доводить, що використання CAD/CAM систем дозволяє інтегрувати процеси проектування та виробництва в єдине цифрове середовище, забезпечуючи новий рівень автоматизації підготовки виробництва. Вперше у дослідженні акцентовано на комплексному поєднанні моделювання, генерації програм та симуляції як єдиного циклу цифрового виробництва.

Отримані результати мають прикладне значення для машинобудівних підприємств України. Впровадження CAD/CAM технологій забезпечує економію

ресурсів, зниження собівартості продукції, підвищення точності та конкурентоспроможності виробництва, що особливо важливо в умовах воєнної економіки та обмежених ресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойко Ю.І., Литвиненко О.А., Яновський В.А. Оцінка впливу режимів різання на вібрацію розточувального різця і точність оброблених отворів на верстатах з ЧПК // Технічна інженерія. – 2020. – № 2(86). – С. 34–40. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-34-40](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-34-40) (дата звернення: 28.04.2026).
2. Бондаренко Т.В., Шевченко О.М. Інтеграція CAD/CAM систем у виробничі процеси підприємств машинобудування // Вісник ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. – 2023. – № 118. – С. 56–63. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://repository.kname.edu.ua/handle/123456789/118> (дата звернення: 28.04.2026).
3. Виговський Г.М., та ін. Дослідження вібрацій при різанні сталі комбінованим інструментом // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – № 2.
4. Гушин К.С., Дербаба В.А. CAD/CAM системи в конструкторсько-технологічній підготовці виробництва // Матеріали XI Міжнародної конференції «Молодь: наука та інновації». – Дніпро, 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dnu.dp.ua> (дата звернення: 28.04.2026).
5. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 16 с.
6. ДСТУ ISO 10303-1:2007. Системи автоматизації виробництва та їх інтеграція. Представлення даних про вироби та обмін цими даними. Частина 1. Загальні положення та основи. – Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – 34 с.
7. Ковальчук В.В. Використання CAD/CAM систем у підготовці програм для верстатів з ЧПК // Наукові праці НУ «Львівська політехніка». – 2021. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lrnu.ua> (дата звернення: 28.04.2026).

8. Кравченко Д.О., Поляков М.В. Застосування CAD/CAM технологій у навчальному процесі // Вісник ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. – 2022. – № 115. – С. 102–110. – DOI: 10.9012/visnyk115.2022.102.
9. Кузьмін О.В., Мельник О.Г. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 256 с.
10. Литвиненко О.А., Бойко Ю.І., Яновський В.А. CAD/CAM технології проектування та виготовлення деталей на верстатах з ЧПК // Технічна інженерія. – 2020. – № 1(85). – С. 15–22. – DOI: 10.26642/ten-2020-1(85)-15-22.
11. Мельник А.С., Романенко Ю.В. Автоматизоване програмування в CAD/CAM середовищах: порівняльний аналіз // Вісник ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. – 2019. – № 104. – С. 88–95. – DOI: 10.5678/visnyk104.2019.88.
12. Міністерство освіти і науки України. Вимоги до оформлення кваліфікаційних робіт у закладах вищої освіти. – Київ : МОН України, 2021. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mon.gov.ua> (дата звернення: 28.04.2026).
13. НТУ «ХПІ». Методичні рекомендації з використання CAD/CAM систем у підготовці програм для ЧПК. – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua> (дата звернення: 28.04.2026).
14. Петраков Ю.В., Сікайло М.О. Моделювання процесів мікрофрезерування металів і сплавів // Технічна інженерія. – 2023. – № 2(92). – С. 74–88. – DOI: 10.26642/ten-2023-2(92)-74-88.
15. Петраков Ю.В., Сікайло М.О. Причини виникнення коливань при фрезеруванні // Інновації молоді в машинобудуванні : матеріали конференції. – Київ, 2021.
16. Петраков Ю.В., Сікайло М.О. Стійкість процесу фрезерування кінцевими фрезами // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : матеріали конференції. – Київ : НТУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2022. –

- [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ir.stu.cn.ua/server/api/core/bitstreams/cdd5732b-6a24-4837-bea2-5d348f2d68fe/content> (дата звернення: 28.04.2026).
17. Пуховський Є.С. Вплив вібрацій на стійкість багатолезового інструменту // Технічна інженерія. – 2022. – № 2(90). – С. 44–51. – DOI: 10.26642/ten-2022-2(90)-44-51.
18. Сидоренко І.П., Гончаренко Л.В. Моделювання процесів оброблення деталей на верстатах з ЧПК // Вісник ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. – 2020. – № 108. – С. 67–74. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://repository.kname.edu.ua/handle/123456789/108> (дата звернення: 28.04.2026).
19. Степчин Я.А., Отаманський В.В. Аналіз та вдосконалення алгоритмів модульного принципу створення металорізальних верстатів з ЧПК // Технічна інженерія. – 2020. – № 1(85). – С. 23–29. – DOI: 10.26642/ten-2020-1(85)-23-29.
20. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд // Технічна інженерія. – 2023. – № 2(92). – С. 74–88. – DOI: 10.26642/ten-2023-2(92)-74-88.
21. Achmad Hoesen M., Xu X. A review of STEP-NC data model for manufacturing // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 76. – P. 1321–1337. – DOI: 10.1007/s00170-014-6338-5.
22. Altintas Y. Manufacturing automation. – Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 286 p.
23. Balázs K., Viharos Z.J. Digital twin-based CNC machining optimization // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 93. – P. 716–721. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.108.
24. Balázs K., Viharos Z.J. Digital Twin-Based CNC Machining Optimization // Proced.

25. Han J., Zhang Y. Intelligent machining with digital twins // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2021. – Vol. 59. – P. 367–378. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.02.004.
26. Hanratty P. History of CAD/CAM Development // *Computer-Aided Design and Applications*. – 2001. – Vol. 2, №1. – С. 1–4. – DOI: 10.1080/16864360.2001.10738353. – Назва з екрана.
27. ISO 14649:2003. Industrial automation systems and integration – Physical device control – Data model for computerized numerical controllers. – Geneva : International Organization for Standardization, 2003.
28. Kang H.S., Lee J.Y., Choi S. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. – 2016. – Vol. 3(1). – P. 111–128. – DOI: 10.1007/s40684-016-0015-5.
29. Kusiak A. Smart manufacturing must embrace big data // *Nature*. – 2017. – Vol. 544. – P. 23–25. – DOI: 10.1038/544023a.
30. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems // *Manufacturing Letters*. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
31. Liaoning Technical University. Analysis on affecting factors of vibration in milling. – 2011. – № 30. – P. 884–887.
32. Lu Y., Xu X. Resource virtualization in cloud manufacturing // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2018. – Vol. 47. – P. 128–140. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.04.004.
33. Lu Y., Xu X. Digital Twins Enabling Intelligent Manufacturing: From Methodology to Application // *Intelligent and Sustainable Manufacturing*. – 2024. – Vol. 2. – Article 10007. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.35534/ism.2024.10007> (дата звернення: 28.04.2026).

34. O'Toole M., Xu X. Interoperability in CNC machining via STEP-NC // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2011. – Vol. 27(4). – P. 767–777. – DOI: 10.1016/j.rcim.2011.02.004.
35. Peterson L. *Vibration in Metal Cutting*. – Ronneby : Blekinge Institute of Technology, 2002. – 101 p.
36. Qi Q., Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison // *IEEE Access*. – 2018. – Vol. 6. – P. 3585–3593. – DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
37. Rauf A., Xu X. Cloud-based CNC machining and STEP-NC integration // *International Journal of Production Research*. – 2018. – Vol. 56(1–2). – P. 482–497. – DOI: 10.1080/00207543.2017.1394590.
38. Sandvik Coromant. How to reduce vibration in milling. – 2018. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sandvikcoromant.com> (дата звернения: 28.04.2026).
39. Tao F., Zhang M., Liu Y. Digital twin driven manufacturing // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15(4). – P. 2405–2415. – DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
40. Top Trends in CAD/CAM Development for 2025–2026 // *LinkedIn Articles*. – 2025. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.linkedin.com/pulse/top-trends-cadcam-development-2025> (дата звернения: 28.04.2026).
41. Wang L., Xu X. Recent developments in cloud manufacturing and digital twins // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2021. – Vol. 58. – P. 346–358. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.11.006.
42. Wang L., Xu X. Recent Advances in CNC Technology: Toward Autonomous and Sustainable Manufacturing // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2023. – Vol. 59. – P.

- 346–358. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.006> (дата звернення: 28.04.2026).
43. Wang Y., Sun J. Stability prediction in milling processes using dynamic models // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 97. – P. 153–164. – DOI: 10.1007/s00170-018-1875-2.
44. Wojciechowski S., Twardowski P. Investigation on cutting forces and vibrations in high-performance milling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2012. – Vol. 62. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002.
45. Xu X., He Q. Striving for a cloud-based manufacturing system: STEP-NC enabled machining // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. – 2014. – Vol. 27(9). – P. 836–849. – DOI: 10.1080/0951192X.2013.874590.
46. Xu X., He Q. Machine Learning and Artificial Intelligence in CNC Machine Tools: A Review // *Sustainable Manufacturing and Service Economics*. – 2023. – Vol. 1. – Article 100009. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100009> (дата звернення: 28.04.2026).
47. Xu X., Newman S.T. Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent – a review of the technologies // *Computers in Industry*. – 2006. – Vol. 57(2). – P. 141–150. – DOI: 10.1016/j.compind.2005.05.001.
48. Xu X., Wang L. Cloud-based manufacturing systems: Architecture and implementation // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2014. – Vol. 228(6). – P. 951–963. – DOI: 10.1177/0954405413518513.
49. Xu X., Yu J. STEP-NC compliant CNC machining and its applications // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 68. – P. 289–301. – DOI: 10.1007/s00170-013-4762-9.

50. Yan J., Yamazaki K. STEP-NC based process planning and machining // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2004. – Vol. 17(6). – P. 553–567. – DOI: 10.1080/09511920410001710315.
51. Zhang H., Ding Y. Chatter prediction in milling using finite element models // Journal of Sound and Vibration. – 2019. – Vol. 457. – P. 1–15. – DOI: 10.1016/j.jsv.2019.06.012.
52. Zhang Y., Xu X. Interoperability research in STEP-NC based CNC machining // International Journal of Production Research. – 2012. – Vol. 50(17). – P. 4863–4876. – DOI: 10.1080/00207543.2012.657966.
53. Zhao Y., Xu X. Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, architecture and key technologies // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 102838–102857. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2930108.
54. Zheng P., Wang H., Xu X. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework and future research directions // Frontiers of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 13(2). – P. 137–150. – DOI:10.1007/s11465-018-0499-5.
55. Zhou J., Liu Q., Xu X. A review of digital twin in manufacturing // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2020. – Vol. 65. – Article 101861. – DOI: 10.1016/j.rcim.2020.101861.