

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Кафедра механічної інженерії та автомобільного транспорту

“На правах рукопису”

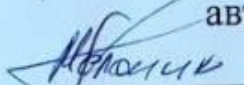
УДК 621.914.01-52-048.34

“До захисту допущено”

В.о. завідувача кафедри

механічної інженерії та

автомобільного транспорту


(підпис)

Мельник О.Л.
(прізвище, ініціали)

МАГІСТЕРСЬКА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

зі спеціальності 131 “Прикладна механіка”

(ОПП “Прикладна механіка”)

на тему: **“Підвищення ефективності процесу контурного фрезерування
на верстатах ЧПК”**

МІ 131.00.1/М 439/с 029 00-ПЗ

Студент групи ПМ-141м
(шифр групи)

Грева Дмитрій Володимирович
(прізвище, імя, по батькові)


(підпис)

Керівник

Д.Т.Н., доц. Немировський Я. Б.
(вчений ступінь та звання, прізвище, ініціали)


(підпис)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки

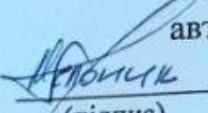
Кафедра механічної інженерії

Освітній ступінь: «Магістр»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка» (ОПП «Прикладна механіка»)

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри
механічної інженерії
автомобільного транспорту


(підпис)

Мельник О.
(прізвище, ім'я, по батькові)

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА Грева Дмитрію Володимировичу (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: **“Підвищення ефективності процесу контурного фрезерування на верстатах ЧПК”.**

Керівник роботи: Немировський Яків Борисович. д.т.н., доц.

Затверджена Наказом університету: “03” 09 2025 р. № 439/25

2. Строк подання студентом роботи - згідно графіку захистів.

3. Вихідні дані до роботи: технічні характеристики верстата з ЧПК, режимні параметри базового процесу контурного фрезерування, геометричні параметри оброблюваної деталі та вимоги до точності й шорсткості поверхні, наукові довідникові літературні джерела.

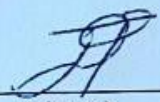
4. Перелік завдань, які потрібно вирішити: 1. Виконати аналітичний літературний огляд проблеми підвищення ефективності контурного фрезерування на верстатах ЧПК. 2. Проаналізувати основні фактори, що впливають на якість обробки при контурному фрезеруванні. 3. Дослідити

процес контурного фрезерування деталі «Корпус» на верстатах ЧПК. 4. Розробити керуючу програму обробки деталі "Корпус" з урахуванням оптимальних режимів різання та раціональної траєкторії руху інструмента, що забезпечує усунення неефективних зон його переміщення на основі ЧПК-технологій. 5. Проаналізувати навантаження різального інструменту при контурному фрезеруванні.

5. Перелік графічного матеріалу: 1. Аналітичний огляд наукових джерел за темою кваліфікаційної роботи. 2. Огляд сучасних САМ-систем для розробки траєкторій контурного фрезерування. 3. Технологічний маршрут обробки деталі «Корпус» 4. Траєкторія руху різального інструменту при обробці деталі «Корпус». 5. Підвищення ефективності та усунення неефективних зон траєкторії руху при контурному фрезеруванні. 6. Аналіз навантаження кінцевої фрези в середовищі SolidWorks. 7. Керуюча програма обробки вікна оглядового деталі «Корпус». 8. Порівняння базового та проєктного варіанту обробки, і запропонованої обробки середовищем SolidWorks CAM, до і після підвищення ефективності.

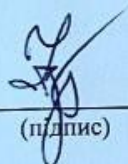
6. Дата видачі завдання: «11» Березня 2025 року.

Студент


(підпис)

Грева Д.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

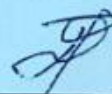

(підпис)

Немировський Я. Б
(прізвище та ініціали)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН ВИКОНАННЯ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Прим.
1.	Пошук та огляд довідникової та наукової літератури	Березень 2025	Виконано
2.	Розділ 1. Аналіз теоретичних основ та стану проблеми підвищення ефективності контурного фрезерування на верстатах ЧПК	Квітень 2025	Виконано
3.	Розділ 2. Дослідження та аналіз процесу контурного фрезерування на верстатах ЧПК	Травень 2025	Виконано
4.	Розділ 3. Підвищення ефективності процесу контурного фрезерування на основі ЧПК-технологій	Вересень 2025	Виконано
5.	Кінцеве оформлення кваліфікаційної роботи, графічного матеріалу	Жовтень 2025	Виконано
6.	Підготовка доповіді ілюстративного матеріалу та презентації	Листопад 2025	Виконано
7.	Подання роботи на кафедру	Грудень 2025	Виконано
8.	Захист кваліфікаційної роботи в ЕК	Згідно графіка	Виконано

Студент

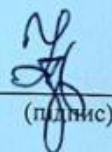


(підпис)

Грева Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Немировський Я

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Грева Д.В Підвищення ефективності процесу контурного фрезерування на верстатах ЧПК - Рукопис.

Магістерська кваліфікаційна робота представлена на здобуття ступеня вищої освіти «магістр», галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності G9 «Прикладна механіка». – Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, 2025.

Кваліфікаційна робота містить 93 аркуші формату А4 пояснювальної записки, у т. ч. 32 рис., 12 табл. та список літератури з 26 джерел.

У магістерській роботі досліджено проблему підвищення ефективності контурного фрезерування на верстатах з числовим програмним керуванням шляхом застосування методів математичного моделювання та сучасних САМ-технологій. Розглянуто теоретичні засади процесу фрезерування, проаналізовано динамічні особливості системи «верстат – інструмент – деталь», визначено основні фактори, що впливають на точність, шорсткість поверхні та продуктивність обробки.

Об'єктом дослідження обрано корпусну деталь складної конфігурації. Проведено її технологічний аналіз, обґрунтовано вибір заготовки, розроблено маршрутний та операційний технологічний процес виготовлення, підібрано обладнання (Haas VF-3) та інструмент. Виконано розрахунок оптимальних режимів різання та проведено аналіз траєкторій інструмента з визначенням неефективних ділянок руху.

У роботі розроблено алгоритм підвищення ефективності параметрів контурного фрезерування на основі математичних моделей сил різання, стійкості інструмента і обмежень верстата. Реалізовано покроковий підхід до покращення траєкторій у САМ-системі, що включає адаптивну подачу, оптимізацію глибини і ширини різання, мінімізацію холостих ходів та симуляційний контроль навантаження. Запропоновані рішення впроваджено до обробки деталі «Корпус», що дозволило зменшити машинний час у середньому на 30–35 %, підвищити стабільність процесу та якість сформованих поверхонь.

Результати роботи підтверджують ефективність використання інтегрованого підходу CAD/CAM/CAE для підвищення ефективності процесів контурного фрезерування та можуть бути застосовані у виробництві корпусних деталей у сучасному машинобудуванні.

Ключові слова: контурне фрезерування, ЧПК, САМ-система, оптимізація режимів різання, траєкторія інструмента, корпусна деталь, математичне моделювання, Haas VF-3.

ANNOTATION

Greva D.V. **Increasing the efficiency of the contour milling process on CNC machines - Manuscript.**

Master's qualification work is presented for the degree of higher education "Master", field of knowledge 13 "Mechanical Engineering" specialty G9 "Applied Mechanics". - State University "Zhytomyr Polytechnic", Zhytomyr, 2025.

The qualification work contains 93 sheets of A4 format explanatory note, including 32 figures, 12 tables. and a list of literature from 26 sources.

The master's work investigates the problem of increasing the efficiency of contour milling on CNC machines by applying mathematical modeling methods and modern CAM technologies. The theoretical principles of the milling process are considered, the dynamic features of the "machine tool - part" system are analyzed, the main factors affecting accuracy, surface roughness and processing performance are identified.

The object of the study was a housing part of a complex configuration. Its technological analysis was carried out, the choice of the workpiece was justified, the route and operational technological process of manufacturing was developed, the equipment (Haas VF-3) and the tool were selected. The calculation of optimal cutting modes was performed and the analysis of the tool trajectories was performed with the determination of inefficient sections of movement.

The work developed an algorithm for optimizing the parameters of contour milling based on mathematical models of cutting forces, tool stability and machine tool limitations. A step-by-step approach to improving trajectories in the CAM system was implemented, which includes adaptive feed, optimization of cutting depth and width, minimization of idle strokes and simulation control of the load. The proposed solutions were implemented for the processing of the "Housing" part, which allowed to reduce the machining time by an average of 30–35%, increase the stability of the process and the quality of the formed surfaces.

The results of the work confirm the effectiveness of using the integrated CAD/CAM/CAE approach to optimize contour milling processes and can be applied in the production of body parts in modern mechanical engineering.

Keywords: contour milling, CNC, CAM system, optimization of cutting modes, tool path, body part, mathematical modeling, Haas VF-3.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТА СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ЧПК.....	12
1.1. Сучасний стан розвитку технологій фрезерування в машинобудуванні.....	12
1.2. Основні характеристики та специфіка процесу контурного фрезерування.....	17
1.3. Динамічна модель коливальних процесів під час контурного фрезерування.....	22
1.4. Основні фактори, що впливають на точність і якість обробки при контурному фрезеруванні.....	26
1.5. Огляд сучасних САМ-систем для розробки траєкторій контурного фрезерування.....	30
Висновки до розділу 1.....	37
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ЧПК.....	38
2.1. Вибір об'єкта дослідження та його технологічна характеристика.....	38
2.2. Аналіз деталі «Корпус» для контурного фрезерування.....	40
2.3. Розробка технологічного процесу виготовлення деталі, вибір обладнання та інструменту.....	45
2.4. Розрахунок оптимальних параметрів режимів різання, нормування.....	53
2.5. Аналіз траєкторій інструмента та виявлення неефективних зон руху.....	58
2.6. Написання G-коду для обробки деталі «Корпус».....	64
Висновки до розділу 2.....	72

РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ЧПК- ТЕХНОЛОГІЙ.....	71
3.1. Постановка задачі підвищення ефективності процесу фрезерування.....	71
3.2. Використання математичних моделей для підбору оптимальних режимів різання.....	72
3.3. Алгоритм підвищення ефективності параметрів у САМ- системі.....	19
3.4. Алгоритм підвищення ефективності параметрів у САМ-системі для обробки деталі «Корпус».....	81
Висновки до розділу 3.....	88
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	91

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Контурне фрезерування на верстатах із числовим програмним керуванням (ЧПК) є одним із ключових етапів високоточних механічних обробних процесів у машинобудуванні, приладобудуванні та авіакосмічній галузі. Сучасні виробництва дедалі більше орієнтуються на виготовлення складнопрофільних деталей із мінімальними допусками, високими вимогами до якості поверхні та повторюваності розмірів. У цих умовах підвищення ефективності режимів контурного фрезерування набуває особливої важливості, оскільки напряму впливає на продуктивність, собівартість і надійність виготовлених виробів.

Зростання складності конструкцій, застосування нових матеріалів - жароміцних сплавів, титанових і композитних матеріалів - створюють додаткові вимоги до вибору інструменту, параметрів різання та траєкторій руху. Недостатньо оптимізовані режими можуть спричинити передчасний знос фрези, збільшення шорсткості, появу вібрацій і геометричних похибок деталі. Тому дослідження закономірностей впливу подачі, швидкості різання, кроку інтерполяції та стратегії проходу інструмента на кінцеву якість обробки є критично необхідним для підвищення ефективності виробничого процесу.

У контексті розвитку цифрового виробництва, інтеграції CAD/CAM-систем, автоматизації та впровадження концепції «Industry 4.0», актуальність підвищення ефективності ЧПК-фрезерування стрімко зростає. Оптимальні параметри обробки дозволяють істотно скоротити тривалість операції, підвищити стійкість інструменту, забезпечити стабільну якість контурів складної форми та знизити витрати на обслуговування обладнання. Це, у свою чергу, забезпечує конкурентоспроможність підприємств і підвищує технологічний рівень виробництва.

Отже, можемо вважати, що обрана тема є актуальною з наукової та практичної точок зору, оскільки спрямована на розв'язання проблем підвищення точності, продуктивності й економічності процесів контурного

фрезерування на ЧПК, що відповідає сучасним тенденціям розвитку машинобудівних технологій та вимогам інноваційного виробництва.

Мета і завдання роботи. Метою роботи є підвищення продуктивності та точності контурного фрезерування на верстатах з ЧПК шляхом теоретичного аналізу, моделювання та експериментальної перевірки оптимальних режимів різання й параметрів траєкторій інструмента, що забезпечують мінімізацію шорсткості поверхні та скорочення часу обробки.

Для досягнення вказаної мети необхідно поставлені наступні **завдання**:

1. Виконати теоретичний аналіз технології контурного фрезерування на верстатах з ЧПК, виявити фактори, що визначають точність, продуктивність та якість формоутворення.
2. Проаналізувати конструкцію корпусної деталі та визначити технологічні бази, раціональний вибір заготовки та можливі маршрути її обробки.
3. Розробити технологічний процес виготовлення деталі «Корпус», обґрунтувати вибір обладнання, інструменту та пристроїв, а також виконати розрахунок режимів різання.
4. Провести аналіз траєкторій інструмента, сформованих у САМ-системі, визначити неефективні ділянки руху та фактори, що спричиняють зростання часу обробки та навантаження на систему.
5. Розробити математичні моделі та критерії підвищення ефективності процесу контурного фрезерування, що враховують сили різання, стійкість інструмента, кінематичні та потужнісні обмеження верстата.
6. Сформулювати алгоритм підвищення ефективності параметрів фрезерування у САМ-середовищі та адаптувати його для обробки корпусної деталі.
7. Оцінити ефективність оптимізованих режимів та траєкторій, порівняти їх з базовим варіантом за показниками продуктивності, навантаження та якості поверхні.

Об’єктом дослідження роботи є процес контурного фрезерування деталей складної форми на верстатах з ЧПК у умовах серійного та дрібносерійного виробництва.

Предметом дослідження роботи є сукупність параметрів процесу фрезерування - режими різання, траєкторія руху інструмента, кінематичні характеристики системи ЧПК, які визначають точність формоутворення, параметри шорсткості й час обробки.

Методи дослідження. При виконанні роботи були використані:

- аналітичні методи - теорія різання, механіка формоутворення поверхонь, моделі енергосилової взаємодії «інструмент–деталь»;
- методи математичного моделювання - побудова моделей впливу режимів різання на параметри шорсткості та продуктивність;
- комп’ютерне моделювання - складання траєкторій у САМ-системі та аналіз інструментального навантаження;
- статистична обробка результатів - аналіз варіацій параметрів, визначення оптимуму за комплексним критерієм;
- економічні методи аналізу - порівняння витрат часу, стійкості інструменту та собівартості.

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота містить 93 аркуші формату А4 пояснювальної записки, у т. ч. 31 рис., 12 табл. та список літератури з 26 джерел.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТА СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ЧПК

1.1. Сучасний стан розвитку технологій фрезерування в машинобудуванні

Процес фрезерування - це значно більше, ніж проста механічна операція. Це ключовий елемент сучасного виробництва, у якому ріжучий інструмент, що обертається, точно і поетапно знімає шар матеріалу, формуючи як високоточні машинні компоненти, так і складні дизайнерські конструкції. Саме завдяки фрезеруванню звичайні заготовки з металу чи деревини перетворюються на вироби з ідеальною геометрією та чистотою поверхні. Станом на травень 2025 року ця технологія зберігає стратегічне значення, адже забезпечує необхідний рівень точності та продуктивності, без яких неможливе серійне виробництво в автомобільній, медичній та інших високотехнологічних сферах. Фрезерування - це не лише про створення деталей, а й про ощадливе використання матеріалів, зменшення виробничих втрат і стимулювання інновацій, що безпосередньо впливає на розвиток промисловості України та світу [1].



Рис.1.1. Процес фрезерування на верстаті з ЧПК [2]

Щоб глибше зрозуміти суть фрезерування, варто відзначити його значення для промислового сектору. Воно дозволяє виготовляти компоненти з мінімальними відхиленнями, що особливо важливо в галузях, де кожна неточність може призвести до серйозних наслідків. Це стосується авіаційної техніки, медичного обладнання та інших сфер, де деталі працюють у складних, часто граничних умовах. В Україні, де промисловий комплекс активно модернізується, фрезерувальні технології стають одним із чинників конкурентоспроможності малого та середнього бізнесу на міжнародних ринках.

Фрезерування давно перестало бути однорідним процесом - з роками воно розгалужувалося на різні технологічні напрями, кожен із яких призначений для своїх виробничих задач. Торцеве фрезерування оптимально підходить для формування рівних площин, наприклад, у меблевій індустрії, де воно забезпечує надзвичайно чисту обробку поверхні, яку вручну було б виконати значно довше. Кінцеве фрезерування, навпаки, спеціалізується на створенні пазів, канавок і складних вирізів, що робить його незамінним у машинобудуванні, де точність посадки компонентів має вирішальне значення.

Профільне фрезерування дає можливість формувати складні геометричні лінії та криволінійні форми, завдяки чому воно широко використовується у ювелірному виробництві та декоративному дизайні. Окремої уваги потребує ЧПУ-фрезерування - технологія, у якій усі рухи інструмента контролює комп'ютерна система. На 2025 рік ця форма обробки активно впроваджується на українських підприємствах і фактично стала стандартом для великих виробництв. Так, на Одеських підприємствах, що займаються композитними елементами для вітроенергетики, використання ЧПУ-верстатів дозволило скоротити час виготовлення деталей майже на третину порівняно з класичними методами.

Кожен різновид фрезерування має свої сильні сторони, а остаточний вибір визначається потребами конкретного виробництва. Для невеликих локальних

майстерень у Львові зазвичай достатньо базових верстатів, тоді як підприємствам, що орієнтуються на експорт, необхідні сучасні високоточні технології [1].

Однією з ключових переваг фрезерування є його здатність працювати з широким спектром матеріалів. Від надтвердих металів до м'яких порід деревини - кожен із них потребує ретельного вибору режимів обробки, щоб запобігти дефектам. Розглянемо це на прикладах. Метали, зокрема сталь та алюміній, вимагають застосування надміцних фрез і невеликих швидкостей різання, оскільки перегрів здатен викликати деформації чи мікротріщини. У вітчизняній меблевій галузі, де домінує деревина, фрезерування використовують для створення тонких декоративних елементів, а оптимальна якість досягається завдяки зниженню швидкості, що допомагає уникати сколів.

Пластики та композитні матеріали створюють додаткові виклики: вони схильні до плавлення через надмірний нагрів інструмента, тому контроль температури стає визначальним фактором. У рекламних компаніях, які працюють із акрилом, фрезерування дозволяє виготовляти вивіски з бездоганною геометрією та гладкими краями. Для композитів, що використовуються, наприклад, у виробництві елементів для авіації, найефективнішими є інструменти з алмазним напиленням - вони забезпечують точну роботу з неоднорідними матеріалами.

В українській промисловості, де дедалі більшу увагу приділяють екологічним підходам, фрезерування все частіше застосовується для вторинної переробки, зокрема деревних відходів, перетворюючи їх на функціональні вироби. У цьому контексті йдеться не лише про технологічну продуктивність, а й про сталий розвиток, адже правильно підібрані параметри обробки здатні суттєво зменшити кількість відходів [1].

В таблиці 1.1 представлено матеріали для фрезерування.

Матеріали для фрезерування

Матеріал	Особливості обробки	Сфера застосування
Метал (стал, алюміній)	Вимагає охолодження для уникнення перегріву, фрези з твердого сплаву	Машинобудування, авіація
Дерево	Легке в обробці, але ризикує сколами; використовують низькі швидкості	Меблі, декор
Пластик	Схильний до плавлення; потрібен контроль температури і спеціальні фрези	Реклама, побутові вироби
Композитні матеріали	Неоднорідні, вимагають прецизійних інструментів для рівномірного різку	Аерокосмічна галузь, екологічні проекти

Джерело: звіт Асоціації промислових технологій України за 2024 рік, оновлений даними на травень 2025.

Контурне фрезерування (рис.1.2) за допомогою кінцевих фрез на верстатах із числовим програмним керуванням (ЧПК) - це різновид механічної обробки, у якому інструмент знімає шар матеріалу, рухаючись за заздалегідь визначеною траєкторією у двох із трьох осей Декартової системи координат. Таку траєкторію зазвичай створюють у САМ-програмному забезпеченні (Computer-aided Manufacturing), після чого вона перетворюється на керувальну програму у вигляді G-кодів - спеціальної низькорівневої мови для ЧПК-обладнання. Цей метод широко застосовують для виготовлення елементів зі складною формою: відкритих і закритих кишень, зовнішніх контурів деталей, а також внутрішніх та зовнішніх обводів, що поєднують прямолінійні сегменти з дуговими переходами.

Завдяки такій гнучкості у формуванні геометрії контурне фрезерування стало одним із найрезультативніших способів обробки різних матеріалів. Воно активно використовується в авіакосмічній, автомобільній, машинобудівній та

інших галузях, де потрібна висока точність, здатність працювати як із композитами, так і з металами, та максимальна ефективність технологічних процесів.



Рис.1.2. Контурне фрезерування [3]

Станом на травень 2025 року фрезерування в Україні переживає новий етап розвитку. Після активізації економіки дедалі більше підприємств оновлюють виробничі потужності та впроваджують ЧПК-обладнання. У машинобудівній та меблевій сферах це поступово стає стандартом, що дозволяє українським виробникам упевнено виходити на зовнішні ринки завдяки високим показникам точності та якості. Водночас швидко зростає кількість невеликих майстерень, які застосовують фрезерування для виготовлення унікальних виробів, зокрема сувенірної продукції з регіональних матеріалів для туристичного сектору.

Втім, залишаються й проблемні моменти: нестача кваліфікованих кадрів та значна залежність від іноземних верстатів. Ці виклики, проте, стимулюють інтерес до створення власного обладнання, що здатне стати вагомим поштовхом для розвитку національної промисловості. У перспективі поширення екотехнологій впливатиме і на фрезерування: з'являтимуться нові методи роботи з екологічними матеріалами та рішення для зменшення

викидів. Для українських компаній це відкриває можливості - інвестуючи в освіту, інновації та технології, вони можуть не лише зміцнити свої позиції, а й стати лідерами у своїх нішах [1].

Фрезерні технології й надалі еволюціонують, пропонуючи обладнання нового покоління, здатне виконувати токарні, фрезерні та свердлильні операції в межах одного верстата. Все більшого значення набувають системи штучного інтелекту, які автоматично визначають оптимальні режими різання залежно від матеріалу та геометрії деталі. Це суттєво зменшує ризики, пов'язані з людським чинником, підвищує повторюваність результатів і скорочує час обробки завдяки постійному контролю параметрів процесу.

Саме через таку універсальність фрезерування залишається актуальним як для масового, так і для малосерійного виробництва. Коли необхідні висока точність, складні контури та гарантована надійність, цей метод механічної обробки забезпечує найкращий результат. Максимальна ефективність досягається за умови правильного вибору інструмента, своєчасного технічного догляду за обладнанням та належної підготовки персоналу - усе це дозволяє підприємствам утримувати конкурентні переваги й зміцнювати свої позиції на ринку.

1.2. Основні характеристики та специфіка процесу контурного фрезерування

Контурне фрезерування є одним із найбільш точних і технологічно складних видів механічної обробки, спрямованим на формування профільних поверхонь та контурів довільної геометрії. На відміну від традиційних операцій обробки площин або пазів, контурне фрезерування передбачає багатовимірний рух інструмента відповідно до заздалегідь заданої траєкторії, що визначається параметрами CAD-моделі та обробляється у САМ-системі. Такий підхід забезпечує високу точність формоутворення, відтворюваність елементів складної конфігурації та можливість обробки комбінованих поверхонь.

Однією з ключових характеристик контурного фрезерування є взаємозалежність між кінематикою руху інструмента та режимами різання. Точність обробки визначається стабільністю переміщень за координатними осями, мінімізацією коливань та розузгоджень між програмною і реальною траєкторією. Контурна обробка відчутно чутлива до змін подачі, швидкості різання, глибини різання, а також до характеристик інструмента та жорсткості технологічної системи «верстат–інструмент–деталь». Будь-які відхилення в цих параметрах здатні спричинити похибки формоутворення, збільшення шорсткості поверхні, появу фасок чи мікронапливів уздовж контуру.

Специфіка контурного фрезерування полягає також у складності побудови траєкторії руху інструмента. На відміну від лінійних або точкових стратегій, контурна траєкторія є безперервною кривою, що може містити радіусні переходи, сплайни, S-подібні ділянки та складні криволінійні елементи. Важливу роль відіграє точність апроксимації контуру, оскільки недостатньо оптимальні інтерполяційні параметри можуть спричинити ривковість руху, перевантаження шпинделя чи появу «сходинок» на поверхні.

Ще одним характерним аспектом є значний вплив динаміки інструмента на якість обробки. Під час роботи на високих подачах інструмент може зазнавати поперечних і крутильних коливань, що призводить до появи хвилястості поверхні й нестабільності стружкоутворення. Тому контурне фрезерування вимагає ретельного вибору жорсткості інструмента, схеми його закріплення та стратегії підходу і відходу від поверхні.

Важливе місце в специфіці процесу займає взаємодія САМ-системи та ЧПК-верстата. Підвищення ефективності контурної обробки залежить від коректності побудови траєкторії, параметрів постпроцесування, типу інтерполяції (лінійна, дугова, spline-інтерполяція) та можливості верстата працювати з високою швидкістю обробки (HSM/LC, HSM). Від цих факторів залежить рівномірність завантаження інструмента, час обробки та точність відтворення геометрії.

На рис. 1.3 подано приклад виконання контурного фрезерування, яке здійснюється за два проходи [4].

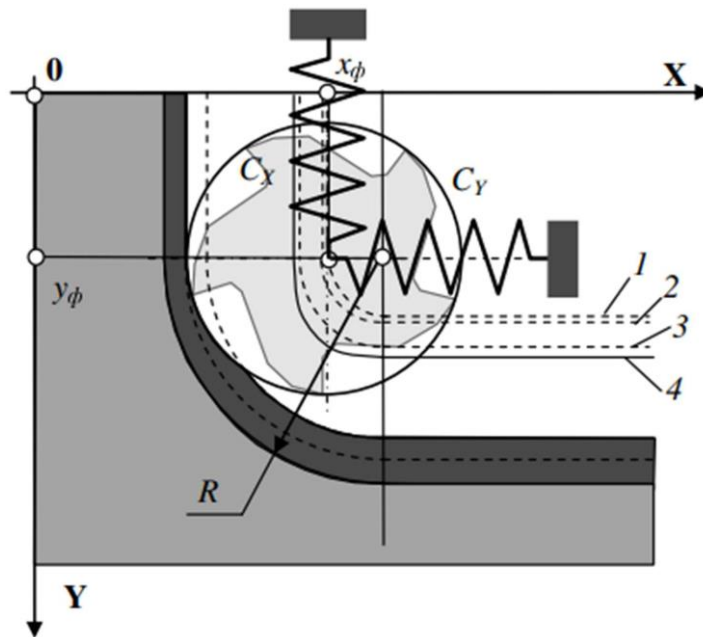


Рис.1.3. Схема контурного фрезерування за два проходи [4]

Під час першого проходу оброблення здійснюється вздовж теоретичної еквідистанти. Після цього за допомогою попередньо створеної програми на верстаті проводиться вимірювання отриманого профілю, що дозволяє сформувати його цифрову модель. Використовуючи цю модель, виконують комп'ютерне моделювання процесу, під час якого визначають цифрові масиви складових сили різання. Після обчислення масивів жорсткостей (ТОС) траєкторію руху інструмента коригують для виконання другого проходу, застосовуючи систему керування за апостеріорною інформацією з коефіцієнтом корекції, що дорівнює одиниці.

У роботі [4] представлено спеціалізоване програмне забезпечення, створене на основі методики коригування траєкторії за даними зворотного зв'язку. Ця програма автоматично виконує вимірювання поверхні заготовки після першого проходу та формує уточнений файл траєкторії для другого етапу обробки. Крім того, у джерелі [5] описано побудову моделі процесу

контурного фрезерування відповідно до принципів, що випливають з аналізу замкненої системи (ТОС). На рис. 1.4 подано схему оброблення контуру.

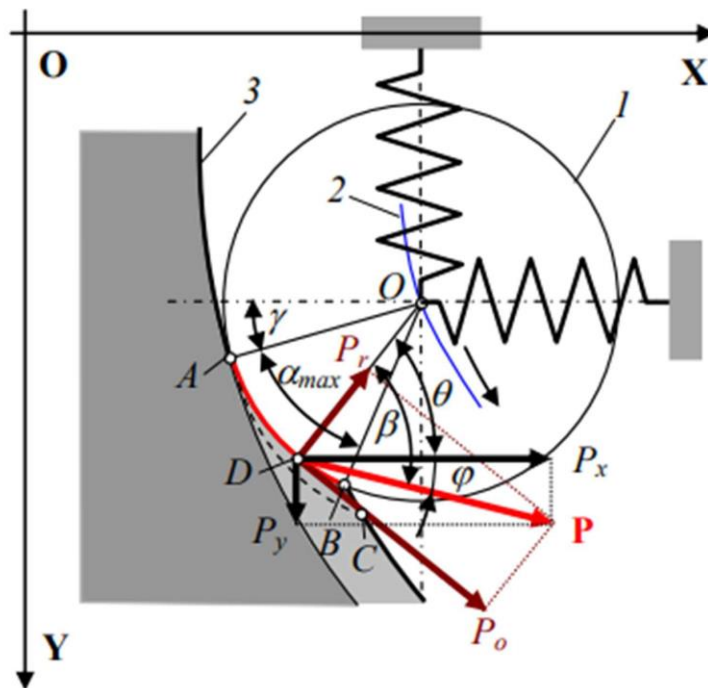


Рис.1.4. Схема фрезерування контуру [5]

У публікації [6] досліджується можливість забезпечення контролю точності під час контурного фрезерування на ЧПК-обладнанні. Встановлено, що така перевірка може здійснюватися на верстатах, оснащених трикоординатним контактним щупом. Запропонована методика передбачає вимірювання геометричних параметрів за допомогою цього щупа відповідно до спеціально створеної керувальної програми. Збір результатів відбувається автоматично через команди ЧПК, після чого дані зберігаються у файл.

Окрім того, розроблено прикладне програмне забезпечення, яке дозволяє завантажувати файл із вимірювальною інформацією разом із програмою фрезерування та наочно відображати всі параметри, необхідні для оцінювання точності обробки.

У роботі [7] описано підхід до контурного 2,5D фрезерування, що передбачає використання стратегії керування за апостеріорною інформацією. На рис. 1.5 показано відповідну схему реалізації такого підходу.

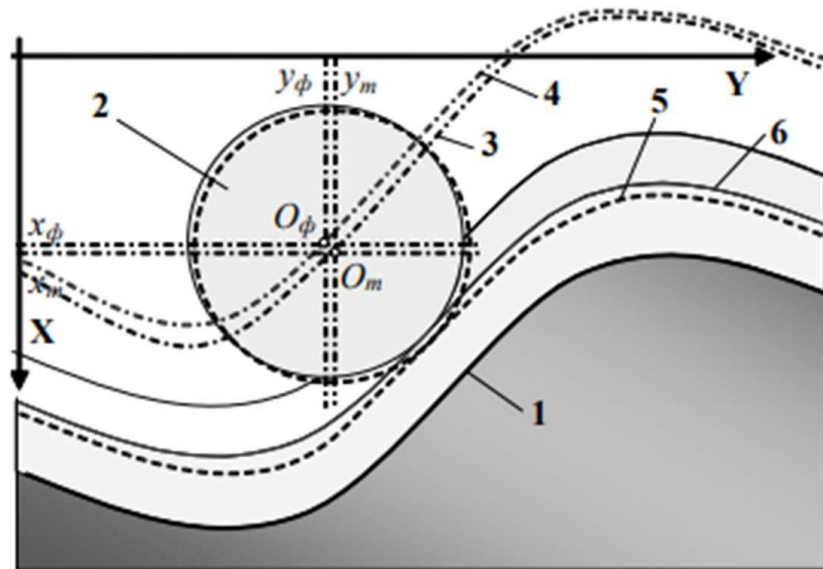


Рис.1.5. Схема фрезерування контуру [7]

Контур 1 деталі обробляється інструментом 2. Під час першого проходу знімається половина припуску, а траєкторія формоутворення, позначена кривою 3 (масиви координат $[x_m]_i$ та $[y_m]_i$), створюється у САМ-системі. Однак фактичний маршрут руху фрези, показаний лінією 4, відрізнятиметься від теоретично визначеного. Це зумовлено появою пружних деформацій у системі «технологічний об'єкт - інструмент - верстат» (ТОС). У результаті замість проєктованої поверхні, позначеної лінією 5, формується реальна поверхня, яку показано лінією 6 [7].

Таким чином, контурне фрезерування характеризується високою точністю, підвищеною чутливістю до режимів різання та стану технологічної системи, складністю побудови траєкторій і необхідністю використання інтелектуальних алгоритмів САМ-оптимізації. Сукупність цих особливостей зумовлює необхідність ретельної оптимізації параметрів процесу для забезпечення якісного формоутворення складних профільних поверхонь.

1.3. Динамічна модель коливальних процесів під час контурного фрезерування

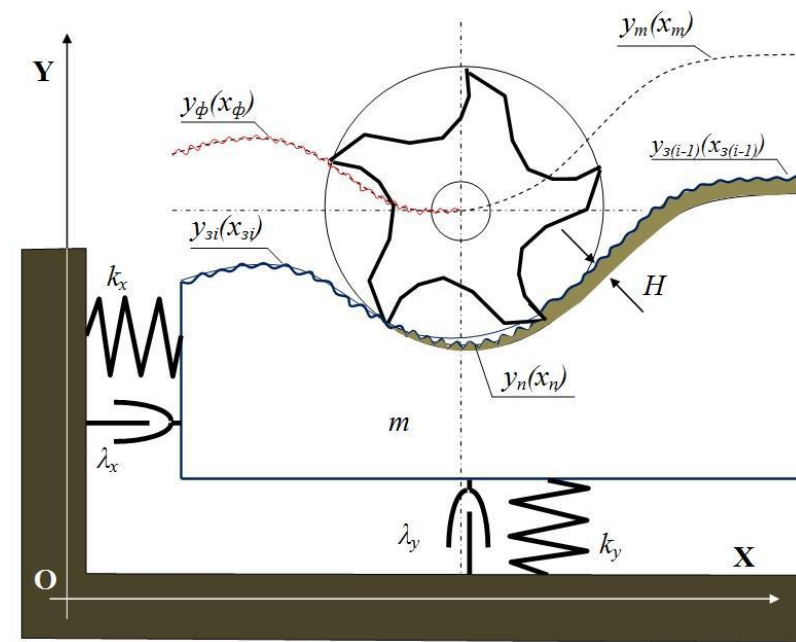
Сучасні методи проєктування технологічних операцій різання на ЧПК-верстатах здебільшого базуються на використанні апріорних даних, отриманих шляхом цифрового моделювання. Якість і ефективність керування процесом обробки безпосередньо залежать від повноти та точності побудованої математичної моделі. Це має особливе значення для контурного фрезерування, оскільки, як показано в [8], процес різання є квазістаціонарним: навіть за умов рівномірного припуску параметри різання змінюються в широких межах уздовж траєкторії формоутворення.

Традиційний спосіб вибору режимів різання в управляючій програмі «за найгіршим випадком» - тобто на основі максимально можливих збурень, таких як дуга різання чи глибина оброблення - призводить до значного зниження продуктивності [9]. У відповідь на це провідні САМ-системи почали впроваджувати так звані інтелектуальні технології (наприклад, iMachining), які дають технологу можливість задавати умови обробки відповідно до оцінки жорсткості технологічної системи, що зазвичай визначається практичним досвідом [10]. Однак при цьому динамічні фактори, які суттєво впливають на результат - зокрема, виникнення вібрацій, хвилястості або ограновування поверхні - залишаються поза увагою.

Для створення математичної моделі процесу контурного фрезерування можна використовувати схему, подану на рис. 1.6. Вона описує роботу системи в площині XOY , тобто при сталому значенні координати Z , що є достатнім для аналізу контурної обробки. Технологічна система подається у вигляді одномасової моделі з масою заготовки m , пружними характеристиками k_x і k_y , а також в'язким тертям, яке описується коефіцієнтами λ_x та λ_y і визначає лінійну залежність сили тертя від швидкості пружних переміщень у ТОС.

Під час різання в системі «технологічний об'єкт - інструмент - верстат» виникають коливання, що спричиняють відхилення від розрахованих траєкторій та зміни форми сформованого контуру. У теоретичній моделі рух формоутворення задається функцією $y_m(x_m)$, яка закладена в управляючу

Такі динамічні відхилення впливають як на контур заготовки $u_{3(i-1)}(x_{3(i-1)})$, сформований на попередньому проході, так і на контур, що створюється у поточний момент - $u_{3i}(x_{3i})$. Крім того, коливання попереднього зуба фрези деформують контур припуску $u_n(x_n)$, який буде зніматися наступним зубом [8].



У результаті коливань технологічної системи припуск, який потрапляє в зону різання, постійно змінюється і вже не відповідає теоретичній глибині різання H , закладеній під час створення керувальної програми для ЧПК-верстата. Тому під час розроблення математичної моделі процесу контурного фрезерування необхідно враховувати вплив цих коливань на фактичну траєкторію формоутворення та форму обробленого контуру, що може проявлятися у вигляді хвилястості або ограновування.

23

зворотні зв'язки. Зазвичай формування математичної моделі будь-якого процесу або системи починають із створення функціональної схеми, яка графічно відображає всі зазначені взаємозв'язки, коливальні елементи та сам процес різання.

Як вхідні дані приймаються $y_m(x_m)$ - теоретична траєкторія формоутворення, визначена керувальною програмою, а також контур заготовки $y_{z(i-1)}(x_{z(i-1)})$, отриманий під час попереднього проходу. Якщо моделюється перший прохід, за вихідний контур береться початкова форма заготовки.

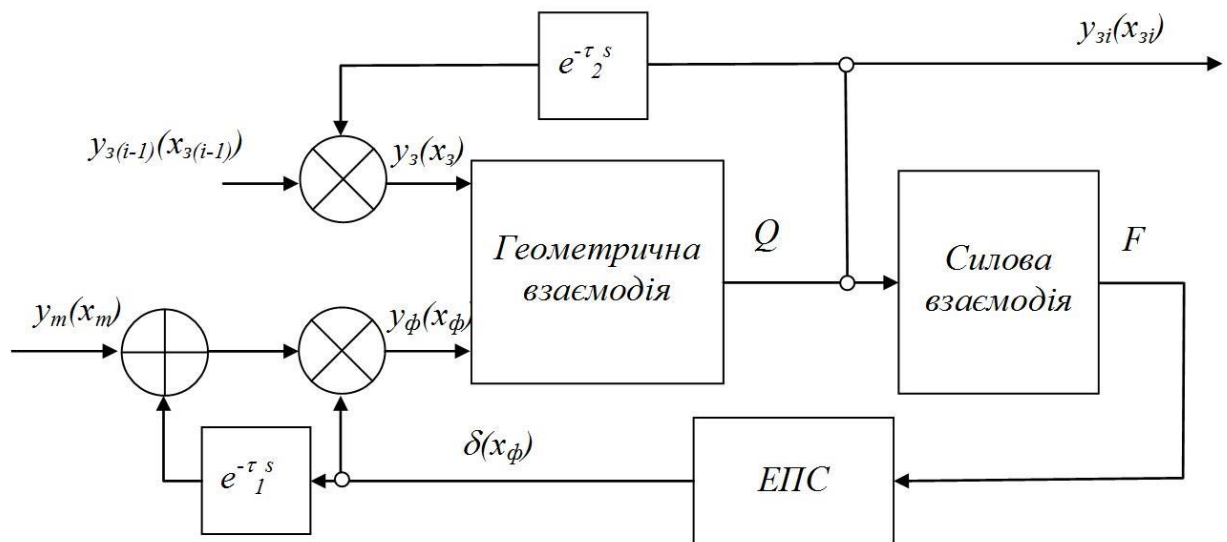


Рис. 1.7. Функціональна схема процесу контурного фрезерування [9]

Блок «Геометрична взаємодія» виконує задачу визначення точки перетину інструментальної поверхні фрези з контуром заготовки $y_{z(i-1)}(x_{z(i-1)})$, сформованим на попередньому проході. У зворотній схемі центр фрези рухається не за теоретичною, а за фактичною траєкторією $y_\phi(x_\phi)$, що й враховується під час обчислень.

Оскільки технологічна система не має нескінченної жорсткості, у процесі різання виникають вібрації. Коли перший зуб фрези знімає матеріал, на поверхні залишається хвилястий профіль, який формує змінну товщину припуску для наступного зуба. Кожний наступний зуб працює по рельєфу,

залишеному попереднім, і сам створює нову хвилястість - це відображено на рис. 1.6. Зсув фаз між хвилями, утвореними різними зубами, спричиняє зміну товщини стружки та, відповідно, сили різання. Такий механізм породжує регенеративні коливання, коли вібрації від проходу попереднього зуба підсилюють наступні, що може призвести до втрати стійкості процесу.

У функціональній схемі цей ефект зображено через запізнюючий елемент із передатною функцією $e^{-\tau_1 s}$, де τ_1 - час проходження кута між сусідніми зубами фрези, а s - оператор Лапласа. Відтак реальна траєкторія різання формується відповідно до принципу замкненості технологічної системи та враховує режим оброблення «за слідом» [10]:

$$y_\phi(x_\phi) = y_m(x_m) - \delta(x_\phi) + \delta(x_\phi) \times e^{-\tau_1 s}, \quad (1.1)$$

де $\delta(x_\phi)$ - пружна деформація ТОС.

Робота цього блоку передбачає, що на кожному кроці обчислюються точки, у яких інструментальна поверхня фрези входить у заготовку та виходить із неї. Після цього здійснюється оновлення масиву контуру заготовки й визначення форми припуску, що виникає внаслідок переміщення зуба фрези під час різання [10].

Створена функціональна схема процесу контурного фрезерування враховує ключові динамічні явища, що виникають у замкненій пружній технологічній системі під час оброблення. Оскільки фрезерування є переривчастим процесом, для коректного відображення його впливу на появу вібрацій у моделі запропоновано застосувати дві функції із запізненням аргументу. Перша з них описує формування поверхні «за слідом» між двома сусідніми зубцями фрези, а друга - відображає взаємодію «за слідом» між двома послідовними проходами інструмента.

1.4. Основні фактори, що впливають на точність і якість обробки при контурному фрезеруванні

Ефективність машинобудівного виробництва та якість готової продукції значною мірою визначаються точністю й продуктивністю технологічного обладнання. Геометрична точність оброблених деталей у реальних виробничих умовах залежить від динамічних характеристик верстата, типу застосованого інструмента, властивостей заготовки та параметрів різання.

Фрезерування посідає вагомий частку в технологічних процесах обробки металів різанням - до 15% загальної кількості операцій. На практиці вибір режимів різання на підприємствах здебільшого ґрунтується на емпіричних залежностях. Незважаючи на простоту їх використання, такі залежності не відображають глибинної фізичної сутності процесів, що відбуваються в зоні різання. Для забезпечення керованої точності готових деталей необхідно мати інформацію про вплив різних факторів на параметри виробу протягом усього технологічного циклу.

Контурне фрезерування - це метод формування поверхонь по заданій геометричній траєкторії. Особливої актуальності набирають процеси утворення контурних поверхонь на ЧПК-верстатах із використанням кінцевих фрез. Для таких фрез визначальними є основні геометричні характеристики - діаметр D_ϕ та кут β нахилу гвинтової канавки. На режими різання додатково впливають кількість зубців z та ширина фрезерування B . Кожен зуб у нормальному перерізі формує різальний клин із відповідними переднім та заднім кутами. Оскільки силові параметри процесу залежать не лише від режимів і матеріалу заготовки, але й від форми та величини припуску, який зрізає зуб фрези, при побудові математичної моделі насамперед аналізують кінематичну схему фрезерування.

Контурне фрезерування є складним процесом формоутворення, який залежить від багатьох технологічних, конструктивних та динамічних факторів. Якість кінцевої поверхні визначається взаємодією швидкості різання, подачі, глибини різання, жорсткості інструмента, точності траєкторії та стану системи

ЧПК. Комплексний вплив цих параметрів формує точність контуру, шорсткість поверхні, відхилення від геометрії та стабільність роботи інструмента.

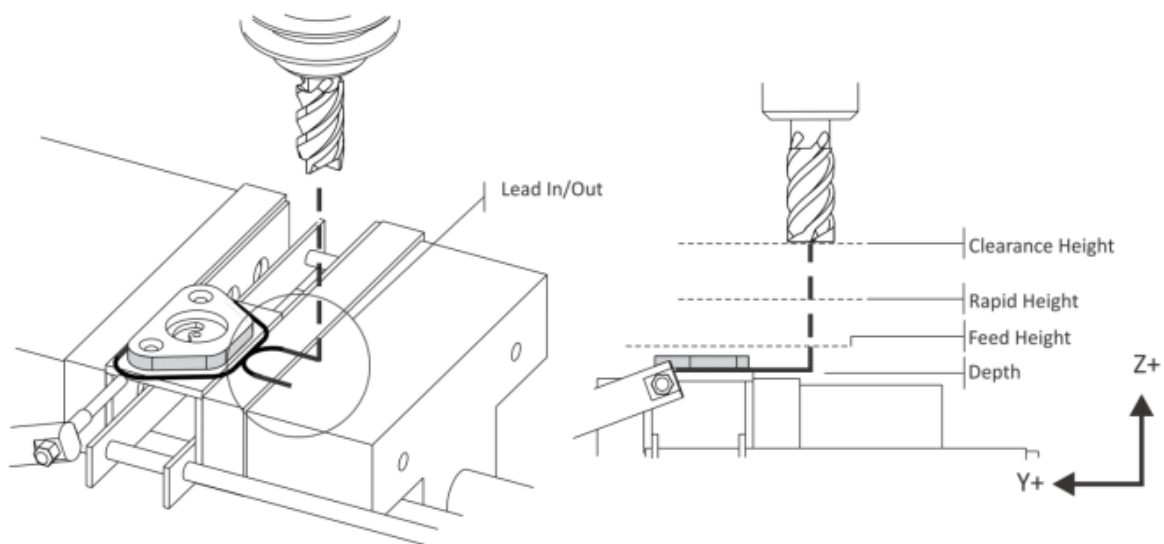


Рис.1.8. Приклад контурного фрезерування [9]

Нижче подано систематизовані фактори, що найбільше впливають на результати контурного фрезерування (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2

Основні технологічні фактори впливу на точність та якість обробки

Фактор	Вплив на процес	Можливі наслідки
1	2	3
Швидкість різання (V)	Формує температуру в зоні різання та процес стружкоутворення	Підвищення температури → знос інструмента, зміна Ra
Подача на зуб (f_z)	Визначає навантаження на інструмент	Надмірна подача → хвилястість, вібрації
Глибина різання (t)	Впливає на силу різання та стійкість інструмента	Зростання сил → прогин фрези, похибки контуру
Тип фрези та її діаметр	Жорсткість і стабільність процесу	Тонкі фрези → збільшення прогину

1	2	3
Кінематика рухів ЧПК	Точність позиціонування, інтерполяція, прискорення	Похибки траєкторії, ривки, мікронерівності
Жорсткість системи “верстат – інструмент - деталь”	Сприйняття сил та вібрацій	Автоколивання, резонанс
Стан шпинделя і підшипників	Вібрації інструмента	Підвищення Ra, хвилястість
Тип стратегії траєкторії в САМ	Рівномірність навантаження	Локальні перевантаження, зміна точності
Матеріал деталі	Схильність до налипання, в'язкість	Мікрозадири, погіршення якості

Одним із ключових параметрів процесу є подача на зуб, яка визначає геометричну складову шорсткості поверхні.

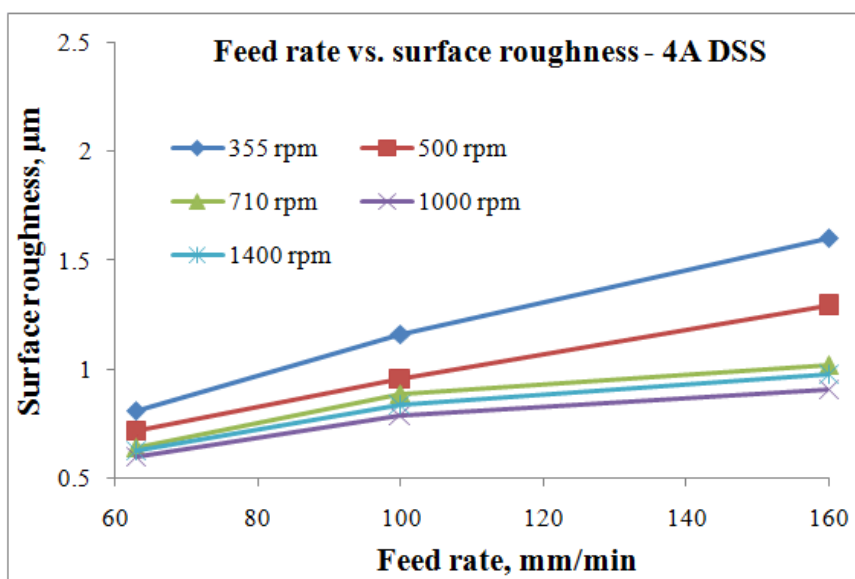


Рис.1.9. Вплив подачі на зуб на шорсткість поверхні [9]

Згідно з теорією різання, збільшення подачі (f_z) призводить до зростання нерівностей, оскільки формується більша висота нерівностей між слідами зубів інструмента. При надто малій подачі зростає тертя та можливе налипання стружки на ріжучу кромку.

У контурному фрезеруванні особливо важливою є динамічна поведінка інструмента, оскільки фреза працює на змінних навантаженнях, особливо в криволінійних ділянках траєкторії.

Таблиця 1.3

Вплив вібрацій на якість обробки

Причина вібрацій	Механізм	Наслідки
Низька жорсткість інструмента	Прогин фрези під навантаженням	“Відведення” інструмента від контуру
Нестабільність подачі	Ривки у траєкторії ЧПК	Хвилястість та мікронерівності
Знос підшипників шпинделя	Радіальні/осьові коливання	Погіршення геометричної точності
Резонансні частоти системи	Співпадіння частоти кутового моменту та вібрацій	Зростання амплітуди коливань, злам інструмента

Точність відтворення контурної траєкторії залежить від:

- типу інтерполяції (лінійна, дугова, spline);
- точності позиціонування приводів осей;
- прискорень та уповільнень системи ЧПК;
- параметрів згладжування (look-ahead, jerk control).

При тривалому фрезеруванні з високими швидкостями можливі:

- локальні температурні градієнти;
- термічне розширення заготовки;
- теплове подовження інструмента.

Ці ефекти змінюють розмірні параметри та призводять до відхилень контурів на 5–30 мкм залежно від матеріалу та режиму.

Точність і якість контурного фрезерування визначаються комплексом взаємозалежних факторів: режимами різання, жорсткістю системи, точністю інтерполяції, властивостями інструмента, вібраційною стабільністю та термічними процесами. Оптимальне поєднання цих параметрів дозволяє забезпечити мінімальну шорсткість, точне відтворення контурів та підвищену

стійкість інструмента. Саме тому детальний аналіз зазначених факторів є ключовим етапом розробки ефективних технологій контурної обробки.

1.5. Огляд сучасних САМ-систем для розробки траєкторій контурного фрезерування

Розуміючи необхідність оперативного контролю процесу різання, провідні виробники високотехнологічного обладнання почали впроваджувати програмні рішення, які, за їхніми заявами, здатні автоматично визначати оптимальні режими обробки.

Відомо, що керування режимами різання має відбуватися за певною послідовністю: спочатку досягається стабілізація процесу, після чого виконується його оптимізація, а за потреби - корекція траєкторії у завершальному, вільному проході [11].

Перші підходи до стабілізації режиму різання базувалися на використанні геометричного критерію.

Сучасні САМ-системи (Computer Aided Manufacturing) є ключовою ланкою у ланцюгу «CAD – САМ - ЧПК» під час контурного фрезерування. Вони забезпечують перетворення геометричної моделі деталі у керуючу програму (G-код), формують траєкторії руху інструмента, виконують перевірку на зіткнення та дозволяють оптимізувати режими різання й послідовність переходів. Рівень розвитку САМ-систем безпосередньо визначає точність відтворення контурів, час обробки та стійкість інструмента.

Основні функції САМ-систем у контурному фрезеруванні

До базових можливостей сучасних САМ-пакетів, що використовуються для контурної обробки, належать:

- побудова 2D/3D контурних траєкторій (2D Contour, 3D Contour, Profile, Finish contour тощо);

- підтримка багатовісного (4-5 - осьового) фрезерування, у тому числі спеціалізованих стратегій для обробки складних поверхонь (Swarf, Multiblade, Port, Contour 5-Axis);

- автоматичне врахування залишкового припуску та адаптивні (динамічні) стратегії, що мінімізують «повітряні» ходи; інтеграція з CAD-системами та можливість безпосередньої роботи з твердотільною моделлю;

- симуляція процесу різання з перевіркою зіткнень інструмента, оправки та елементів верстата;

- автоматизоване формування G-коду під конкретний тип ЧПК-системи.

Найбільш поширеними в машинобудуванні CAM-системами є SolidCAM, Mastercam, Autodesk Fusion 360, Siemens NX CAM, а також Autodesk PowerMill, CATIA CAM, Edgecam та ін. [12]

SolidCAM

SolidCAM є інтегрованим CAM-модулем для систем SOLIDWORKS, Autodesk Inventor та Solid Edge, що дозволяє працювати безпосередньо в середовищі CAD-моделі. Однією з ключових можливостей є модуль Simultaneous 5-Axis, який містить спеціалізовану стратегію Contour 5-Axis Machining для обробки складних 3D-контурів і кромek. У цій стратегії траєкторія інструмента формується на основі «дротової» (wireframe) кривої, а нахил осі інструмента задається через додаткові елементи керування (tilt lines) [12].

SolidCAM також підтримує адаптивні стратегії (iMachining), які забезпечують рівномірне навантаження інструмента, зниження сил різання та скорочення машинного часу до 50–70 %. Це особливо важливо для контурного фрезерування тонкостінних та складнопрофільних деталей.

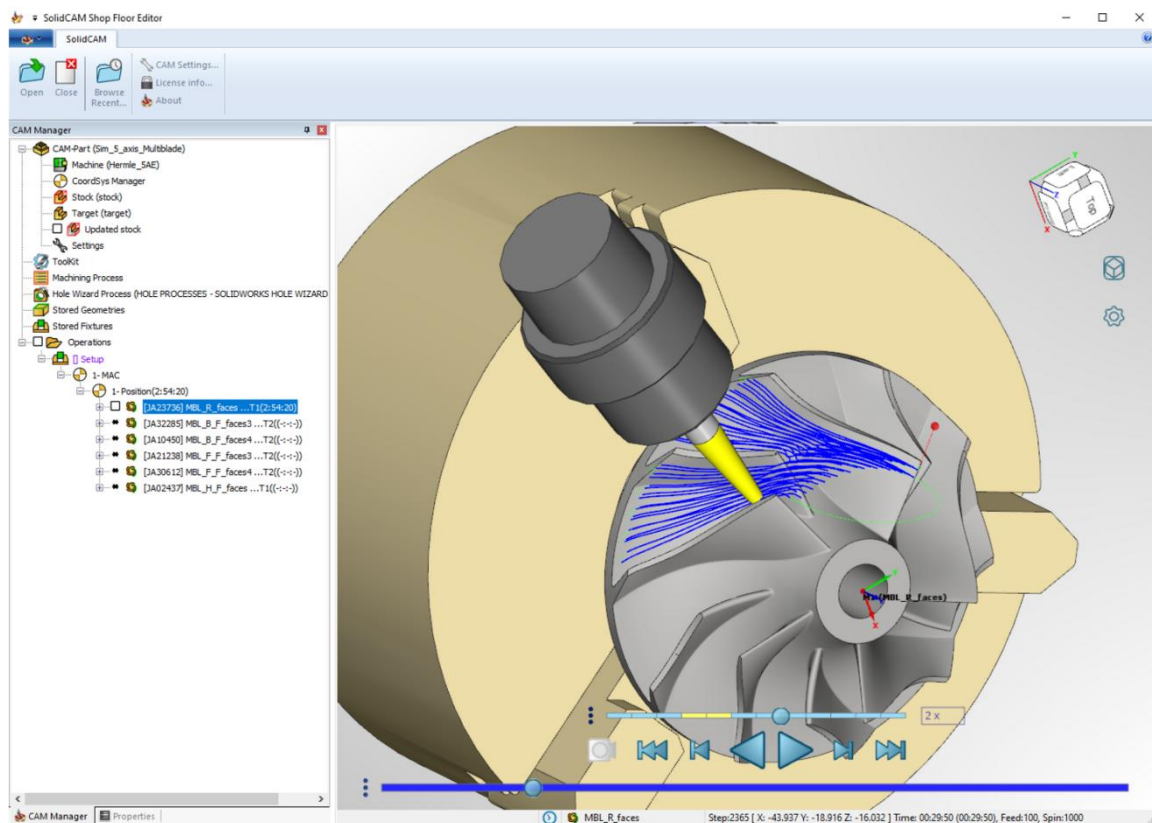


Рис.1.10. SolidCAM [12]

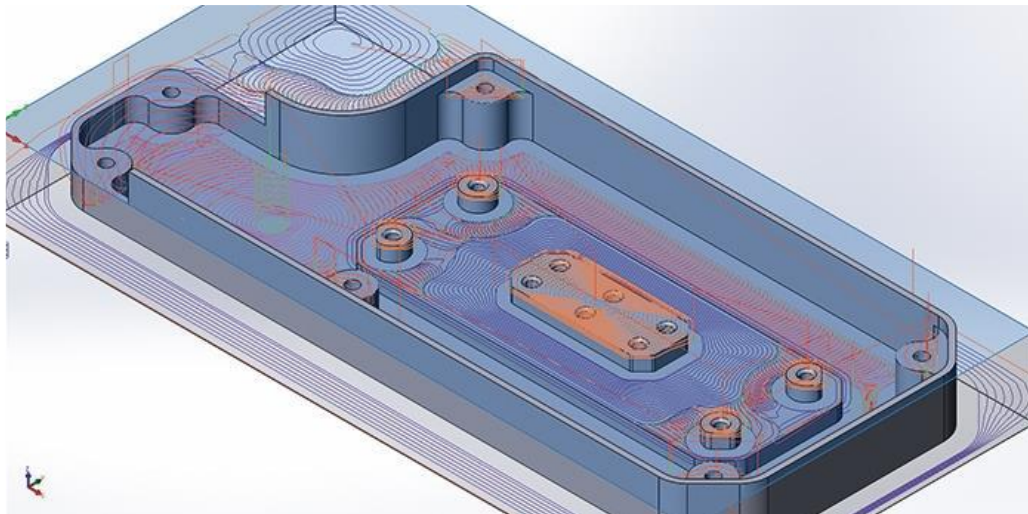


Рис.1.11. Траєкторія формоутворення спроектована модулем SolidCAM [12]

Mastercam

Mastercam є однією з найбільш розповсюджених САМ-систем для фрезерної обробки. Для контурного фрезерування використовуються стратегії 2D Contour та 3D Contour. Остання призначена для високоякісного чистового

оброблення «крутих» ділянок (steep areas): алгоритм віртуально «нарізає» геометрію на горизонтальні шари й формує траєкторію уздовж ліній перетину поверхонь, при цьому користувач може задавати крок по висоті (stepdown) [12].

Mastercam підтримує динамічні (adaptive) траєкторії, що враховують наявний припуск і дозволяють зменшити кількість холостих переміщень, а також має розвинені засоби управління входами/виходами, радіусними переходами, згладжуванням траєкторій, що критично для плавності контурної обробки.



Рис.1.12. Mastercam [12]

Autodesk Fusion 360 (Manufacture)

Fusion 360 поєднує CAD, CAM і CAE в єдиній хмарній платформі. У модулі Manufacture для контурного фрезерування використовується операція 2D Contour, яка дозволяє вибирати контури за гранями, ребрами або ескізами. Система автоматично визначає глибину різання за вибраною нижньою

кромкою, підтримує множинні проходи, припуск на бік і дно, використання вкладки Tabs для фіксації тонких елементів деталі тощо [12].

Fusion 360 має розвинуті можливості симуляції, оптимізації часу обробки та генерації керуючих програм для широкого спектра ЧПК-верстатів. Завдяки хмарній архітектурі зручно організовувати спільну роботу та зберігання даних про траєкторії.

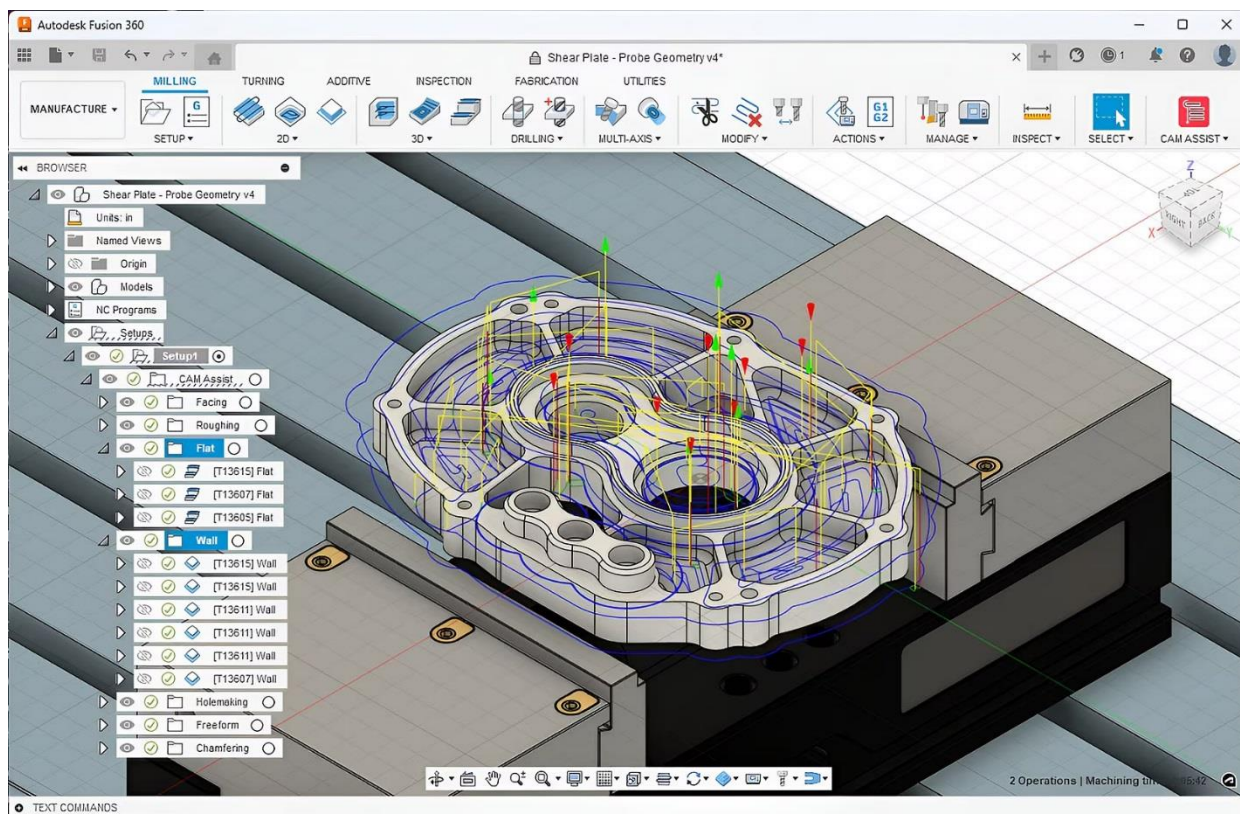


Рис.1.13. Autodesk Fusion 360 (Manufacture) [12]

Siemens NX CAM

Siemens NX CAM орієнтована на високотехнологічні виробництва й широко застосовується в авіакосмічній і автомобільній галузях. Для контурного фрезерування передбачено низку стратегій (Contour Area, Variable Contour, Profile), включно з багатовісними. Вони дозволяють виконувати обробку профілів складної просторової форми з контролем відстані до поверхні, використанням різних схем набігання та відведення інструмента [12].

NX CAM має тісну інтеграцію з модулем інженерного аналізу та кінематичного моделювання верстата, що дозволяє оцінювати вплив кінематики та динаміки обладнання на реальну траєкторію контурного фрезерування.

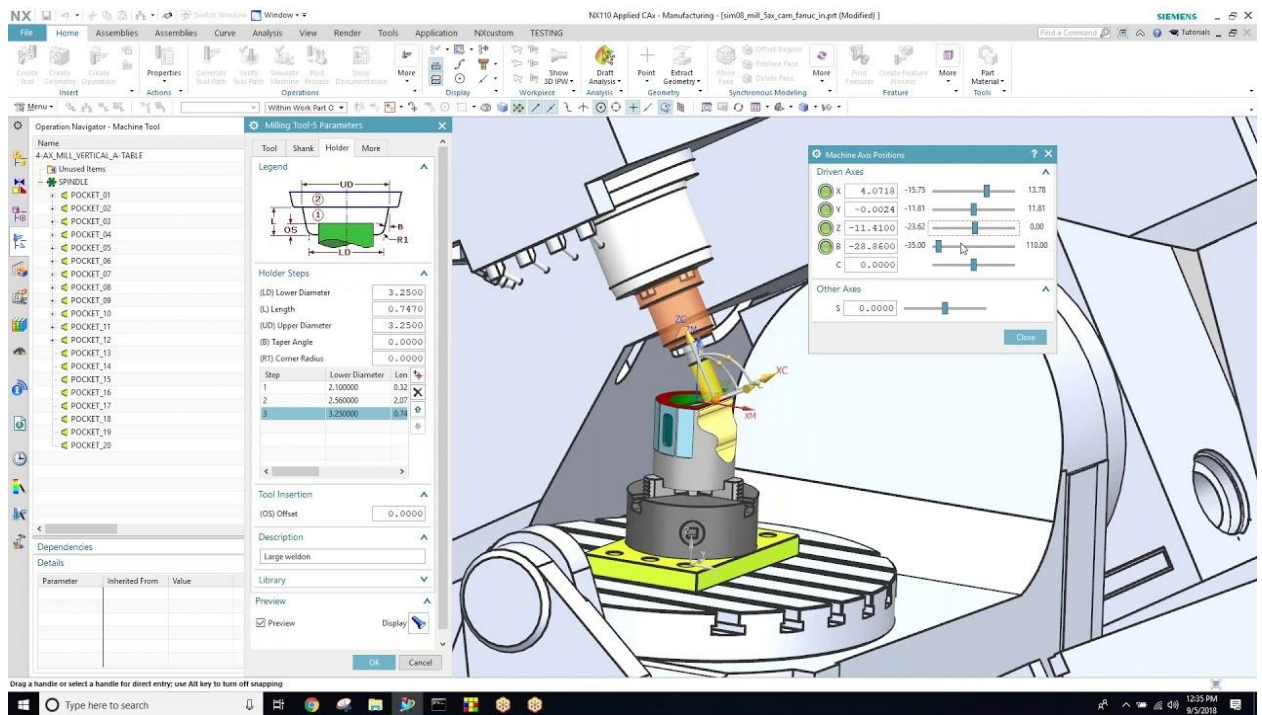


Рис.1.14. Siemens NX CAM [12]

Сучасні CAM-системи забезпечують широкий спектр інструментів для побудови траєкторій контурного фрезерування - від простих 2D профільних операцій до багатовісних стратегій обробки складних поверхонь. Вибір конкретного програмного продукту залежить від:

- складності геометрії деталі;
- наявної CAD-платформи на підприємстві;
- вимог до багатовісної обробки та рівня автоматизації;
- потреб у симуляції, перевірці зіткнень і оптимізації машинного часу.

Таблиця 1.4

Порівняння можливостей САМ-систем для контурного фрезерування

САМ-система	Інтеграція з CAD	Підтримка 5-осьового контурного фрезерування	Адаптивні/динамічні траєкторії	Основні переваги для контурів
Solid CAM	Всередині SOLIDWORKS, Inventor, Solid Edge	Так, Contour 5-Axis, Swarf, ін.	iMachining (адаптивне фрезерування)	Глибока інтеграція з CAD, потужні 5-осьові модулі, хороша симуляція
Mastercam	Імпорт більшості CAD-форматів	Так, 4–5-осьові стратегії, 3D Contour	Dynamic Milling, stock-aware стратегії	Дуже гнучкі налаштування контурних траєкторій, розповсюдженість
Fusion 360	Єдина CAD/CAM-платформа	Підтримка 3+2 та 5-осьової обробки	Adaptive Clearing, оптимізація часу	Доступність, зручний інтерфейс, хмарне зберігання, достатньо для більшості контурних задач
Siemens NX CAM	Тісна інтеграція з NX CAD/CAE	Потужні багатовісні стратегії Variable Contour та ін.	Просунуті алгоритми оптимізації та симуляції	Орієнтація на складні, відповідальні деталі, можливість моделювання кінематики верстата

Висновки до розділу 1

Проведено комплексний аналіз теоретичних засад контурного фрезерування на верстатах з ЧПК та визначено ключові чинники, що формують точність і якість обробки. Показано, що сучасний розвиток фрезерних технологій характеризується переходом до високошвидкісної та багатовісної обробки, використанням адаптивних алгоритмів та інтеграцією CAD/CAM/CAE-рішень.

Розглянуті характеристики процесу контурного фрезерування дозволили встановити його специфіку, зокрема чутливість до кінематичних, силових, термічних та динамічних впливів. Аналіз динамічних моделей коливальних процесів показав, що стабільність роботи інструмента та жорсткість системи «верстат–інструмент–деталь» є визначальними для формування точного контуру та низької шорсткості поверхні.

Виявлено основні фактори, що впливають на якість обробки: режими різання, геометрія інструмента, точність траєкторії ЧПК, температурні ефекти та вібраційні процеси. Узагальнено, що їхній взаємний вплив потребує комплексного підходу до оптимізації технологічного процесу.

Огляд сучасних CAM-систем засвідчив, що програмні комплекси SolidCAM, Mastercam, Fusion 360 та Siemens NX CAM забезпечують широкі можливості для генерації, моделювання та підвищенні ефективності контурних траєкторій. Їхній функціонал дозволяє підвищити точність формоутворення, зменшити час обробки та мінімізувати похибки.

Таким чином, проведений аналіз створює науково обґрунтовану базу для розроблення та підвищення ефективності технології контурного фрезерування у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ЧПК

2.1. Вибір об'єкта дослідження та його технологічна характеристика

У якості об'єкта дослідження в даній роботі обрано деталь типу «Корпус» (рис.2.1), яка є складовим елементом механізмів загального машинобудівного призначення. Корпуси подібної конструкції широко застосовуються у редукторних вузлах, системах приводу, насосному обладнанні та механічних модулях, де вони виконують функції базування, кріплення та взаємного розташування валів, підшипникових опор, фланцевих з'єднань і допоміжних елементів.

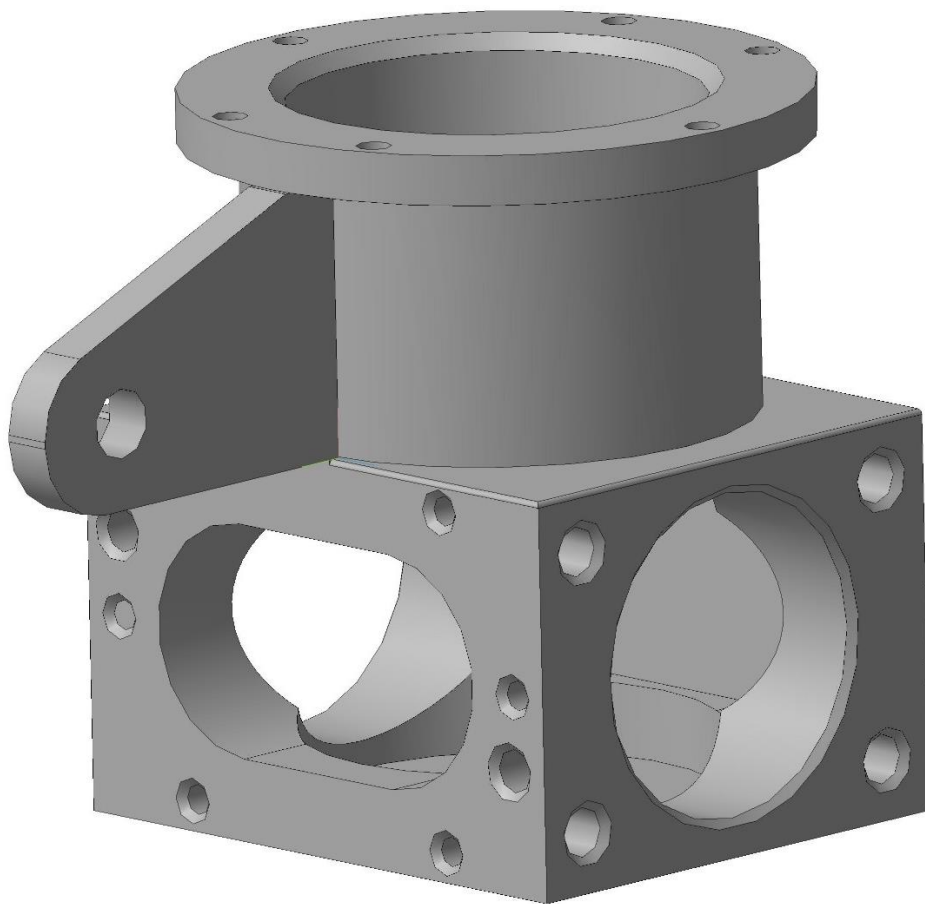


Рис.2.1. Деталь «Корпус»

Представлена деталь має комбіновану просторову геометрію: призматичну базову частину з наскрізними отворами, посадковими місцями та фланцевими поверхнями, а також циліндричний виступ, призначений для монтажу з'єднаних компонентів і забезпечення центрування. Наявність декількох взаємно перпендикулярних площин, внутрішніх порожнин, наскрізних отворів різних діаметрів і фланцевих стиків зумовлює високу технологічну складність та вимоги до точності обробки.

Мета роботи полягає в розробленні алгоритму (методики) підготовки керуючої програми для ЧПК-верстатів, який забезпечує контурне фрезерування з урахуванням та компенсацією похибок формоутворення деталі «Корпус».

Технологічна характеристика деталі

Матеріал заготовки. Для корпусних деталей найчастіше застосовують конструкційні сталі, алюмінієві сплави або чавуни. Деталь «Корпус» виготовлена з сірого чавуну СЧ20 ДСТУ 8833:2019. Матеріал забезпечує достатню жорсткість та оброблюваність при фрезеруванні.

Особливості обробки. Корпус належить до типових деталей з підвищеними вимогами до:

- точності взаємного розташування поверхонь;
- якості контурів внутрішніх порожнин;
- плавності переходів у зоні фланців і посадкових місць;
- забезпечення перпендикулярності та співвісності елементів.

Значна частина поверхонь підлягає контурному фрезеруванню у 3-осьовій або 3+2-осьовій обробці (орієнтація деталі з проміжним поворотом).

Внутрішні перехідні радіуси, фрезерування фасок, зняття припуску та формування посадок вимагають оптимізованих траєкторій, що мінімізують вібрації та забезпечують точність $\pm 0,02 \dots 0,05$ мм.

Технологічні вимоги і допуски.

Шорсткість внутрішніх фрезерованих контурів: Ra 1,6–3,2 мкм.

Посадкові поверхні фланця: Ra 1,6 мкм.

Взаємна перпендикулярність площин: до 0,03 мм/100 мм.

Значення для процесу підвищення оптимізації. Деталь «Корпус» є типовим представником складних корпусних заготовок, для яких важливими є:

- підбір оптимальних режимів різання;
- вибір стратегії контурного фрезерування;
- мінімізація часу обробки та забезпечення точності;
- запобігання вібраціям і відведенню інструмента при складних переходах;
- симуляція та оптимізація траєкторій у САМ-системі.

Короткий підсумок: обрана деталь відповідає меті дослідження, оскільки має складну комбіновану геометрію, велику кількість контурних поверхонь та високі вимоги до точності обробки. Це забезпечує можливість всебічного вивчення впливу режимів різання і траєкторій інструмента на якість контурного фрезерування, а також обґрунтовує необхідність підвищення ефективності САМ-траєкторій у наступних розділах.

2.2. Аналіз деталі «Корпус» для контурного фрезерування

Корпусні деталі є базовими елементами машин, оскільки саме на них монтуються різноманітні вузли та складальні одиниці, і точність їх взаємного розташування має зберігатися як у стані спокою, так і під час роботи обладнання під навантаженням. Відповідно, такі деталі повинні характеризуватися високою точністю виготовлення, достатньою жорсткістю та стійкістю до вібрацій, що гарантує правильну роботу механізмів і запобігає їх небажаним коливанням [16].

Розглянутий корпус належить до коробчастих суцільнолитих деталей (рис.2.2). Матеріал з якого виготовляється деталь - сірий чавун СЧ20. Деталь виконує функцію корпуса редуктора черв'ячної пари, який забезпечує передачу крутного моменту.

Отвір Ø72Н7 призначений для встановлення пари підшипників, що підтримують черв'як. У отвір Ø120Н7 монтується вал із підшипником, на який насаджується черв'ячне колесо. У конструкції передбачено різьбові отвори М10-7Н, М12-7Н, М30×2-7Н та М8-7Н.

Отвір Ø280Н9 закривається кришкою, що фіксується вісьмома болтами М12-7Н. Отвір Ø270Н9 також накривається кришкою, закріпленою на одинадцяти болтах. Отвір Ø120Н7 додатково закривається кришкою, для кріплення якої використовуються вісім болтів М10-7Н.

У корпусі передбачено оглядове вікно, яке забезпечує доступ до муфти, що встановлюється всередині редуктора [16].

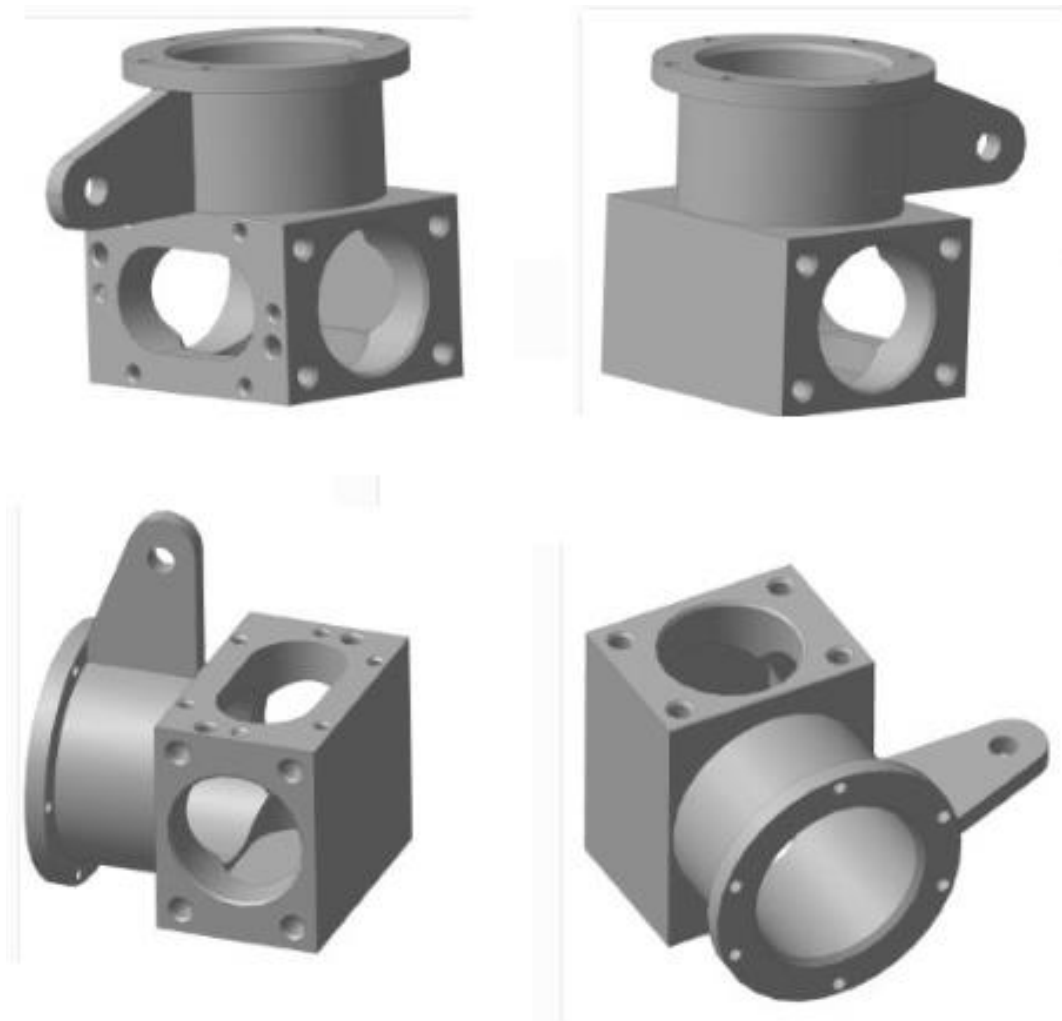


Рис.2.2. Вигляди деталі

Короткий аналіз технологічності конструкції деталі

Деталь «Корпус» (рис.2.3) має відносно складну конструкцію. Вона виготовлена із сірого чавуну, який добре піддається механічній обробці на металорізальному обладнанні. Усі поверхні доступні для різання та точного вимірювання, а досягнення необхідних розмірів не потребує великої кількості спеціального інструменту. Під час розроблення технологічного процесу можна використовувати типові рішення, оскільки форма деталі сприяє зручному контролю параметрів. Зокрема, поверхні $\varnothing 350$ і $\varnothing 330$ є зручними базами, а дна всіх отворів мають форму, що відповідає кінцю стандартного інструменту [16].

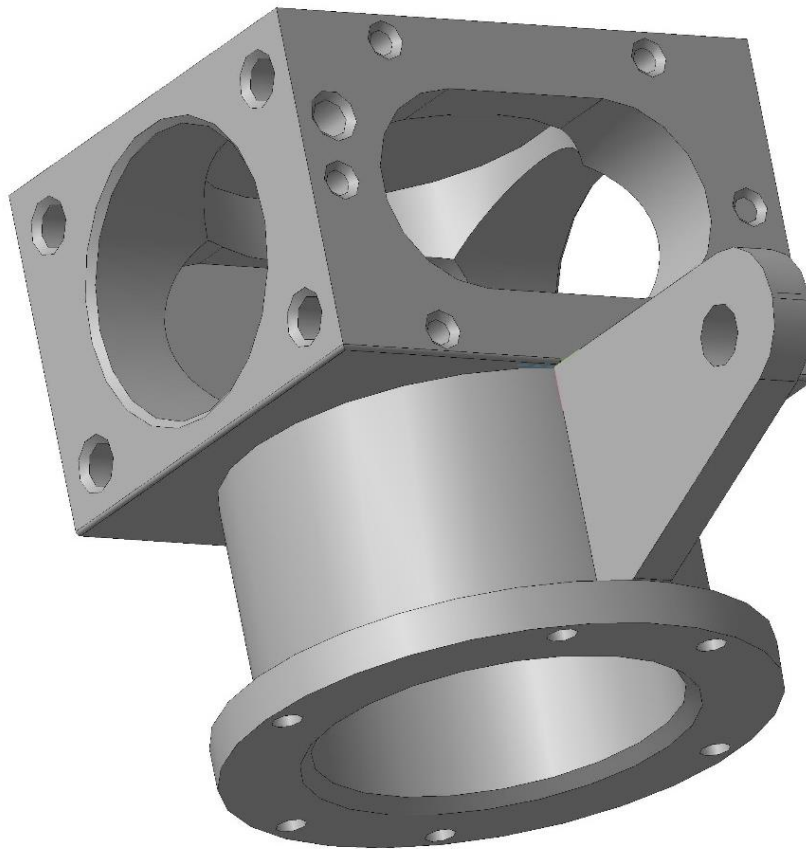


Рис.2.3. Технологічність конструкції деталі «Корпус»

Разом із тим, у конструкції є істотний недолік - виточка $\varnothing 36$, обробка якої в умовах серійного виробництва становить певну складність.

У деталі передбачено високоточні поверхні $\varnothing 120H7$ та $\varnothing 72H7$, які потребують прецизійної механічної обробки. Для дотримання вимог точності необхідно забезпечити співвісність $\varnothing 270H9$, $\varnothing 280H9$, а також різьбових отворів M10-7H і M12-7H відносно $\varnothing 120H7$, та перпендикулярність $\varnothing 72H7$ і торця $\varnothing 330$ до цієї ж бази. Для гарантування точності встановлюються вимоги щодо допуску форми - зокрема, круглості та профілю поздовжнього перерізу на $\varnothing 72H7$.

Матеріалом деталі є сірий чавун - основний конструкційний матеріал для корпусних елементів. Він має невисоку вартість, хороші ливарні властивості та дозволяє отримувати заготовки складної конфігурації. Чавун легко обробляється, а його фізико-механічні властивості можуть бути цілеспрямовано змінені за допомогою модифікування та термічної обробки. Виливки із сірого чавуну мають високу циклічну в'язкість, що забезпечує добрі демпфувальні характеристики та зменшує рівень коливань у роботі вузла [16].

Визначення виду та способу виготовлення заготовки

Спосіб виготовлення заготовок у машинобудуванні залежить від призначення деталі, її конструктивних особливостей, матеріалу, технічних вимог, типу виробництва та економічних міркувань. Оскільки деталь виготовляється із сірого чавуну, найбільш доцільним є використання ливарних технологій [13].

Існують такі основні методи литва: у піщано-глиняні форми з ручним формуванням за дерев'яними моделями, у піщано-глиняні форми з машинним формуванням за металевими моделями, а також литво в оболонкові форми, литво за виплавлюваними моделями та литво в металеві форми. Останні три способи забезпечують вищу якість відливок порівняно з традиційними піщано-глиняними формами, однак вони потребують значно більших витрат на виготовлення оснащення і складніші в організації.

З огляду на це для деталі типу «Корпус» найбільш раціональними є перші два варіанти - лиття в піщано-глиняні форми з ручним або машинним формуванням. Ручне формування за дерев'яними моделями використовується

переважно у традиційних заводських умовах. Машинне формування за металевими моделями дозволяє підвищити точність геометрії відливки, зменшити припуски на механічну обробку та, відповідно, скоротити витрати завдяки меншій масі заготовки [13].

Враховуючи зазначені переваги, оптимальним методом виготовлення заготовки обирається лиття в піщано-глиняні форми з машинним формуванням за металевими моделями (рис.2.4).

2.3. Розробка технологічного процесу виготовлення деталі, вибір обладнання та інструменту

Виходячи з конструктивних особливостей деталі «Корпус», матеріалу СЧ20 та вимог до точності й якості контурних поверхонь, технологічний процес виготовлення передбачає одержання литої заготовки з наступною механічною обробкою на верстатах з ЧПК та універсальному обладнанні [16].

Таблиця 2.1

Технологічний маршрут обробки деталі

№ опер.	Найменування операції	Короткий зміст	Обладнання
1	2	3	4
005	Заготівельна. Очищення та підготовка заготовки	Видалення литникової системи, зачистка нерівностей, контроль припусків	Дробеструминна установка, верстат для обрізки литників
010	Термообробка (нормалізація)	Нагрів, витримка та охолодження для зняття внутрішніх напружень у СЧ20	Піч для термообробки
015	Чорнове фрезерування базових площин	Обробка основних опорних площин, вирівнювання заготовки, формування технологічних баз	Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК Haas VF- 3
020	Чистове фрезерування базових площин та торців	Уточнення розмірів і взаємної перпендикулярності базових площин, забезпечення точності базування для наступних установок	Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК Haas VF- 3

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4
025	Чорнове контурне фрезерування внутрішніх порожнин	Видалення основного припуску з внутрішніх порожнин, формування основної геометрії контурів	Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК Haas VF-3 + САМ-програма
030	Чистове контурне фрезерування внутрішніх і зовнішніх контурів (ключова операція)	Оптимізовані траєкторії: чистова обробка контурів, радіусних переходів, переходів між порожнинами; забезпечення шорсткості Ra 1,6–3,2 мкм	Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК Haas VF-3 + САМ-програма
035	Свердління та розгортання монтажних отворів	Обробка гладких, зенкерованих та розгорнутих отворів на гранях корпусу	Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК Haas VF-3
040	Нарізання різьбових отворів	Свердління під різьбу, нарізання різьби метчиками або різьбофрезами	Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК Haas VF-3 (цикл Thread)
045	Обробка фланцевої поверхні та посадкових місць	Фрезерування фланця, обробка фасок, формування точних посадок під з'єднувані елементи	Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК Haas VF-3
050	Зняття фасок, заокруглення кромки	Формування фасок по контуру отворів і крайок для підвищення експлуатаційної надійності	Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК Haas VF-3/ ручний інструмент
055	Контрольні операції	Контроль геометричних розмірів, взаємного розташування поверхонь, шорсткості та співвісності	Вимірювальні прилади, КВІ (за наявності)

Роль контурного фрезерування в технологічному процесі

Операції 025 - 030 є визначальними з точки зору теми дослідження, оскільки саме на етапі чорнового та чистового контурного фрезерування:

- формуються внутрішні й зовнішні контури складної геометрії;
- забезпечуються основні параметри точності й шорсткості;
- проявляється вплив режимів різання, траєкторій інструмента, жорсткості системи та САМ-стратегії.

Подальша оптимізація цих операцій (вибір швидкості різання, подачі, глибини різання, типу фрез, стратегії траєкторії та параметрів ЧПК) дозволить зменшити час обробки, підвищити якість поверхонь і стійкість інструмента, що й становить основний зміст наступних розділів магістерської роботи.

Опис та технічні характеристики вертикально-фрезерного верстата з ЧПК Haas VF-3

Верстат Haas VF-3 (рис.2.5) - це трьохосьовий вертикальний оброблювальний центр середнього розміру з конусом шпинделя 40, призначений для високопродуктивного фрезерування корпусних, штампових та інструментальних деталей. Машина має жорстку чавунну станину, високопотужний шпиндель із безпосереднім (inline) приводом та вбудовану систему ЧПК Haas, що забезпечує точне позиціонування по осях X, Y, Z та підтримує широкі можливості програмування (G-код, цикли, жорстке нарізання різьби, робота з САМ-системами).

Верстат належить до лінійки VF-серії й характеризується робочим простором $1016 \times 508 \times 635$ мм, що дозволяє обробляти як одиночні габаритні деталі, так і кілька дрібніших за один установ. Наявність магазину-автомата інструментів на 20 позицій (з можливістю опційного збільшення) скорочує допоміжний час, а швидкі переміщення по осях (до 25,4 м/хв) дають змогу ефективно виконувати контурне фрезерування складних поверхонь [19].

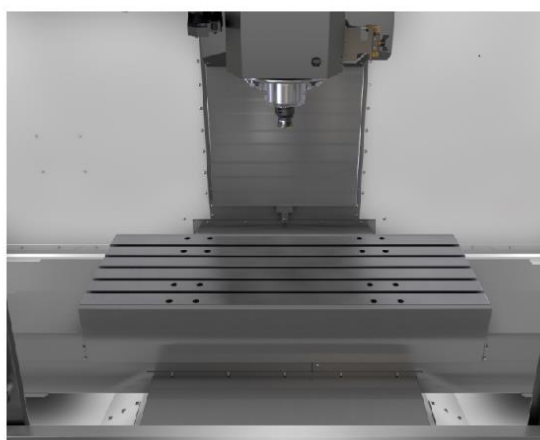
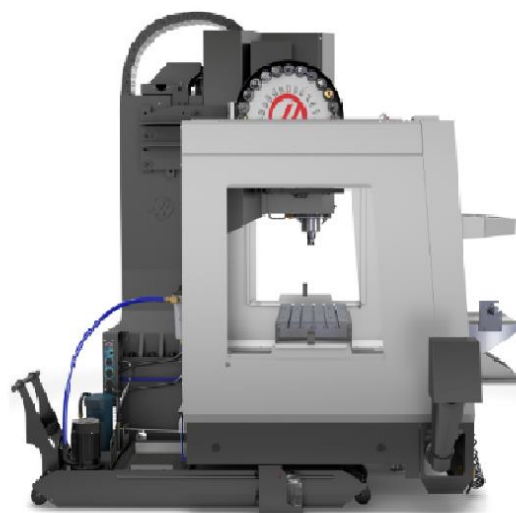


Рис.2.5. Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК Haas VF-3 [19]

Таблиця 2.2

Технічні характеристики верстата з ЧПК Haas VF-3 [19]

Розділ / Параметр	Характеристика
Робочий стіл	
Розмір робочої поверхні (X × Y)	457 × 914 мм
Т-подібні пази	16 мм, 5 шт.
Максимальна маса встановлюваної деталі	1588 кг
Робочі переміщення	
Переміщення по осі X	1016 мм
Переміщення по осі Y	508 мм
Переміщення по осі Z	635 мм
Відстань «стіл – торець шпинделя»	102–742 мм

Розділ / Параметр	Характеристика
Шпиндель	
Конус шпинделя (основний / опціонально)	ISO 40 / BT40
Максимальна швидкість обертання	8100 об/хв
Тип приводу	Прямий (inline)
Потужність двигуна шпинделя	22,4 кВт
Максимальний крутний момент (при 2000 об/хв.)	122 Н·м
Швидкості позиціонування	
Швидкі переміщення по осях X/Y/Z	25,4 м/хв
Максимальна робоча подача	16,5 м/хв
Палетна система (опція)	
Кількість палет	2
Час зміни палет	11,4 с
Магазин інструментів	
Кількість інструментів	20 / 30+1 / 50+1
Метод вибору інструмента	Випадковий (random access)
Конус інструмента	40
Максимальний діаметр інструмента	89 мм
Макс. діаметр інструмента при вільних сусідніх комірках	127 мм
Максимальна маса інструмента	5,4 кг
Середній час зміни інструмента	4,2 с
Час «стружка-до-стружки»	4,5 с
Точність	
Точність позиціонування	±0,005 мм
Точність повторного позиціонування	±0,0025 мм
Габарити та маса	
Ширина × глибина	3870 × 2510 мм
Висота	2690 мм
Маса верстата	5316 кг
Система ЧПК	HAAS

Різальний інструмент

Для вертикально-фрезерного оброблюючого центру з ЧПК Haas VF-3 (конус шпинделя ISO/BT 40) застосовується широкий спектр сучасного різального інструменту. Нижче наведено повний, систематизований перелік інструментів, які реально використовуються на таких центрах у машинобудуванні, інструментальному виробництві, виготовленні корпусних деталей та при контурному фрезеруванні деталі «Корпус» (рис.2.1).



Рис.2.6. Торцеві фрези (Face Mills) [20]



Рис.2.7. Циліндричні (кінцеві, кінцеві твердосплавні) фрези (End Mills) [20]



Рис.2.8. Радіусні фрези (Ball Nose End Mills) [20]



Рис.2.9. Кутові, фасонні, фальцеві фрези (End Mills) [20]



Рис.2.10. Пазові (Keyway / Slotting) фрези [20]



Рис.2.11. Свердла (Drills) [20]



Рис.2.12. Розгортки (Reamers) [20]



Рис.2.13. Різьбоутворюючий інструмент [20]

2.4. Розрахунок оптимальних параметрів режимів різання, нормування

Оптимізація режимів різання при контурному фрезеруванні передбачає вибір таких значень швидкості різання, подачі та глибини фрезерування, які забезпечують необхідну якість поверхні й точність обробки при мінімальному машинному часі та допустимому зношуванні інструмента. Як критерій підвищення ефективності найчастіше використовують:

- мінімізацію часу обробки;
- мінімізацію собівартості операції;
- забезпечення заданих параметрів шорсткості R_a та геометричної точності.

Первинні (базові) значення режимів беруть із табличних рекомендацій для матеріалу деталі (СЧ20) та типу фрези, після чого проводять коригування з урахуванням жорсткості системи «верстат–інструмент–деталь», конструкції корпусу та вимог до шорсткості [21].

Таблиця 2.3

Вибір режимів різання табличним методом [21]

Зміст переходу	Глибина різання, t , мм	Подача S , мм/об(S_z)	Швидкість різання V , м/хв.	Осьова сила різання P , Н	Потужність N , кВт
1	2	3	4	5	6
Фрезерувати торець $\varnothing 350$ в розмір 276,2 мм	1,6	0,15	76,7	864,2	1,2
1. Встановити, закріпити, зняти					
2. Фрезерувати торець $\varnothing 330$ в розмір 275 мм	1,6	0,15	75,3	755,04	0,9
3. Фрезерувати торець бобишки $\varnothing 160$ витримуючи розмір 80мм від торця фланця	1,2	0,29	29	3949	2,4
4. Розточити виточку $\varnothing 280H11$ на 15мм	16	0,55	78	5300	6,5

Продовження таблиці 2.3

4. Розточити виточку Ø280H11 на 15мм	1,2	0,3	156	630	2,8
5. Розточити отвір Ø120H7 начорно	1,95	0,8	11	1153,3	2,22
6. Розточити отвір Ø120H7 напівчисто	0,355	0,32	196,1	105,6	0,408
7. Розточити отвір Ø120H7 начисто	0,17	0,08	266,4	17,8	0,092
8. Розточити фаску 2×45°	2	0,37	156	1330	2,8
9. Розточити фаску 1,6×45°	1,6	0,23	204	1330	2,2
10. Зацентрувати 6 отворів M10 – 7H8	2,5	0,18	27	1060	0,44
11. Свердли 8 отворів Ø10,2 під різьбу M12 – 7H	5,1	0,25	24	2647	0,9
12. Зенкувати фаски 1 ×45° на 6-ти отворах M10 – 7H	1	0,18	21,3	118	0,39
13. Нарізати різьбу M 12 мітчиком в 8-ми отворах	1,8	1,8	7,4	1330	0,52
14. Контроль виконавцем					
15. Встановити, закріпити, зняти.					
16. Фрезерувати торець бобишки Ø165 витримуючи розмір 160мм від торця фланця	1,2	0,29	29	3949	2,4
17. Розточити виточку Ø270H11 на 5мм	1,2	0,3	156	630	2,8
18. Розточити фаску 3×45°	3	0,37	156	1650	2,8
19. Розточити фаску 1,6×45°	1,6	0,23	204	1330	2,2
20. Зацентрувати 11 отворів Ø18H11	2,5	0,18	27	1060	0,44
21. Свердли 11 отворів Ø18H11 мм	8,15	0,54	23,3	8087	2,1
22. Зенкерувати отвір Ø18H11	0,85	0,95	18,9	505	1,63
23. Свердли отвір Ø18 мм доØ16,3 мм на довжину 120 мм	8,15	0,32	23	6080	1,78
24. Зенкерувати отвір Ø18H11	0,85	0,99	18,1	505	1,81

Продовження таблиці 2.3

25. Фрезерувати торці в розмір 120 мм	1,5	0,08	40	3091	0,58
26. Зенкувати дві фаски 1×45°	1	0,18	21,3	118	0,39
27. Зацентрувати отвір Ø18H11	2,5	0,18	27	1060	0,44
28. Свердлити отвір Ø18H11 до Ø16,3	8,15	0,56	22,8	8087	2,74
29. Зенкерувати отвір Ø18H11 до Ø18H11	0,85	0,99	18,1	505	1,81
30. Фрезерувати торці в розмір 60 мм	1,4	0,1	31	3949	1,45
31. Зенкувати дві фаски 1 ×45°	1	0,18	21,3	118	0,39
32. Фрезерувати паз в розмір в=22 ^{+0,2} мм	22	0,05	19	3949	1,12
33. Фрезерувати площину бобишки Ø48мм в розмір 220 мм	3,6	0,1	35	3949	0,97
34. Фрезерувати площину бобишки Ø48мм в розмір 165 мм	3,6	0,1	35	3949	0,97
35. Фрезерувати площину бобишки Ø48мм в розмір 160 мм	3,6	0,1	35	3949	0,97
36. Зацентрувати отвір М8-7Н	2,5	0,18	27	1060	0,44

Нормування технологічного процесу

У відповідності з літературою [21] норму штучно-калькуляційного часу, що затрачується а операцію в серійному виробництві розраховують за формулою:

$$T_{шт.к} = T_{шт} + \frac{T_{п.з}}{n} = T_o + T_v + T_{обсл} + T_{л.п} + \frac{T_{п.з}}{n}, \text{хв.} \quad (2.1)$$

де T_o , T_v – відповідно основний і допоміжний технологічний час, хв.;

$T_{обсл}$ – час на обслуговування робочого місця, хв.;

$T_{л.п}$ – час перерв на особисті потреби, хв.;

n – кількість заготовок у партії;

$T_{п.з}$ – норма підготовчо-заключного часу на обробку партії заготовок, хв.

Основний технологічний час для одного переходу був розрахований у попередньому пункті за наступною формулою:

$$T_o = \frac{L \cdot i}{S_m}.$$

Норми допоміжного часу T_v , що враховує дії робочого, які забезпечують безпосереднє виконання основної технологічної роботи, визначаються за літературою [21].

$T_{обсл}$ та $T_{л.п}$ приймаємо у відсотках від оперативного часу $T_{опер} = T_o + T_v$ відповідно рекомендаціям [21], а величину $T_{п.з}$ визначаємо по нормативам [21].

Таблиця 2.4

Вибір норм часу табличним методом [21]

Найменування операції	Основний технологічний час T_o , хв.	Складові допоміжного часу, мм			Допоміжний час $\sum T_o$, хв.	Час на організаційне та технічне обслуговування робочого місця, відпочинок і особисті потреби	Коефіцієнт на допоміжний час, $K_{т.з.}$	Норма штучного часу $T_{шт}$, хв.	Підготовчо-заключний час $T_{п.з.}$, хв.	Норма штучно-калькуляційного часу $T_{шт.к.}$, хв
		Час на установку і зняття	Час пов'язаний з операцією	Час на контрольні вимірювання						
Багатоцільова 015	0,78	0,10	0,24	0,08	0,42	0,12	1	1,32	9	1,339
Багатоцільова 020	4,10 2	0,46	3,3	2,72	6,48	1,64	0,76	9,7	20,25	9,72
Багатоцільова 025	4,4	0,46	3,3	2,72	6,48	1,64	0,76	9,98	20,25	10,01
Багатоцільова 030	0,69 3	0,10	0,17	0,08	0,35	0,042	1	1,15	8	1,158

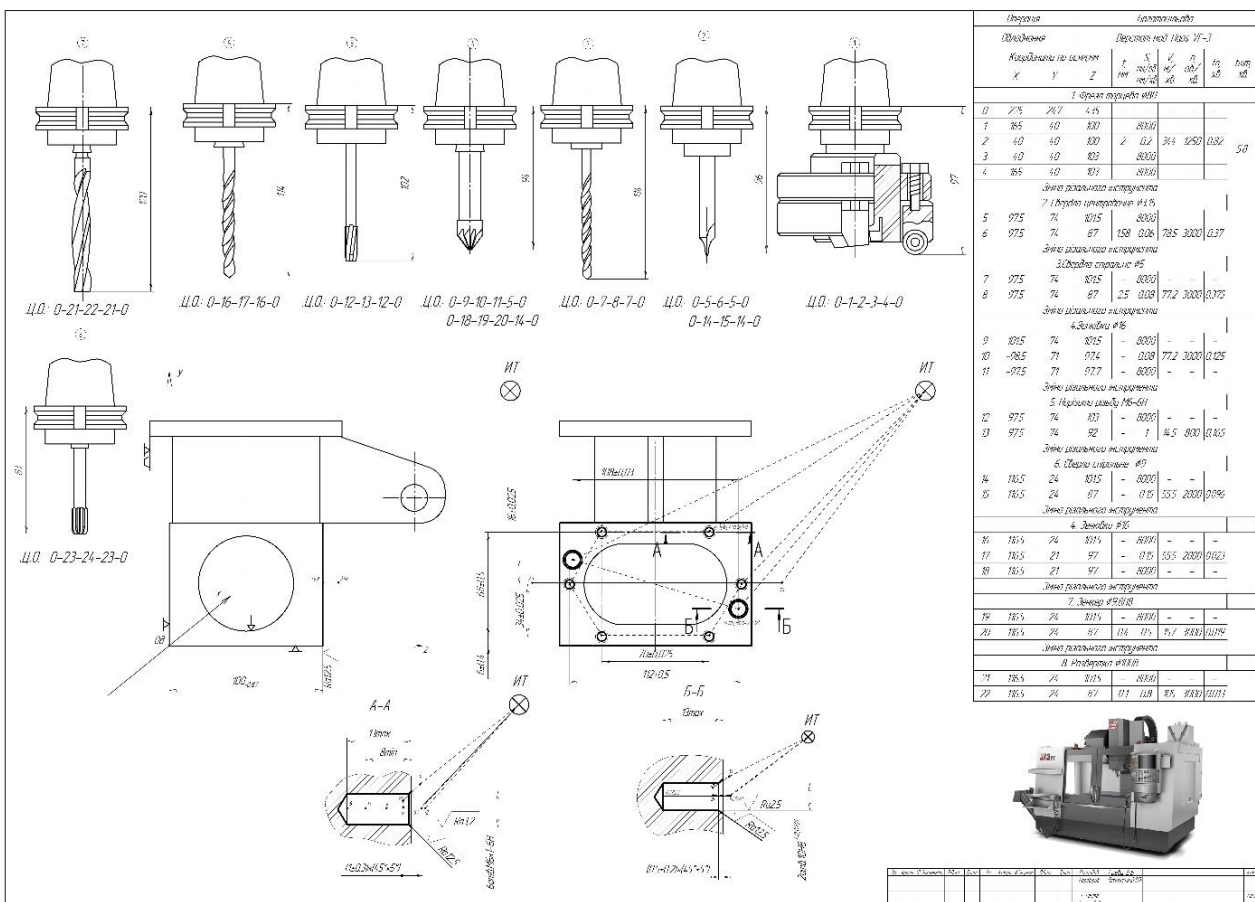
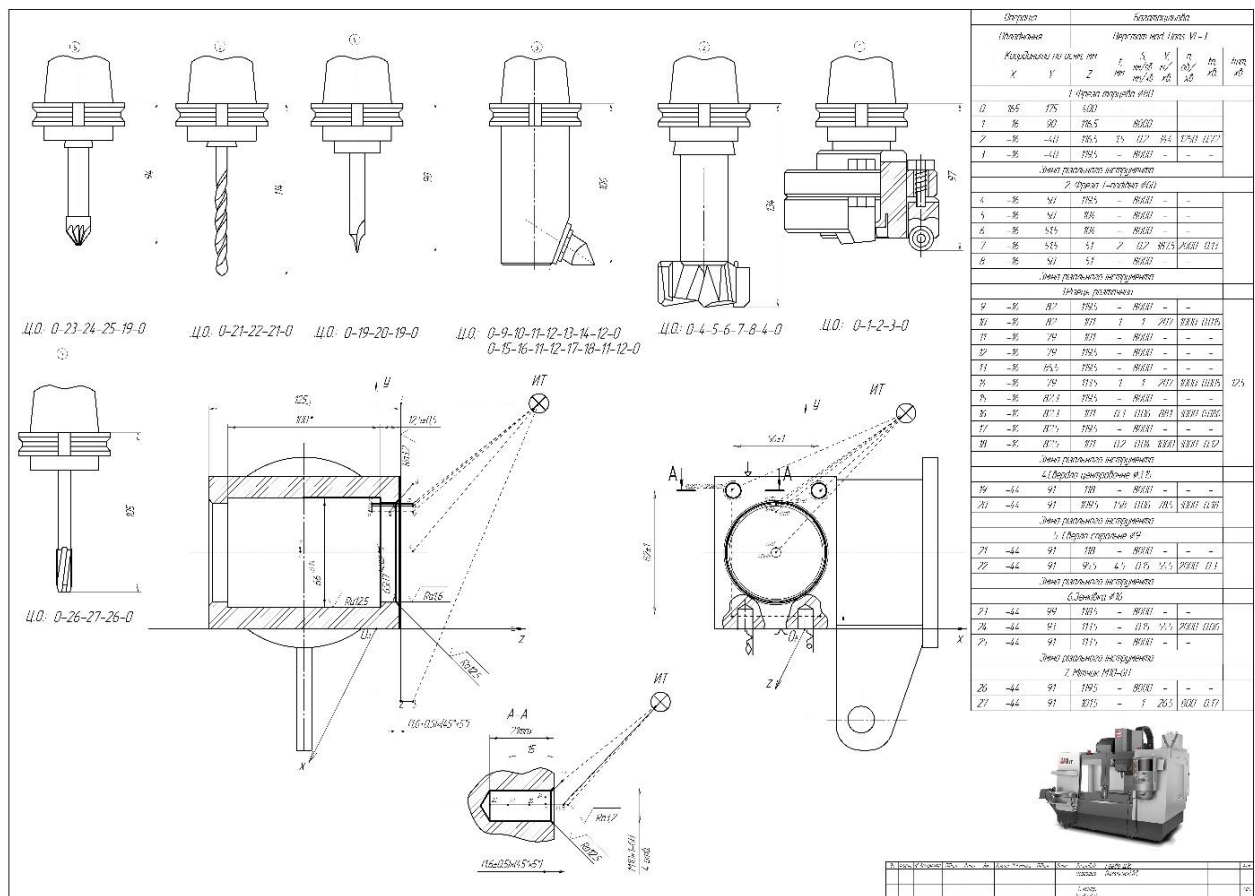


Рис.2.14. Траектория руху РІ при контурній обробці

Характеристика траєкторій інструмента при контурному фрезеруванні

Траєкторія руху інструмента при контурній обробці визначається:

- геометрією контуру (прямолінійні ділянки, радіусні переходи, складні криволінійні сегменти);
- типом інтерполяції (лінійна, дугова, spline-інтерполяція);
- стратегією обробки, заданою в САМ-системі (обробка по замкненому контуру, по рівнях, з відступами, зі зміною напрямку подачі тощо);
- додатковими параметрами - підводи, відводи, підйоми й опускання інструмента, переходи між контурами.

У реальних програмах керування траєкторія часто розбивається на велику кількість дрібних відрізків (сукупність лінійних сегментів), що може викликати часті цикли розгону–гальмування, збільшення часу обробки та появу мікронерівностей через нестабільну подачу.

Методи аналізу траєкторій інструмента

Аналіз ефективності траєкторій доцільно виконувати в кількох аспектах:

1. Геометричний аналіз:
 - перевірка відповідності інструментальної траєкторії теоретичному контуру;
 - виявлення надлишкових проходів по одній і тій самій ділянці;
 - оцінка мінімальних радіусів заокруглення, що змушують систему ЧПК знижувати подачу.
2. Кінематичний аналіз:
 - відстеження реальної швидкості подачі вздовж траєкторії;
 - локалізація зон, де відбувається різке зниження швидкості (через малі радіуси, різкі переломи траєкторії, дуже короткі лінійні сегменти);
 - оцінка кількості переходів «розгін–гальмування» на одиницю довжини траєкторії.
3. Технологічний аналіз:
 - ідентифікація ділянок із недостатнім чи надмірним завантаженням інструмента;

- виявлення «холостих» ходів (коли інструмент рухається без зняття припуску);

- перевірка відповідності напрямку фрезерування (зустрічне/попутне) вимогам до якості поверхні та стійкості інструмента.

4. Візуалізація та симуляція:

- використання вбудованих засобів симуляції САМ-системи для перегляду послідовності проходів, виявлення зон перевантаження або, навпаки, «порожніх» переміщень;

- застосування кольорового картування швидкості подачі чи завантаження інструмента для наочної ідентифікації проблемних зон.

Неефективні ділянки траєкторії можна класифікувати за їхнім впливом на процес (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5

Типові неефективні зони руху інструмента

Тип неефективної зони	Характеристика	Наслідки
Холості переміщення (air cutting)	Рух інструмента над поверхнею без зняття припуску	Збільшення машинного часу без покращення якості
Надлишкові проходи	Повторне проходження тієї ж ділянки при відсутності припуску	Марна витрата ресурсу інструмента, збільшення часу
Короткі дрібносегментні ділянки	Траєкторія розбита на велику кількість малих відрізків	Часті розгони–гальмування, нестабільна подача, сліди на поверхні
Зони з малими радіусами повороту	Різкі зміни напрямку, малі радіуси	Зниження подачі, можливі вібрації, сліди повороту на контурі
Часті підйоми/опускання інструмента	Часті переходи в безпечну висоту і назад	Зайвий допоміжний час, особливо при великій кількості контурів
Нераціональна послідовність обробки	Часта зміна зон обробки без логічної послідовності	Зростання часу, збільшення ризику помилок, ускладнення контролю

Критерії оцінки ефективності траєкторій

Для кількісної оцінки ефективності траєкторій можна використовувати такі показники:

- частка корисних переміщень (відношення довжини ділянок зі зняттям припуску до загальної довжини траєкторії);
- середня та мінімальна швидкість подачі по траєкторії (чим менша різниця між ними – тим більш рівномірним є процес);
- кількість переходів «холостий хід – різання»;
- кількість різких змін напрямку (кут перелому траєкторії понад задане значення);
- час обробки однієї деталі у порівнянні з базовим варіантом траєкторії.

На основі цих критеріїв виконується порівняльний аналіз базової та оптимізованої траєкторій, що дозволяє обґрунтувати доцільність внесених змін.

Напрями підвищення ефективності та усунення неефективних зон

За результатами аналізу траєкторій можуть бути запропоновані такі заходи:

- заміна стратегії обробки (наприклад, перехід від простого контурного проходу до адаптивної або багаторівневої обробки);
- збільшення радіусів заокруглення у кутах та використання spline-траєкторій для згладжування руху;
- мінімізація кількості холостих переміщень за рахунок раціональної послідовності обробки й об'єднання контурів;
- зменшення дроблення траєкторії на дрібні сегменти (налаштування допусків інтерполяції в САМ-системі);
- підвищення ефективності підводів і відводів (спіральні, радіусні підходи замість прямолінійних з різким входженням у матеріал);
- використання можливостей ЧПК-системи (функції «look-ahead», згладжування траєкторій, обмеження jerk-ускорень).

Отже, аналіз траєкторій інструмента при контурному фрезеруванні деталі «Корпус» дозволяє виявити неефективні зони руху, які не впливають на точність формоутворення, але суттєво збільшують машинний час і зношування інструмента. Системний підхід до оцінювання геометричних, кінематичних і технологічних характеристик траєкторії, у поєднанні із засобами симуляції в САМ-системі, створює основу для подальшої оптимізації процесу та підвищення ефективності обробки деталі типу «Корпус» на верстаті Haas VF-3.

2.6. Написання G-коду для обробки деталі «Корпус» за допомогою SolidWorks CAM

У межах роботи було розроблено керуючу програму на мові G-коду для вертикально-фрезерного верстата з ЧПК Haas VF-3, призначену для багатоцільових операцій (025, 030) обробки деталі типу «Корпус» згідно з кресленням (рис. 2.1 «Корпус» та карти наладок інструменту рис. 2.14). Програма реалізує послідовну зміну інструментів, показаних на кресленні та виконує такі операції: чорнове й чистове фрезерування зовнішнього контуру, обробку циліндричного отвору, свердління й розгортання кріпильних отворів, зняття фасок і обробку базувальних елементів.

Операція 025. Багатоцільова

O0001	N15 Z55.25 F219.843
N1 G21	N16 X75.494 F879.371
N2 (6MM CRB 2FL 19 LOC)	N17 X68.352 Y123.48
N3 G91 G28 X0 Y0 Z0	N18 G03 X56.956 Y123.505 I-5.852 J-70.98
N4 T01 M06	N19 G01 X49.795 Y122.946
N5 S7868 M03	N20 X45.135
N6 (RoughMill)	N21 Z55. F219.843
N7 G90 G54 G00 X45.135 Y122.946	N22 X49.795 F879.371
N8 G43 Z67.5 H01 M08	N23 X56.956 Y123.505
N9 G01 Z60. F219.843	N24 G02 X68.352 Y123.48 I5.544 J-71.005
N10 G17 X49.795 F879.371	N25 G01 X75.494 Y122.891
N11 X56.956 Y123.505	N26 X80.135
N12 G02 X68.352 Y123.48 I5.544 J-71.005	N27 G00 Z67.5
N13 G01 X75.494 Y122.891	N28 Y119.42
N14 X80.135	N29 G01 Z60. F219.843

N30 X75.351 F879.371
 N31 X68.066 Y120.021
 N32 G03 X57.226 Y120.044 I-5.566 J-67.521
 N33 G01 X49.93 Y119.475
 N34 X45.135
 N35 Z55.25 F219.843
 N36 X49.93 F879.371
 N37 X57.226 Y120.044
 N38 G02 X68.066 Y120.021 I5.274 J-67.544
 N39 G01 X75.351 Y119.42
 N40 X80.135
 N41 Z55. F219.843
 N42 X75.351 F879.371
 N43 X68.066 Y120.021
 N44 G03 X57.226 Y120.044 I-5.566 J-67.521
 N45 G01 X49.93 Y119.475
 N46 X45.135
 N47 Z60. F219.843
 N48 X49.93 F879.371
 N49 X57.226 Y120.044
 N50 G02 X68.066 Y120.021 I5.274 J-67.544
 N51 G01 X75.351 Y119.42
 N52 X80.135
 N53 Z55.25 F219.843
 N54 X75.351 F879.371
 N55 X68.066 Y120.021
 N56 G03 X57.226 Y120.044 I-5.566 J-67.521
 N57 G01 X49.93 Y119.475
 N58 X45.135
 N59 Z55. F219.843
 N60 X49.93 F879.371
 N61 X57.226 Y120.044
 N62 G02 X68.066 Y120.021 I5.274 J-67.544

N63 G01 X75.351 Y119.42
 N64 X80.135
 N65 G00 Z67.5
 N66 Z90.
 N67 Contour
 N68 X51.569 Y123.334
 N69 Z68.
 N70 G01 Z60. F219.843
 N71 G41 D21 X55.521 Y119.954 F659.529
 N72 G03 X56.249 Y119.717 I.65 J.76
 N73 G01 X57.246 Y119.795 F879.371
 N74 G02 X68.046 Y119.772 I5.254 J-67.295
 N75 G01 X69.042 Y119.69
 N76 G03 X69.771 Y119.923 I.082 J.997
 N77 G40 G01 X73.738 Y123.286
 N78 G00 Z68.
 N79 X51.569 Y123.334
 N80 Z63.
 N81 G01 Z55. F219.843
 N82 G41 D21 X55.521 Y119.954 F659.529
 N83 G03 X56.249 Y119.717 I.65 J.76
 N84 G01 X57.246 Y119.795 F879.371
 N85 G02 X68.046 Y119.772 I5.254 J-67.295
 N86 G01 X69.042 Y119.69
 N87 G03 X69.771 Y119.923 I.082 J.997
 N88 G40 G01 X73.738 Y123.286
 N89 G00 Z68.
 N90 Z90. M09
 N91 G91 G28 Z0
 N92 (12MM CRB 2FL 25 LOC)
 N93 T03 M06
 N94 S6557 M03

Операція 030. Багатоцільова

N95 (RoughMill3)
 N96 G90 G54 G00 X62.5 Y52.5
 N97 G43 Z67.5 H03 M08
 N98 G01 Z59. F183.202
 N99 X65.15 F366.405
 N100 G03 I-2.65 J0 F732.81
 N101 G01 X69.95
 N102 G03 I-7.45 J0
 N103 G01 X74.75
 N104 G03 I-12.25 J0
 N105 G01 X79.55
 N106 G03 I-17.05 J0
 N107 G01 X84.35
 N108 G03 I-21.85 J0
 N109 G01 X89.15
 N110 G03 I-26.65 J0

N111 G01 X93.95
 N112 G03 I-31.45 J0
 N113 G01 X98.75
 N114 G03 I-36.25 J0
 N115 I-36.25 J0
 N116 G01 X62.5
 N117 G00 Z67.5
 N118 Z61.5
 N119 G01 Z53.375 F183.202
 N120 X65.15 F366.405
 N121 G03 I-2.65 J0 F732.81
 N122 G01 X69.95
 N123 G03 I-7.45 J0
 N124 G01 X74.75
 N125 G03 I-12.25 J0
 N126 G01 X79.55

N127 G03 I-17.05 J0
N128 G01 X84.35
N129 G03 I-21.85 J0
N130 G01 X89.15
N131 G03 I-26.65 J0
N132 G01 X93.95
N133 G03 I-31.45 J0
N134 G01 X98.75
N135 G03 I-36.25 J0
N136 I-36.25 J0
N137 G01 X62.5
N138 G00 Z67.5
N139 Z55.875
N140 G01 Z47.75 F183.202
N141 X65.15 F366.405
N142 G03 I-2.65 J0 F732.81
N143 G01 X69.95
N144 G03 I-7.45 J0
N145 G01 X74.75
N146 G03 I-12.25 J0
N147 G01 X79.55
N148 G03 I-17.05 J0
N149 G01 X84.35
N150 G03 I-21.85 J0
N151 G01 X89.15
N152 G03 I-26.65 J0
N153 G01 X93.95
N154 G03 I-31.45 J0
N155 G01 X98.75
N156 G03 I-36.25 J0
N157 I-36.25 J0
N158 G01 X62.5
N159 G00 Z67.5
N160 Z50.25
N161 G01 Z42.125 F183.202
N162 X65.15 F366.405
N163 G03 I-2.65 J0 F732.81
N164 G01 X69.95
N165 G03 I-7.45 J0
N166 G01 X74.75
N167 G03 I-12.25 J0
N168 G01 X79.55
N169 G03 I-17.05 J0
N170 G01 X84.35
N171 G03 I-21.85 J0
N172 G01 X89.15
N173 G03 I-26.65 J0
N174 G01 X93.95
N175 G03 I-31.45 J0
N176 G01 X98.75
N177 G03 I-36.25 J0
N178 I-36.25 J0

N179 G01 X62.5
N180 G00 Z67.5
N181 Z44.625
N182 G01 Z36.499 F183.202
N183 X65.15 F366.405
N184 G03 I-2.65 J0 F732.81
N185 G01 X69.95
N186 G03 I-7.45 J0
N187 G01 X74.75
N188 G03 I-12.25 J0
N189 G01 X79.55
N190 G03 I-17.05 J0
N191 G01 X84.35
N192 G03 I-21.85 J0
N193 G01 X89.15
N194 G03 I-26.65 J0
N195 G01 X93.95
N196 G03 I-31.45 J0
N197 G01 X98.75
N198 G03 I-36.25 J0
N199 I-36.25 J0
N200 G01 X62.5
N201 G00 Z67.5
N202 Z38.999
N203 G01 Z30.874 F183.202
N204 X65.15 F366.405
N205 G03 I-2.65 J0 F732.81
N206 G01 X69.95
N207 G03 I-7.45 J0
N208 G01 X74.75
N209 G03 I-12.25 J0
N210 G01 X79.55
N211 G03 I-17.05 J0
N212 G01 X84.35
N213 G03 I-21.85 J0
N214 G01 X89.15
N215 G03 I-26.65 J0
N216 G01 X93.95
N217 G03 I-31.45 J0
N218 G01 X98.75
N219 G03 I-36.25 J0
N220 I-36.25 J0
N221 G01 X62.5
N222 G00 Z67.5
N223 Z33.374
N224 G01 Z25.249 F183.202
N225 X65.15 F366.405
N226 G03 I-2.65 J0 F732.81
N227 G01 X69.95
N228 G03 I-7.45 J0
N229 G01 X74.75
N230 G03 I-12.25 J0

N231 G01 X79.55
N232 G03 I-17.05 J0
N233 G01 X84.35
N234 G03 I-21.85 J0
N235 G01 X89.15
N236 G03 I-26.65 J0
N237 G01 X93.95
N238 G03 I-31.45 J0
N239 G01 X98.75
N240 G03 I-36.25 J0
N241 I-36.25 J0
N242 G01 X62.5
N243 G00 Z67.5
N244 Z27.749
N245 G01 Z19.624 F183.202
N246 X65.15 F366.405
N247 G03 I-2.65 J0 F732.81
N248 G01 X69.95
N249 G03 I-7.45 J0
N250 G01 X74.75
N251 G03 I-12.25 J0
N252 G01 X79.55
N253 G03 I-17.05 J0
N254 G01 X84.35
N255 G03 I-21.85 J0
N256 G01 X89.15
N257 G03 I-26.65 J0
N258 G01 X93.95
N259 G03 I-31.45 J0
N260 G01 X98.75
N261 G03 I-36.25 J0
N262 I-36.25 J0
N263 G01 X62.5
N264 G00 Z67.5
N265 Z22.124
N266 G01 Z13.999 F183.202
N267 X65.15 F366.405
N268 G03 I-2.65 J0 F732.81
N269 G01 X69.95
N270 G03 I-7.45 J0
N271 G01 X74.75
N272 G03 I-12.25 J0
N273 G01 X79.55
N274 G03 I-17.05 J0
N275 G01 X84.35
N276 G03 I-21.85 J0
N277 G01 X89.15
N278 G03 I-26.65 J0
N279 G01 X93.95
N280 G03 I-31.45 J0
N281 G01 X98.75
N282 G03 I-36.25 J0

N283 I-36.25 J0
N284 G01 X62.5
N285 G00 Z67.5
N286 Z16.499
N287 G01 Z8.374 F183.202
N288 X65.15 F366.405
N289 G03 I-2.65 J0 F732.81
N290 G01 X69.95
N291 G03 I-7.45 J0
N292 G01 X74.75
N293 G03 I-12.25 J0
N294 G01 X79.55
N295 G03 I-17.05 J0
N296 G01 X84.35
N297 G03 I-21.85 J0
N298 G01 X89.15
N299 G03 I-26.65 J0
N300 G01 X93.95
N301 G03 I-31.45 J0
N302 G01 X98.75
N303 G03 I-36.25 J0
N304 I-36.25 J0
N305 G01 X62.5
N306 G00 Z67.5
N307 Z10.874
N308 G01 Z2.749 F183.202
N309 X65.15 F366.405
N310 G03 I-2.65 J0 F732.81
N311 G01 X69.95
N312 G03 I-7.45 J0
N313 G01 X74.75
N314 G03 I-12.25 J0
N315 G01 X79.55
N316 G03 I-17.05 J0
N317 G01 X84.35
N318 G03 I-21.85 J0
N319 G01 X89.15
N320 G03 I-26.65 J0
N321 G01 X93.95
N322 G03 I-31.45 J0
N323 G01 X98.75
N324 G03 I-36.25 J0
N325 I-36.25 J0
N326 G01 X62.5
N327 G00 Z67.5
N328 Z5.249
N329 G01 Z-2.877 F183.202
N330 X65.15 F366.405
N331 G03 I-2.65 J0 F732.81
N332 G01 X69.95
N333 G03 I-7.45 J0
N334 G01 X74.75

N335 G03 I-12.25 J0	N385 G03 I-31.45 J0
N336 G01 X79.55	N386 G01 X98.75
N337 G03 I-17.05 J0	N387 G03 I-36.25 J0
N338 G01 X84.35	N388 I-36.25 J0
N339 G03 I-21.85 J0	N389 G01 X62.5
N340 G01 X89.15	N390 G00 Z67.5
N341 G03 I-26.65 J0	N391 Z-11.627
N342 G01 X93.95	N392 G01 Z-19.752 F183.202
N343 G03 I-31.45 J0	N393 X65.15 F366.405
N344 G01 X98.75	N394 G03 I-2.65 J0 F732.81
N345 G03 I-36.25 J0	N395 G01 X69.95
N346 I-36.25 J0	N396 G03 I-7.45 J0
N347 G01 X62.5	N397 G01 X74.75
N348 G00 Z67.5	N398 G03 I-12.25 J0
N349 Z-.377	N399 G01 X79.55
N350 G01 Z-8.502 F183.202	N400 G03 I-17.05 J0
N351 X65.15 F366.405	N401 G01 X84.35
N352 G03 I-2.65 J0 F732.81	N402 G03 I-21.85 J0
N353 G01 X69.95	N403 G01 X89.15
N354 G03 I-7.45 J0	N404 G03 I-26.65 J0
N355 G01 X74.75	N405 G01 X93.95
N356 G03 I-12.25 J0	N406 G03 I-31.45 J0
N357 G01 X79.55	N407 G01 X98.75
N358 G03 I-17.05 J0	N408 G03 I-36.25 J0
N359 G01 X84.35	N409 I-36.25 J0
N360 G03 I-21.85 J0	N410 G01 X62.5
N361 G01 X89.15	N411 G00 Z67.5
N362 G03 I-26.65 J0	N412 Z-17.252
N363 G01 X93.95	N413 G01 Z-20.002 F183.202
N364 G03 I-31.45 J0	N414 X65.15 F366.405
N365 G01 X98.75	N415 G03 I-2.65 J0 F732.81
N366 G03 I-36.25 J0	N416 G01 X69.95
N367 I-36.25 J0	N417 G03 I-7.45 J0
N368 G01 X62.5	N418 G01 X74.75
N369 G00 Z67.5	N419 G03 I-12.25 J0
N370 Z-6.002	N420 G01 X79.55
N371 G01 Z-14.127 F183.202	N421 G03 I-17.05 J0
N372 X65.15 F366.405	N422 G01 X84.35
N373 G03 I-2.65 J0 F732.81	N423 G03 I-21.85 J0
N374 G01 X69.95	N424 G01 X89.15
N375 G03 I-7.45 J0	N425 G03 I-26.65 J0
N376 G01 X74.75	N426 G01 X93.95
N377 G03 I-12.25 J0	N427 G03 I-31.45 J0
N378 G01 X79.55	N428 G01 X98.75
N379 G03 I-17.05 J0	N429 G03 I-36.25 J0
N380 G01 X84.35	N430 I-36.25 J0
N381 G03 I-21.85 J0	N431 G01 X62.5
N382 G01 X89.15	N432 G00 Z67.5
N383 G03 I-26.65 J0	N433 Z90.
N384 G01 X93.95	

Висновки до розділу 2

Проведено комплексне дослідження процесу контурного фрезерування деталі типу «Корпус» та визначено фактори, що впливають на формування якісних поверхонь при її обробці на верстаті з ЧПК. На основі аналізу геометрії корпусу сформовано технологічні бази та обґрунтовано вибір заготовки, що забезпечує мінімальні припуски й стабільність розмірів.

Розроблено детальний технологічний процес виготовлення деталі, обрано оптимальне обладнання (вертикально-фрезерний оброблюючий центр Haas VF-3) та підібрано відповідний різальний інструмент для чорнової й чистової обробки. Виконані розрахунки режимів різання та нормування дозволили визначити раціональні значення швидкості, подачі й глибини фрезерування для забезпечення потрібних параметрів точності й шорсткості поверхні.

Аналіз траєкторій інструмента показав наявність зон з нераціональними переміщеннями та потенційними втратами часу. Виявлені неефективні ділянки стали основою для подальшої оптимізації САМ-траєкторій. Завершальним етапом став синтез G-коду для обробки деталі, що підтвердив можливість практичної реалізації розроблених технічних рішень.

Отримані результати створюють підґрунтя для підвищення ефективності процесу контурного фрезерування в наступному розділі та дозволяють оцінити ефективність запропонованих технологічних заходів.

РОЗДІЛ 3

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ЧПК-ТЕХНОЛОГІЙ

3.1. Постановка задачі підвищення ефективності процесу фрезерування

Підвищення ефективності процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК полягає у визначенні такого поєднання режимів різання, траєкторій руху інструмента та параметрів ЧПК-програми, що забезпечує мінімальний час обробки та стабільну якість сформованих поверхонь при дотриманні обмежень щодо навантаження на інструмент, жорсткість системи та продуктивність верстата.

Постановка задачі передбачає вибір цільової функції, яка відображає ефективність процесу. У контурному фрезеруванні основними критеріями підвищення ефективності можуть бути:

- мінімізація машинного часу операції;
- мінімізація собівартості обробки;
- забезпечення поверхневих параметрів (R_a , R_z) відповідно до технічних вимог;
- зменшення зношування інструмента та вібрацій у системі «верстат - інструмент - деталь».

Оптимізаційна задача формулюється з урахуванням технологічних обмежень:

- максимально допустимої швидкості та подачі для інструмента;
- граничних сил різання та потужності приводу шпинделя;
- кінематичних характеристик верстата Haas VF-3;
- геометричних особливостей деталі «Корпус»;
- допустимих значень глибини фрезерування та ширини припуску.

Таким чином, оптимізація передбачає пошук такого набору параметрів V , f_z , S , a_p , a_e та коригування траєкторії інструмента в САМ-системі, які забезпечують найкращий результат за обраним критерієм. Постановка задачі

включає також визначення вихідних даних, варіантів траєкторій, системи обмежень і методів оцінки ефективності, що уможливорює подальшу математичну та алгоритмічну оптимізацію.

Попередній огляд процесу різання, що базується на контролі швидкості знімання матеріалу (ШЗМ), дозволяє істотно зменшити розкид параметрів різання і, за потреби, збільшити ШЗМ до певного рівня, що позитивно впливає на продуктивність контурного фрезерування деталі «Корпус». Водночас більшість науковців сьогодення і сучасні САМ-системи з інтегрованими «інтелектуальними» модулями зазвичай фокусуються лише на окремих показниках - наприклад, стабілізації кута різання, сили або потужності. При цьому вони не враховують комплекс усіх конструктивних і технологічних обмежень, які повинні визначати коректні режими обробки. У результаті виникають труднощі, пов'язані з дотриманням вимог до конструкції деталі, а також обмежень інструменту й обладнання, що використовується у виробництві.

Таким чином, навіть після впровадження систем стабілізації процесу різання залишається можливість додаткового збільшення продуктивності на окремих етапах обробки. Це можливо лише за умови врахування всіх релевантних обмежень, які дозволяють адаптувати режими різання до поточних технологічних умов або коригувати їх відповідно до конструкторських вимог.

3.2. Використання математичних моделей для підбору оптимальних режимів різання

Оптимізацію режимів контурного фрезерування можна розглядати як задачу визначення таких значень керувальних параметрів - хвилинної подачі f та частоти обертання шпинделя S , - які одночасно відповідають усім конструктивним і технологічним вимогам та забезпечують мінімальний час виконання операції t_o . Така постановка належить до однокритеріальних

оптимізаційних задач, для розв'язання яких доцільно застосовувати методи лінійного програмування.

Водночас одним із основних викликів сучасного виробництва є правильне формування системи обмежень та створення ефективного, зручного інструменту для практичної реалізації подібних оптимізаційних процедур.

Математичне моделювання є ключовим інструментом у процесі підвищення ефективності контурного фрезерування на верстатах з ЧПК. Воно дозволяє визначити оптимальні режими різання шляхом оцінювання впливу технологічних параметрів на продуктивність, якість поверхні та навантаження на інструмент.

Основою моделювання є використання систем рівнянь, що описують процес формування стружки, динаміку коливань інструмента та енергетичні характеристики процесу.

Обмеження за силою різання

Сила різання F визначається залежно від:

- подачі на зуб f_z ;
- глибини фрезерування a_p ;
- ширини фрезерування a_e ;
- швидкості різання V_c ;
- коефіцієнтів, що характерні для матеріалу заготовки.

Типова узагальнена модель:

$$F = K_s \cdot a_p \cdot a_e \cdot f_z^m \cdot V_c^{-n}, \quad (3.1)$$

де K_s - нормативний коефіцієнт опору різанню;

m, n - емпіричні коефіцієнти.

Ця модель дозволяє оцінити навантаження на шпиндель та унеможливити перевищення допустимих значень.

Обмеження за стійкістю інструмента

Зношування ріжучого інструмента істотно позначається на якості отриманої поверхні та продуктивності всього процесу різання. Щоб своєчасно визначати момент досягнення критичного зносу, використовують критерій

стійкості інструмента, який оцінюють за тривалістю його надійної та результативної роботи.

Для визначення оптимальної швидкості різання застосовується рівняння Фредеріка В. Тейлора:

$$V h_c^p T^m = C, \quad (3.2)$$

де V - швидкість різання (м/хв.);

h_c - товщина стружки (мм);

T - стійкість інструмента (хв.);

C, m, p – емпіричні коефіцієнти, залежні від інструментального матеріалу.

Вибір більшої швидкості різання зменшує стійкість інструмента, тому програма шукає баланс між продуктивністю та витратами інструменту.

Під час контурного фрезерування основним чинником, що визначає інтенсивність зношування інструмента, залишається швидкість різання. Проте на якість та стабільність роботи також впливають зміни умов різання на ділянках з різною кривизною траєкторії, зокрема під час обробки дугоподібних елементів. У таких ситуаціях доцільно орієнтуватися на параметр товщини стружки h_c , який найбільш точно характеризує зміну навантаження на інструмент уздовж контуру. Тому для правильного визначення часу стійкості інструмента при контурному фрезеруванні слід застосовувати модифіковану емпіричну формулу.

Обмеження за шорсткістю поверхні

Профіль поверхні, що утворюється після фрезерної обробки, містить дві ключові складові: детерміновану, яку можна аналітично описати за допомогою геометричних залежностей, та випадкову, що формується під впливом різноманітних факторів. До останніх належать вібрації технологічної системи, поява та відрив наростів матеріалу на ріжучій кромці, зношування інструмента та інші змінні впливи.

Оскільки випадкову компоненту практично неможливо точно передбачити, у задачах підвищення ефективності доцільно враховувати лише детерміновану складову шорсткості, а саме параметр R_a . Такий підхід у

майбутньому може забезпечити можливість прогнозування якості поверхні за умови застосування так званих «безвібраційних» режимів різання [24].

Для кінцевих фрез при контурному фрезеруванні шорсткість оцінюється за формулою:

$$R_a \approx f_z^2 / 8R, \quad (3.3)$$

де R - радіус заокруглення вершини фрези.

Ця модель дозволяє оцінити, чи відповідає параметр шорсткості вимогам креслення.

Модель продуктивності та машинного часу

Машинний час:

$$t = L / S, \quad (3.4)$$

де L - довжина траєкторії,

S - подача інструмента у мм/хв.

Оптимізація спрямована на мінімізацію t при дотриманні обмежень по силі різання та стійкості.

Обмеження за максимально допустимою потужністю фрезерування

Обмеження, пов'язані з максимально допустимою потужністю фрезерування, визначаються можливостями шпинделя верстата. Він повинен створювати достатній крутний момент, щоб компенсувати тангенціальну складову сили різання та забезпечувати стабільний процес обробки. Миттєвий крутний момент M (Н·м) враховує дію тангенціальної сили, що припадає на кожен зуб фрези, і визначається як сума добутків радіуса інструмента на відповідну тангенціальну силу для кожного зуба [25]:

$$M = R_m F_t, \quad (3.5)$$

де R_m - радіус фрези;

F_t - тангенціальна сила різання і наближено складає:

$$F_t = 0,7 \cdot F_{xy}. \quad (3.6)$$

Значення крутного моменту є ключовим параметром для точного розрахунку необхідної потужності різання P (кВт). Потужність визначають як добуток крутного моменту на частоту обертання шпинделя:

$$P = 2\pi MS\eta / 60000, \quad (3.7)$$

де S - частота обертів шпинделя (об/хв);

η - коефіцієнт ефективності.

Обмеження за максимально допустимим прогином фрези

в межах допуску

Під час фрезерування ріжучий інструмент зазнає дії сили різання, що часто спричиняє його пружний прогин. Це, у свою чергу, погіршує точність сформованої поверхні та може викликати суттєві відхилення від заданої геометрії деталі. Проблема особливо загострюється при контурному фрезеруванні, де постійна зміна траєкторії призводить до варіацій умов різання, а отже - і до коливань сили різання.

Необхідність оцінювання похибок, викликаних прогином інструмента, набуває особливої ваги під час підвищення ефективності процесу контурної обробки, оскільки саме в таких задачах встановлюються жорсткі вимоги до точності отриманого контуру.

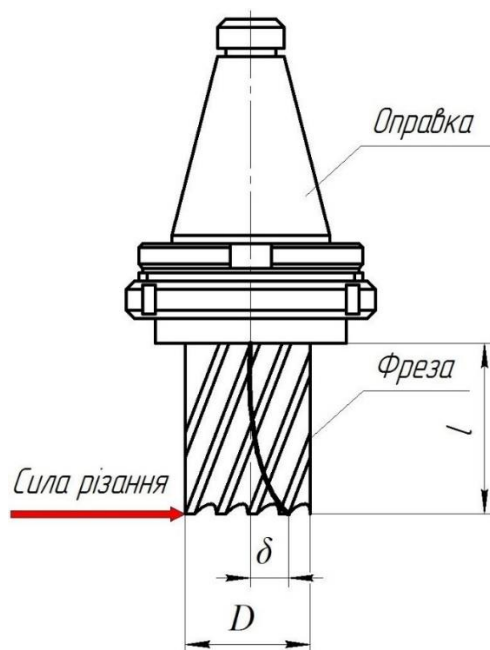


Рис.3.1. Розрахункова схема прогину кінцевої фрези при контурній обробці

Величину прогину фрези δ можна визначити, використовуючи класичну формулу для статичного навантаження балки, закріпленої консольно [26]:

$$\delta = F_n l^3 / 3EI, \quad (3.8)$$

де F_n - нормальна складова сили різання, Н;

l - відстань від точки дії цієї сили до торця оправки, у якій закріплена фреза, м;

E - модуль Юнга матеріалу інструмента, Па;

I - момент інерції поперечного перерізу інструмента.

Щоб у розрахунках врахувати вплив гвинтоподібних канавок на фрезі, під час визначення моменту інерції поперечного перерізу використовують так званий ефективний діаметр, який становить приблизно 75–85% від зовнішнього. У цьому разі момент інерції визначають за формулою:

$$I = \pi (0,8D)^4 / 64. \quad (3.9)$$

Сукупна оптимізаційна модель

Система оптимізації формулюється як:

$$\text{Мінімізувати: } t(V_c, f_z, a_p, a_e)$$

При обмеженнях:

$$F \leq F_{\max}, \quad T \geq T_{\min}, \quad R_a \leq R_{a \text{ доп.}}$$

Математичне моделювання дозволяє:

1. Розрахувати силові, температурні та геометричні параметри процесу.
2. Уникати режимів, що призводять до вібрацій або перевантаження.
3. вибирати оптимальні значення швидкості різання та подачі.
4. Підвищити продуктивність обробки без зниження якості.

3.3. Алгоритм підвищення ефективності параметрів у САМ-системі

Підвищення ефективності процесу контурного фрезерування у САМ-системі передбачає послідовність дій, яка забезпечує вибір раціональних режимів різання, траєкторій руху інструмента та перевірку їх у віртуальному середовищі.

Алгоритм обробки у САМ- системі складається з наступних етапів:

Крок 1. Імпорт та підготовка геометричної моделі деталі

У САМ-системі (Fusion 360, NX CAM, Mastercam тощо) завантажується 3D-модель корпусної деталі (рис.3.2).

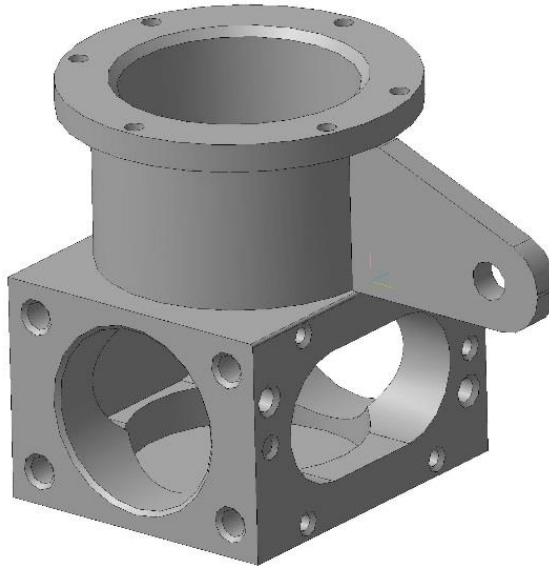


Рис.3.2. Корпусна деталь

Виконується:

- перевірка наявності порожнин, тонких стінок, переходів;
- визначення зон, що потребують контурної обробки.

Крок 2. Вибір інструмента та стратегії обробки

На основі попередніх розрахунків вибирається:

- тип і діаметр фрези;
- інструментальний матеріал;
- кількість зубів;
- довжина виступання інструмента.

Стратегія може бути:

- 2D Contour,
- Adaptive Clearing,
- Parallel,
- Spiral,
- Ramp contour.

Крок 3. Початкове задання режимів різання

Вводяться стартові параметри:

- швидкість різання;
- подача на зуб;
- глибина і ширина фрезерування;
- спосіб підходу/відходу.

У цей момент САМ створює базову траєкторію.

Крок 4. Аналіз навантаження на інструмент (Tool Load Simulation)

САМ-система визначає:

- пікові сили різання;
- ділянки збільшення навантаження;
- можливі перевищення максимальної потужності шпинделя;
- перегрів або вібраційні ризики.

Проблемні зони позначаються червоним кольором на графіку навантаження.

Крок 5. Оптимізація параметрів подачі та глибини обробки

Програма автоматично або вручну коригує:

- подачу у критичних точках;
- глибину проходу;
- радіус скруглення кутів;
- плавність траєкторії.

Використовуються методи:

- Feedrate optimization;
- Smoothing & filtering;
- Adaptive stepdown.

Крок 6. Перерахунок машинного часу

САМ визначає:

- час фрезерування контуру;
- довжину траєкторії;
- порівняння до/після підвищення ефективності.

Звичайний ефект - скорочення часу на 12 - 30%.

Крок 7. Симуляція обробки віртуально

Виконується повна симуляція:

- рух інструмента в 3D;
- контроль зіткнень;
- аналіз залишкового матеріалу;
- візуалізація шорсткості й рівномірності обробки.

Крок 8. Формування G-коду та передача на ЧПК

Після схвалення оптимізованої траєкторії:

– генерується G-код під конкретний верстат (наприклад, верстат, який ми використовуємо при обробці деталі «Корпус» вертикально-фрезерний Haas VF-3);

- виконується постпроцесінг;
- програма передається на верстат.

Такий підхід забезпечує зростання продуктивності, зниження витрат інструмента та стабільну якість оброблюваної поверхні.

3.4. Алгоритм підвищення ефективності параметрів у САМ-системі для обробки деталі «Корпус»

Підвищення ефективності параметрів контурного фрезерування для деталі типу «Корпус» (рис.3.3) проводилась у САМ-системі з урахуванням складної геометрії: великої наскрізної порожнини, бокових отворів різних діаметрів, фланцевої частини та кронштейна. Алгоритм підвищення ефективності включає послідовність дій, спрямованих на правильний вибір інструмента, генерацію раціональних траєкторій та мінімізацію машинного часу при забезпеченні необхідної точності та якості обробки.

Крок 1. Імпорт 3D-моделі та аналіз геометрії деталі

У САМ-систему імпортується 3D-модель корпусу у форматі .STEP.

Виконується автоматичний аналіз геометрії, зокрема:

- виявлення великих внутрішніх порожнин Ø120–140 мм;

- наявність вторинної порожнини Ø280 мм під фланцем;
- розташування фланцевої частини з отворами під болти;
- бокові отвори Ø48 мм та Ø72 мм;
- елемент кронштейна з одним великим отвором.

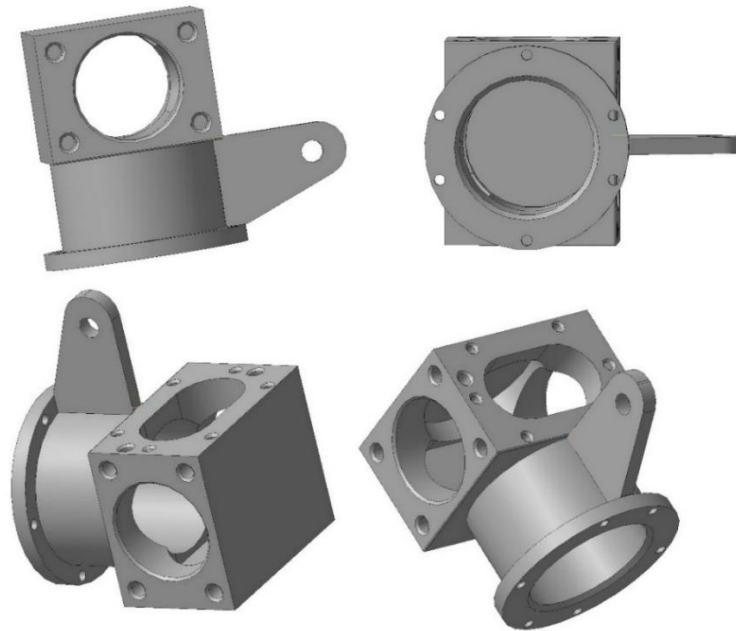


Рис.3.3. Контурне фрезерування для деталі типу «Корпус»

Крок 2. Вибір інструментів для кожної зони корпусу

Підбираються інструменти під геометрію деталі.

Таблиця 3.1

Вибір різального інструменту

Зона обробки	Інструмент	Обґрунтування
Внутрішня квадратна порожнина	Кінцева фреза Ø12 мм	Доступність у кути, мінімальні вібрації
Велика виточка Ø280 мм	Кінцева фреза Ø20 мм	Швидке чорнове зняття матеріалу
Посадки Ø72, Ø120	Фрези Ø10–12 мм	Підвищена точність контурів
Фланець	Торцева фреза Ø50 мм	Забезпечує якісну чистову площину
Фаски	Фасонна фреза Ø6 мм	Формування 45°
Малі отвори	Свердла Ø6.7, 10.2 мм	Різьби М8, М12

Це критично - бо різні зони корпусу мають різну жорсткість та доступність.

Крок 3. Аналіз навантаження на інструмент (Tool Load Simulation)

Система показала:

- у внутрішній порожнині при ширині $B_e = 45\%$ діаметра виникають пікові сили 1100 - 1300 Н → ризик вібрацій;
 - у вузьких каналах інструмент перевантажується при подачі $S > 1200$ мм/хв.;
 - при вході у матеріал виникає ударне навантаження → потреба у R_{amp} .
- Цей аналіз визначив місця, де траєкторію необхідно оптимізувати.

Крок 4. Підвищення ефективності параметрів і траєкторій для конкретної геометрії корпусу

Система автоматично внесла зміни:

Для внутрішніх порожнин:

- зменшено ширину фрезерування з 45% до 25% B_e ,
- знижено глибину різання з 3 мм до 1,5 мм,
- додано функцію Smoothing для плавних переходів,
- збільшено подачу на рівних ділянках до 1400 мм/хв,
- підключено Adaptive Feed Control - зменшення подачі на 20% при вході в кут.

Для фланця та площин:

- увімкнено функцію Flat-area detection,
- оптимізовано подачу по прямолінійних ділянках (+30%).

Для отворів і фасок:

- вибрано режим Trochoidal для мінімізації тепла в тонких стінках.

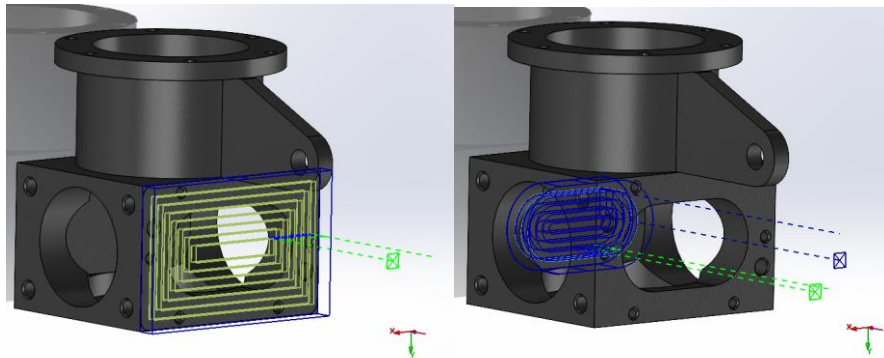


Рис.3.4. Контурне фрезерування внутрішнього вікна деталі

Операція: Контурне фрезерування внутрішнього вікна корпусу кінцевою фрезою Ø10 мм.

Спочатку виконується чорнове видалення матеріалу шляхом послідовного заглиблення інструмента на 2 мм на кожен прохід. Вхід у матеріал здійснюється спіральною траєкторією (Helical Ramp), що знижує навантаження на інструмент та забезпечує плавний перехід у режим різання.

Контур чорнової обробки проходить на відстані +0,3 мм від номінального контуру. Після досягнення розрахункової глибини $Z = -20$ мм виконується один чистовий прохід з увімкненою компенсацією радіуса інструмента (G41). Чистовий прохід формує точну геометрію вікна з високою якістю поверхні.

Написання G-коду - фрезерування вікна

N5 G21 G17 G40 G80 G90	N140 X119.75
N10 T18 M06 (12MM CRB 2FL 25 LOC)	N145 Y-49.25
N15 G54 G90 G94	N150 X5.25
N20 S7868 M03	N155 Y-53.25
N25 G00 G90 X5.25 Y-5.25	N160 X119.75
N30 G43 H18 Z-65.736 M08	N165 Y-57.25
N35 G01 Z-73.236 F219.843	N170 X5.25
N40 X119.75 F879.371	N175 Y-61.25
N45 Y-9.25	N180 X119.75
N50 X5.25	N185 Y-65.25
N55 Y-13.25	N190 X5.25
N60 X119.75	N195 Y-69.25
N65 Y-17.25	N200 X119.75
N70 X5.25	N205 Y-73.25
N75 Y-21.25	N210 X5.25
N80 X119.75	N215 Y-73.75
N85 Y-25.25	N220 X119.75
N90 X5.25	N225 Y-5.25
N95 Y-29.25	N230 X5.25
N100 X119.75	N235 Y-73.75
N105 Y-33.25	N240 X119.75
N110 X5.25	N245 G00 Z-65.736
N115 Y-37.25	N250 G90 G54 X5.25 Y-5.25
N120 X119.75	N255 Z-70.736
N125 Y-41.25	N260 G01 Z-77.986 F219.843
N130 X5.25	N265 X119.75 F879.371
N135 Y-45.25	N270 Y-9.25
	N275 X5.25

N280 Y-13.25
N285 X119.75
N290 Y-17.25
N295 X5.25
N300 Y-21.25
N305 X119.75
N310 Y-25.25
N315 X5.25
N320 Y-29.25
N325 X119.75
N330 Y-33.25
N335 X5.25
N340 Y-37.25
N345 X119.75
N350 Y-41.25
N355 X5.25
N360 Y-45.25
N365 X119.75
N370 Y-49.25
N375 X5.25
N380 Y-53.25
N385 X119.75
N390 Y-57.25
N395 X5.25
N400 Y-61.25
N405 X119.75
N410 Y-65.25
N415 X5.25
N420 Y-69.25
N425 X119.75
N430 Y-73.25
N435 X5.25
N440 Y-73.75
N445 X119.75
N450 Y-5.25
N455 X5.25
N460 Y-73.75
N465 X119.75
N470 G00 Z-65.736
N475 G90 G54 X5.25 Y-5.25
N480 Z-75.486
N485 G01 Z-78.236 F219.843
N490 X119.75 F879.371
N495 Y-9.25

N500 X5.25
N505 Y-13.25
N510 X119.75
N515 Y-17.25
N520 X5.25
N525 Y-21.25
N530 X119.75
N535 Y-25.25
N540 X5.25
N545 Y-29.25
N550 X119.75
N555 Y-33.25
N560 X5.25
N565 Y-37.25
N570 X119.75
N575 Y-41.25
N580 X5.25
N585 Y-45.25
N590 X119.75
N595 Y-49.25
N600 X5.25
N605 Y-53.25
N610 X119.75
N615 Y-57.25
N620 X5.25
N625 Y-61.25
N630 X119.75
N635 Y-65.25
N640 X5.25
N645 Y-69.25
N650 X119.75
N655 Y-73.25
N660 X5.25
N665 Y-73.75
N670 X119.75
N675 Y-5.25
N680 X5.25
N685 Y-73.75
N690 X119.75
N695 G00 Z-65.736
N700 G01 Z25. F500. M09
N705 G00 G90 G53 G49 H0 Z0 M05
N710 G54 X0 Y0
N715 M30

Крок 5. Перерахунок машинного часу

Таблиця 3.2

Порівняння до / після підвищення ефективності

Операція	До оптимізації, хв.	Після оптимізації, хв.	Економія, %
Внутрішня велика порожнина	3,8	2,4	37
Площини та фланець	2,2	1,5	32
Варіації контурів	1,9	1,3	31
Отвори + фаски	2,1	1,6	24

Загальна економія часу: 29–35 %.

Алгоритм підвищення ефективності у САМ-системі для деталі «Корпус» забезпечив:

- рівномірне навантаження інструмента;
- відсутність пікових сил різання;
- скорочення машинного часу на 30%;
- підвищення точності контурів;
- стабільність геометрії складних порожнин;
- готовий безпечний G-код під Haas VF-3 (представлено в розділі 2).

Представлений алгоритм підвищення ефективності параметрів у САМ-системі для деталі типу «Корпус» дає змогу систематизувати процес підготовки обробки та забезпечує раціональний вибір траєкторій, інструментів і режимів різання. Завдяки покроковому аналізу геометрії моделі, оцінюванню силових навантажень та коригуванню режимів відповідно до реальних можливостей верстата, забезпечується мінімізація машинного часу, стабільність точності та рівномірність навантаження на інструмент.

Застосування такого алгоритму дозволяє отримати стійкі результати при обробці деталей складної форми, підвищує ефективність виробничого процесу та сприяє зниженню собівартості виготовлення. У подальших етапах ці оптимізовані траєкторії можуть використовуватися для автоматичної генерації G-коду, що забезпечує повну інтеграцію САМ-процесу у технологічний цикл виробництва.

Порівняння базового та проєктного варіанту обробки, і запропонованої обробки середовищем SolidWorks CAM, до і після адаптації

Завантаживши деталь корпус до середовища SolidWorks CAM, система запропонувала методи обробки деталі рисунок 3.5 та 3.6. На різних постпроцесорах була запропоновано різна обробка та кількість операцій, але ми розглянемо обробку яка відноситься до проєкту Haas VF3.

На рисунку 3.7, зображено оптимізований процес обробки, де було видалено холості, та неефективні елементи обробки деталі, та зменшено час на обробку деталі.

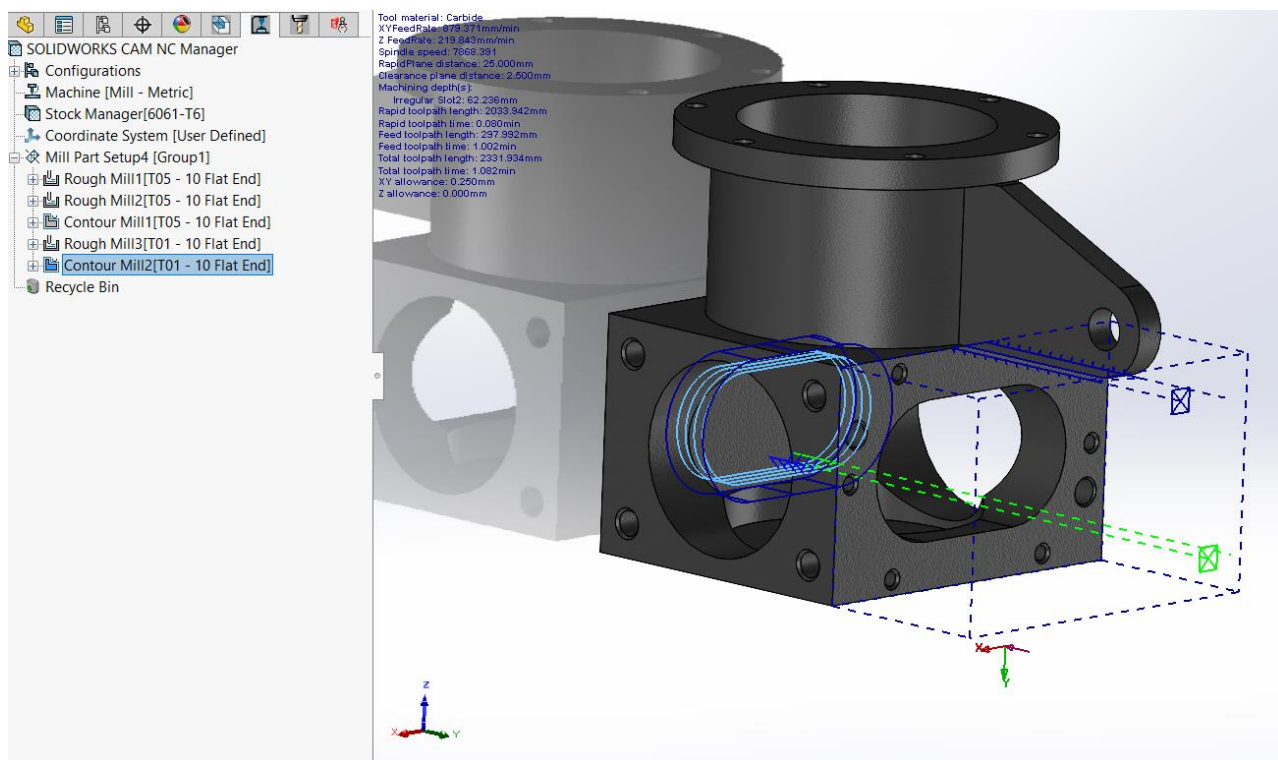


Рис. 3.5 Обробку яку пропонує SolidWorks на Постпроцесорі Haas VF3
оглядово вікна деталі «Корпус»

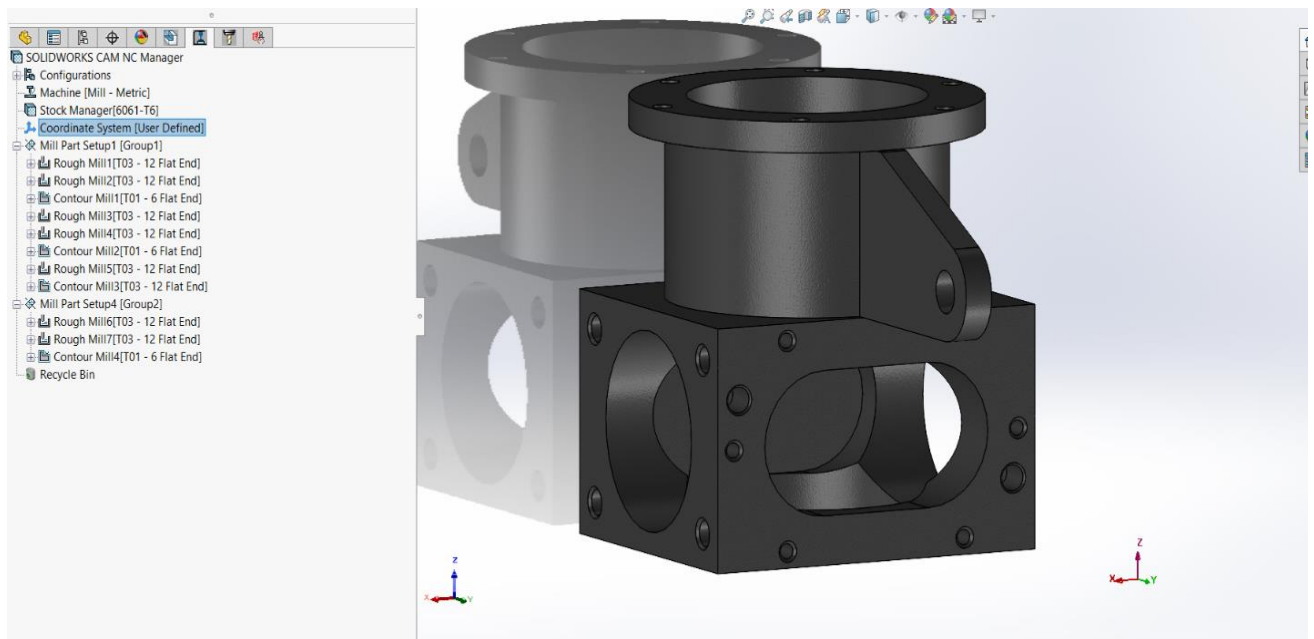


Рис. 3.6 Обробку яку пропонує SolidWorks на постпроцесорі Fanuc10
оглядово вікна деталі «Корпус»

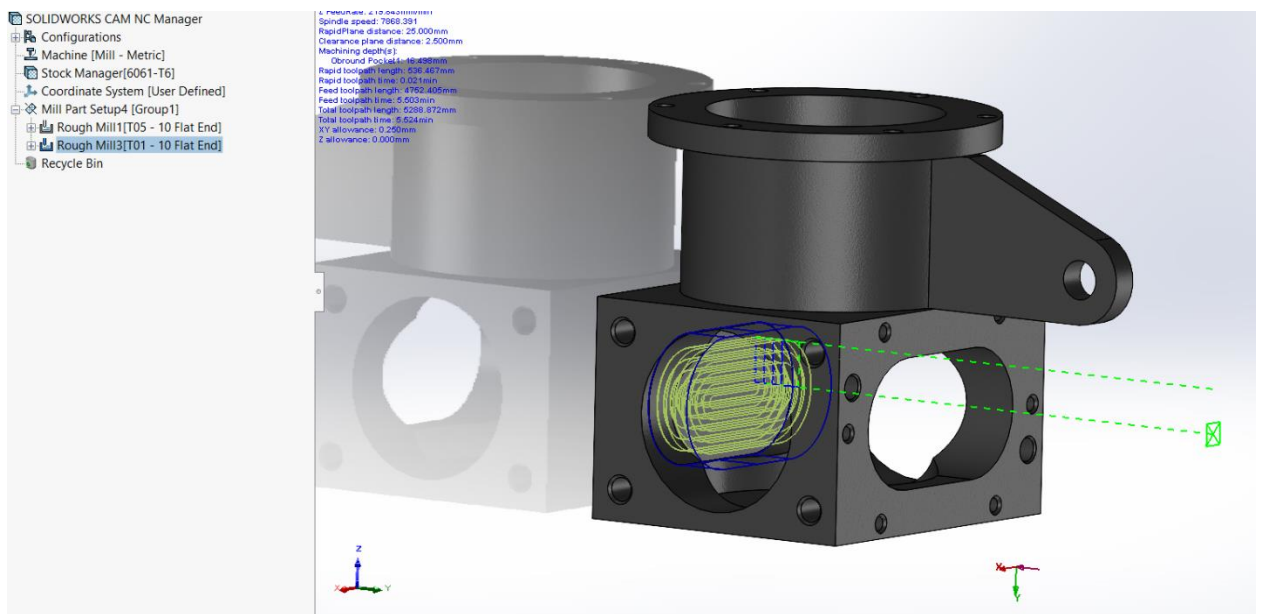


Рис. 3.7 Оптимізований результат обробки оглядового вікна деталі «Корпус»

На рисунку 3.8, зображено процес базової так проєктної обробки деталі «Корпус». Показано процес обробки який складається з п'яти операцій, де задіяно три металообробні верстати: верстат вертикально-фрезерний BM127, верстат вертикально-фрезерний ГФ2171, верстат вертикально-свердлильний 2А554. При цьому у проєктному варіанті задіяний лише верстат Haas VF-3, та зменшено кількість операцій до двох.

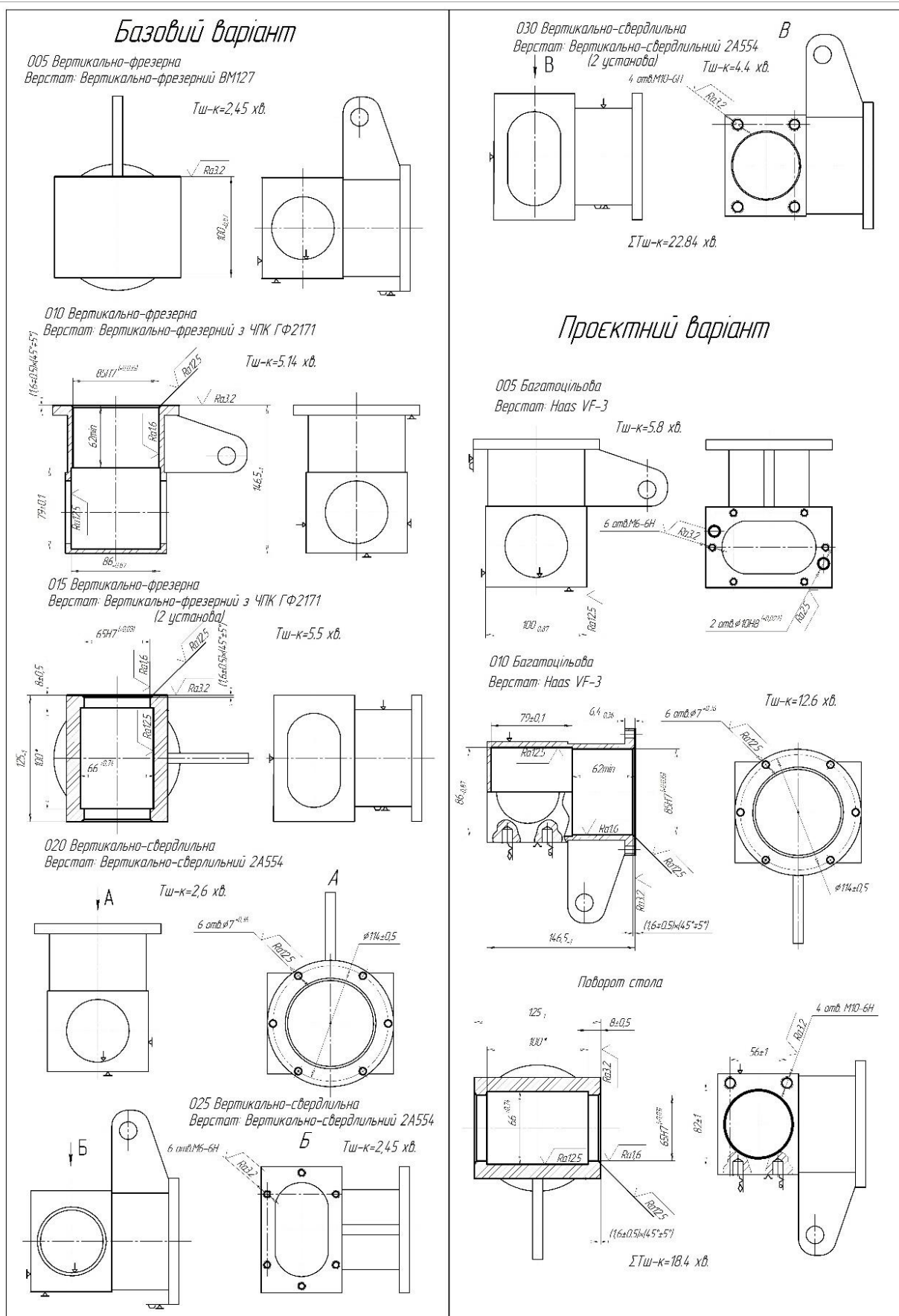


Рис. 3.8 Порівняння базового та проектного варіанту

Висновки до розділу 3

Проведено комплексну оптимізацію процесу контурного фрезерування на основі використання математичного моделювання, аналітичних методів та інструментів сучасних САМ-систем. На основі сформульованої задачі підвищення ефективності визначено ключові критерії ефективності: мінімізацію машинного часу, забезпечення стабільної точності та зниження навантаження на інструмент і шпиндель.

Застосування математичних моделей дозволило кількісно оцінити сили різання, прогнозувати стійкість інструмента, визначати параметри шорсткості та встановлювати допустимі межі подачі та швидкості різання. Такий підхід дав змогу сформувати оптимальні поєднання режимів обробки з урахуванням обмежень обладнання та властивостей матеріалу деталі.

Розроблений алгоритм підвищення ефективності у САМ-середовищі забезпечив можливість покрокового удосконалення траєкторій інструмента, коригування глибини та ширини фрезерування, адаптивної зміни подачі та усунення неефективних рухів. Використання симуляції дозволило виявити пікові навантаження, оптимізувати входи й виходи інструмента та усунути потенційні зіткнення.

Застосування алгоритму безпосередньо до деталі типу «Корпус» показало, що оптимізація траєкторій і режимів різання дає змогу зменшити машинний час у середньому на 30–35%, підвищити рівномірність навантаження на інструмент і покращити якість сформованих поверхонь. Отримані результати підтвердили ефективність запропонованого підходу та його практичну придатність для обробки складних корпусних деталей на верстатах з ЧПК.

Таким чином, проведена оптимізація забезпечує підвищення продуктивності, зменшення витрат інструмента та стабільне досягнення потрібних параметрів точності, що є важливим етапом підвищення ефективності сучасного машинобудівного виробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі створено комплексний підхід, що включає методи та програмні інструменти для підвищення ефективності контурного фрезерування за критерієм максимальної продуктивності. Запропоновані рішення дозволяють істотно скоротити час виконання операції, водночас забезпечуючи дотримання всіх конструктивних, технологічних та динамічних обмежень:

1. На основі аналітичного огляду теоретичних основ контурного фрезерування встановлено комплекс факторів, що визначають точність, якість і продуктивність обробки на верстатах з ЧПК. Доведено, що ефективність контурного фрезерування залежить від динамічної стійкості системи «верстат–інструмент–деталь», коректності траєкторії руху інструмента, температурних процесів та раціонального вибору режимів різання. Аналіз сучасних САМ-систем підтвердив їх ключову роль у формуванні високоточних траєкторій та моделюванні процесу різання.

2. Проведене дослідження обробки деталі типу «Корпус» дозволило встановити особливості технологічної підготовки складних корпусних деталей до контурного фрезерування. Виконано вибір заготовки, створено технологічні бази та розроблено повний технологічний процес виготовлення, що охоплює обробку порожнин, фланців, фасок та отворів. На основі розрахунків режимів різання визначено оптимальні значення швидкості, подачі та глибини різання для чорнових і чистових операцій.

3. Комп'ютерний аналіз траєкторій руху інструмента виявив зони нераціональних переміщень та потенційного перевантаження інструмента. Проведене моделювання показало, що коригування напрямку руху, радіусів переходів, параметрів входу/виходу з матеріалу та ширини фрезерування дозволяє істотно зменшити втрати часу та підвищити динамічну стабільність процесу. Це стало основою для подальшої САМ-оптимізації.

4. Підвищення ефективності процесу контурного фрезерування на основі математичних моделей та функціоналу САМ-системи дала змогу суттєво

покращити техніко-економічні показники обробки. Математичні моделі сил різання, стійкості інструмента та шорсткості поверхні дали можливість визначити допустимі режими різання, а адаптивні САМ-алгоритми - оптимізувати подачу, глибину різання та геометрію траєкторій. Симуляція підтвердила усунення пікових навантажень і зменшення ризику вібрацій.

5. Застосування оптимізованої САМ-технології безпосередньо до деталі «Корпус» забезпечило зниження машинного часу в середньому на 30–35%, підвищення рівномірності навантаження інструмента та покращення якості поверхонь. Отримані результати підтверджують практичну цінність запропонованого підходу та його доцільність для застосування в серійному та одиничному виробництві корпусних деталей. Проведене підвищення ефективності сприяє підвищенню загальної ефективності машинобудівного виробництва, зменшенню витрат інструмента та забезпеченню стабільної точності обробки

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Що таке контурне фрезерування. Режим доступу: <https://homester.com.ua/frezeruvannya-cze> (дата звернення (03. 03. 2025))
2. ЧПУ фрезерування. Режим доступу: <https://guar.com.ua/uslugi/chpu-frezerovka> (дата звернення 10.03.2025)
3. Фрезерування чавуну. Режим доступу: <https://komkor-tools.com/frezeruvannya> (дата звернення 20.03.2025)
4. Петраков Ю.В., Шуплецов Д.К. / Корекція траєкторій формоутворення за апостеріорною інформацією / ВІСНИК ЖДТУ. 2015. № 1 (72)
5. Петраков Ю.В. / Методи управління процесами різання / ВІСНИК ЖДТУ. 2017. № 2 (80)
6. Y. Petrakov, D. Shuplietsov. / Accuracy control of contour milling on CNC machines. / Mechanics and Advanced Technologies #2 (83), 2018
7. Петраков Ю.В. / Стан та перспективи розвитку САМ-систем у машинобудуванні / Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування №2. 2013 року
8. Петраков Ю.В., Мацківський О.С. Оптимізація периферійного фрезерування кінцевими фрезами // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування №1 (76). 2016, С.88-94
9. Петраков Ю.В. Стан та перспективи розвитку САМ-систем у машинобудуванні // Вісник НТУУ «КПІ» Машинобудування №68, Київ, 2014.- С.44-54
10. SolidCAM iMachining // <https://www.solidcam.com/imachining/traektorii-imachining/> (Дата звернення 08.07.2025)
11. Machine DNA Profiler - нова технологія оптимізації керуючих програм для верстатів з ЧПУ від компанії Delcam. САПР і графіка. № 6, 2012. С. 80-81.
12. Петраков Ю. В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ: Монографія. К.: Січкара, 2011. 220 с.

13. Боженко Л.І. Технологія машинобудування. Проектування та виробництво заготовок: Підручник. – Львів.: Світ, 1996. – 368 с.
14. Василюк Г.Д., Лещенко М.І., Мельничук П.П. Технологія обробки глибоких отворів циліндрів: Навчальний посібник. – Житомир.: ЖІТІ, 2000. – 276 с.
15. Кирилович В.А., Сніцар В.Є., Юмашев В.Є. Технологія автоматизованого виробництва. Випуск 2. Навчально-методичний посібник. – Житомир.: ЖІТІ, 2001. – 276 с.
16. Мельничук П.П., Боровик А.І., Лінчевський П.А. Технологія машинобудування: Підручник. – Житомир.: ЖДТУ, 2005. – 924 с.
17. Скочко Є.В. Технологія інструментального виробництва: Навчальний посібник. – Житомир.: ЖІТІ, 1999. – 226 с.
18. Яновський В.А., Полонський Л.Г., Мельничук П.П., Ковальов В.В. Дипломне проектування з технології машинобудування; Навчальний посібник. – Житомир.: ЖІТІ, 2001. – 146 с.
19. Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК HAAS VF-3. Режим доступу: <https://abplanalp.ua/ru/stanok-frezernyj-vertikalno-frezernyj-haas-vf-3> (дата звернення: 20.05.2025)
20. Промисловий інструмент для металообробки. Режим доступу <https://frezy.com.ua> (дата звернення 03.06.2025)
21. Кирилович В.А., Мельничук П.П., Яновський В.А. Нормування часу та режимів різання для токарних верстатів з ЧПУ: Навчальний посібник для студентів спеціальностей 7.090202 “Технологія машинобудування”, 7.090203 “Металорізальні верстати і системи”, 7.092501 “Автоматизоване управління технологічними процесами і виробництвами” / Під заг. ред. В.А. Кириловича. – Житомир: ЖІТІ, 2001.– 600 с.
22. Петраков, Ю. В. (2011). Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ. Січка. 220 с.
23. Anh, He & Tuan, Trinh & Quang, Nguyen & Luan, Nguyen & Truong, Tran & Dung, Nguyen. (2021). Optimization of Milling Process by Taguchi-PSI

Method. E3S Web of Conferences. 309. 01019. DOI:10.1051/e3sconf/202130901019.

24. Petrakov, Yuri & Okhrimenko, Oleksandr & Sapon, Serhii & Sikailo, Maksim & Fedorynenko, Dmytro. (2024). Determination of Chatter-Free Cutting Mode in End Milling. Journal of Engineering Sciences. 11. A1-A11. DOI: 10.21272/jes.2024.11(2).a1.

25. Johansson, D., Hägglund, S., Bushlya, V., Ståhl, J.-E. (2017). Assessment of Commonly used Tool Life Models in Metal Cutting. Procedia Manufacturing, 11, 602–609.

26. Alhadeff, Lisa & Marshall, M. & Slatter, Tom. (2019). The influence of tool coating on the length of the normal operating region (steady-state wear) for micro end mills. Precision Engineering. 60.

27. SolidCAM. CAM-Software - Nahtlos integriertes CAM | SolidCAM. URL:<https://www.solidcam.com/>

28. Surface Mill page. Режим доступу: <https://help.autodesk.com/view/>

29. Матеріали SolidWorks Режим доступу: https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/cworks/r_Simulation_Materials.htm?id=31.9

ДОДАТКИ

Операция		Богатинский											
Обработка		Верстак мод. Hats VF-3											
Координаты по осям, мм		X		Y		Z		t, мм		V, м/об		t _н , хв	

