

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»  
Механіко-машинобудівний факультет  
Кафедра технологій машинобудування та матеріалознавства

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**кваліфікаційної роботи ступеню магістра**

студента Шкета Миколи Олександровича

академічної групи 131М-21Н-1 ММФ

спеціальності 131 Прикладна механіка

за **освітньо-науковою програмою** «Наскрізний інжиніринг  
машинобудівного виробництва»

**на тему:** «Аналіз конструкторсько-технологічних можливостей  
механічної обробки Корпусу в САМ-системах FeatureCAM та ESPRIT»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від  
\_\_\_\_\_ за № \_\_\_\_\_

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
Кваліфікаційної роботи	Дербаба В.А.			
розділів:				
Аналітичний	Дербаба В.А.			
Технологічний	Дербаба В.А.			
Спеціальний	Дербаба В.А.			
Науково- дослідницький	Дербаба В.А.			
Рецензент	Корсун В.І.			
Нормоконтролер	Рубан В.М.			

Встановлено, що матеріали даної кваліфікаційної роботи містять чутливу інформацію щодо реальних об'єктів критичної інфраструктури України, національної безпеки і оборони України, зокрема відомості про їх місце розташування, службове призначення, конструкторську і технологічну документацію, описи конструкторських матеріалів та їх властивості, іншу додаткову літературу та посилання. У зв'язку з чим такі матеріали не підлягають відкритому оприлюдненню та мають зберігатися відповідно до встановленого режиму закладом освіти.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

завідувач кафедри

технологій машинобудування та матеріалознавства

В.А. Дербaba

\_\_\_\_\_ (підпис)

(прізвище, ініціали)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 року

## **ЗАВДАННЯ**

**на кваліфікаційну роботу**

**ступеню магістра**

**студенту Шкету Миколі Олександровичу**

**академічної групи 131М-21Н-1 ММФ**

**спеціальності 131 Прикладна механіка**

**за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва»**

**на тему: «Аналіз конструкторсько-технологічних можливостей механічної обробки Корпусу в САМ-системах FeatureCAM та ESPRIT»**

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від \_\_\_\_\_ за № \_\_\_\_\_

<b>Розділ</b>	<b>Зміст</b>	<b>Термін виконання</b>
Аналітичний	Аналіз і характеристики матеріалу, умови експлуатації та оцінка технологічності деталі «Корпус»	06.02.2023-28.02.2023
Технологічний	Проектування та опрацювання детальної технології механічної обробки. Розробка комплексу документації	01.03.2023-31.03.2023
Спеціальний	Використовувані обладнання базування та контролю розмірів деталі на верстаті з ЧПК	01.04.2023-30.04.2023
Науково-дослідницький	Дослідження і розробка методики оптимізованої технології обробки деталі та режимних параметрів у різних САМ-системах	01.05.2023-31.05.2023

**Завдання видано** \_\_\_\_\_

Дербaba В.А.

**Дата видачі** 16 січня 2023 р.

**Дата подання до екзаменаційної комісії** \_\_\_\_\_

**Прийнято до виконання** \_\_\_\_\_

М.О. Шкет

## РЕФЕРАТ

**Актуальність.** Поєднання механічних робіт на багатокоординатних верстатах з ЧПК набуло поширення в машинобудуванні. Тому визначення оптимальної технології та траєкторій руху керованих агрегатів має актуальне значення при металообробці. Також актуальною є проблема застосування інженерних розрахунків на деталі в спеціалізованих програмах, при складанні технології виготовлення виробу та корегуванні режимних параметрів на стадії підготовки виробництва.

**Мета.** Розв'язання науково-технічної задачі, пов'язаної з технологічним забезпеченням високопродуктивної механічної обробки деталі зі сталі шляхом оптимізації та управління її оброблюваністю інструментом з твердих сплавів на багатоціпових верстатах з ЧПК, за умов використання CAD-CAM систем.

**Методика.** Використання чисельного та графо-аналітичного методів дослідження з метою встановлення системного зв'язку параметрів точіння з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту та його стійкістю, параметрами режимів різання з відповідним зазначенням до керуючої програми для верстата з ЧПК.

**Результати.** Одержані чисельні результати досліджень для науково-обґрунтованого підходу у розв'язанні технічної задачі високопродуктивної токарної обробки деталей в САМ-системах, що містить сукупність скорегованих методик та алгоритмів для прогнозування їхньої оброблюваності із забезпеченням надійності різального інструменту з твердих сплавів. Отримані результати порівнювалися з відомими роботами, пов'язаними з дослідженнями процесів механічного оброблення різних марок сталей, сплавів та чавунів, оцінкою надійності ріжучих інструментів, точності та шорсткості обробленої поверхні, результатами вимірювань силових параметрів різання.

**Наукова новизна.** У математико-статистичному опрацюванні експериментальних даних, дало змогу вперше одержати комплексні залежності в зручному для розрахунку й аналізу вигляді, які дають наочне уявлення про вплив кожного параметра процесу точіння на його енергетичні та часові показники при складанні раціональної технології механічної обробки деталі складної геометричної форми в САМ системі.

Практична значимість. Методика обґрунтування оптимальних геометричних параметрах різальних інструментів та оснащення, установленні характеру впливу умов токарної обробки чавунів на основні показники процесу – час механічної обробки та режимні показники в залежності від твердості матеріалу деталі і інструментального матеріалу. Надані практичні рекомендації щодо оптимального використання CAD-CAM систем, коригування результатів технології та режимних параметрів для отримання оптимальних результатів на стадії підготовки виробництва.

Ключові слова: точіння, верстат, сталь, інструментальний матеріал, технологія, стійкість, ріжучий інструмент, режими різання, CAD, CAM.

Робота пов'язана з науковим напрямом кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства та виконана відповідно договору про співпрацю та договором про нерозголошення конфіденційної інформації та комерційної таємниці з ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ».

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	5
<b>Розділ 1</b> Стан питання і постановка задачі .....	6
1.1 Комп'ютерне моделювання .....	7
1.2 Моделювання та оптимізація в техніці .....	8
1.3 Переваги, недоліки і помилки моделювання .....	9
1.4 Комп'ютерні геометричні моделюванні .....	10
1.5 Геометричне моделювання об'ємних тіл .....	12
1.6 Системи автоматизованого проектування .....	14
1.7 Переваги САПР .....	16
1.8 Огляд машинобудівних САПР .....	18
1.9 Характеристика виробу та умови його експлуатаційної .....	20
<b>Розділ 2</b> Програмний САМ-комплекс Autodesk FeatureCAM.....	21
2.1 Комплексні рішення Autodesk .....	23
2.2 Можливості FeatureCAM.....	24
2.2.1 Моделювання для виробництва .....	25
2.2.2 Високошвидкісна обробка (HSM) .....	29
2.2.3 5-осьова обробка .....	30
2.2.6 Обробка каналів .....	32
<b>Розділ 3</b> Програмний САМ-комплекс ESPRIT .....	35
3.1 Огляд САМ-системи ESPRIT .....	38
3.1.1 Програмування для звичайних і багатовісних верстатів .....	39
3.1.3 База знань KnowledgeBase .....	41
3.1.4 Розробка ПО .....	43
3.2 Можливості ESPRIT SolidMILL .....	46
3.2.1 Ефективність багатозадачності .....	48
3.2.2 Потужне програмування для будь-яких фрезерних верстатів.....	50
3.3 Порівняння САМ-систем FeatureCAM і ESPRIT .....	51
3.4 Вартість ліцензій систем .....	52
3.5 Особливості ESPRIT SolidMILL .....	53
3.6 Особливості Autodesk FeatureCAM.....	54
3.7 Висновки щодо застосування САМ-систем.....	55
<b>Розділ 4</b> Автоматизована технологія обробки деталі «Корпус» .....	56

4.1 Технологічний процес обробки деталі .....	61
4.2 Розрахунок спеціального верстатного пристосування .....	64
4.2.1 Вибір способу установки заготовки в верстатному пристосуванні..	67
4.2.2 Силовий розрахунок пристосування .....	72
4.2.3 Розрахунок пристосування на міцність по слабкій ланці .....	74
4.2.4 Розрахунок пристосування на точність .....	75
4.3 Побудова 3D моделі деталі з використанням PowerSHAPE .....	76
4.4 Проектування автоматизованої механічної обробки деталі в САМ-системах Autodesk FeatureCAM і ESPRIT .....	77
<b>Висновки</b> .....	78
<b>Перелік посилань</b> .....	79
<b>Додатки</b>	

## ВСТУП

У засобах масової інформації стало звичним називати ХХІ сторіччя століттям загальної інформатизації та комп'ютеризації. Дійсно, в даний час важко знайти галузь людської діяльності, в якій не застосовувалися б комп'ютери. Особливу важливість впровадження-ня комп'ютерних технологій має для розвитку промисловості і, перш за все, машинобудування. Визнано, що автоматизовані системи, які використовуються в машинобудуванні, базуються на найскладніших програмно-методичних комплексах і потужних технічних засобах [1, 2, 3].

Автоматизація проектно-конструкторських робіт - ровесниця обчислювальної техніки: перші ЕОМ робилися в першу чергу для цієї мети [4, 5]. Машинобудівні системи автоматизованого проектування і технологічної підготовки виробництва (САПР, САПР-ТП) відрізняються надзвичайним різноманіттям і складністю інформаційних потоків, програм, алгоритмів і використовуваних в них комп'ютерних моделей [6, 7].

Необхідність успішного функціонування промислових підприємств в умовах жорсткої конкурентної середовища світового ринку диктує вкрай високі вимоги до оперативності виконання замовлень і якості продукції. Рішення задач скорочення термінів технічної підготовки виробництва і підвищення якості виробів безпосередньо пов'язується із забезпеченням ефективної інформаційної підтримки всіх основних процес-сов підприємства. Тому сьогодні в промисловості ні у кого не викликаючи сумнівів важливість і практична цінність створення досить роз-тій комп'ютерної інфраструктури, як невід'ємної частини сучасного проектування і виробництва. Більшість фахівців з промислового-ленній інформатики поділяють думку, що питання комп'ютеризації промисловості слід вирішувати комплексно, на базі мережевих технологій і інтегрованих автоматизованих систем, що забезпечують колектив-ний характер роботи і можливість створення єдиного інформаційного простору підприємства (ЄДП). Існує і ясне розуміння того, що максимально ефективною буде комплексна автоматизована система, що забезпечує безперервне інформаційний супровід всього життєвого циклу продукції і, головне, виробничої його складової, пов'язаної з конструкторської (КПП) і технологічної (ТПП) підготовкою виробництва [2, 8, 3, 9].

Рівень конкуренції на зовнішніх ринках досить високий. Що сьогодні необхідно для виграшу в терміни випуску і якості нової продукції? Точний облік виробничих даних про замовлення, постачання сировини, комплекту, інструментів. Потрібна повна і доступна всім службам підприємства інформація про виріб - його складі, геометрії, технології виробництва, конкурентоздатності і т.д. Передова методологія інформаційного підтримки виробництва (ІП), в англо-мовній інтерпретації CALS / PLM, передбачає повний перехід від традиційної паперової технічної документації до електронних документів і моделям, які зберігаються в комп'ютерних файлах і базах даних.

Сучасна концепція автоматизації проектування і виробництва передбачає повсюдне впровадження нових промислових стандартів, заснованих на комплексному використанні комп'ютерного моделювання. Застосування електронних

моделей забезпечує не тільки суттєво прискорення процесів розробки нових зразків продукції, а й відчутно підвищення їх якості за рахунок зниження помилок і збільшення точності розрахунків. Багаторазово прискорюється модифікація виробів та внесення виправлень, неминучих в силу ітераційних процесів конструкторського проектування і технологічної підготовки виробництва.

Не секрет, що українські КБ і заводи як і раніше залишаються «недоавтоматизованими», і їм необхідно наздоганяти західні корпорації. Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання стають, таким чином, важливим фактором збереження українського промислового потенціалу. За даними провідних українських і світових аналітичних агентств, протягом останніх десятиліть йде стійке збільшення вкладень промислових підприємств в ІКТ (інформаційні телекомунікаційний технології) в усьому світі і в тому числі в Україні.

Таким чином, розвиток і підвищення ефективності промислового виробництва безпосередньо пов'язується з впровадженням нових інформаційних технологій, яке стримується, насамперед, відсутністю кваліфікованих фахівців.

Багаторічний досвід співпраці з промисловістю, регулярно проводиться анкетування та дослідження запитів підприємств дозволяють стверджувати, що в даний час одним з основних вимог, що пред'являються до молодих спеціалістів на виробничих підприємствах, в конструкторських і технологічних бюро, є наявність знань і практичних навичок застосування комп'ютерних технологій в інженерної діяльності. Сучасний інженер, затребуваний в конкурентних умовах ринкової економіки, це, перш за все, всебічно освічений-ний фахівець, професійна підготовка якого орієнтується не стільки на досягнення минулого, скільки на запити майбутнього. Він повинен бути готовий практично використовувати вивчені в ВУЗі комп'ютерні інновації і зайняти гідне його утворення та вмінням місце в області високих технологій.

Для організації результативного навчального процесу з освоєння нових комп'ютерних технологій необхідно мати не тільки самі сучасні програми і технічні засоби промислового призначення, а й відповідне їх рівню методичне забезпечення.

Застосування комп'ютерного моделювання для аналізу та синтезу промислових виробів і технологічних процесів дає можливість не тільки обгрунтовано вибрати раціональний варіант технічного рішення, але і значно скоротити терміни реалізації технічних новацій, зменшити ризики і наслідки можливих помилок. Часто зване комп'ютерах терни інжинірингом прикладне комп'ютерне моделювання дозволяє відмовитися від тривалих і небезпечних натурних випробувань, коштовних матеріальних моделей.

У даній роботі розглядаються методи і способи геометричного моделювання, найбільш популярних і поширених автоматизаційних програм конструкторсько-технологічної підготовки в машинобудуванні. Дійсно, графічні зображення є невід'ємною частиною технічної культури. Вершиною традиційної (паперової) графіки стало технічне креслення, в якому стандартизовано застосування графічних моделей і позначень. Машинобудівний креслення визнано вважається мовою техніки сьогодні, і не втратить своєї актуальності в майбутньому. У всіх машинобудівних САПР в обов'язковому порядку присутні

спеціалізовані графічні редактори з різним рівнем досконалості, що реалізують технології плоскій комп'ютерної графіки. А використовувані в них графічні моделі міцно зайняли свої позиції в навчальних курсах «Комп'ютерної графіки» і «машинобудівельних кресленнях».

В останні роки, у зв'язку з впровадженням і розвитком комп'ютерної техніки і технологій автоматизованого проектування, повсюдно спостерігається зміщення інтересу і пріоритетів розробників САПР від плоскої графіки (електронні технічні документи) до об'ємного геометричного моделювання (3D-моделі). В даний час об'ємні геометричні моделі, найбільш повно описують структуру технічних об'єктів, виступають в ролі основи, ядра комплексної інформаційної моделі виробів машинобудування. Без об'ємного геометричного моделювання вже немислима робота конструктора і технолога в складі інтерактивних систем автоматизації конструювання та програмування верстатів з ЧПУ (CAD / CAM-системи).

Тенденція розвитку комп'ютерних технологій промислового призначення полягає в переході від осередкової (клаптикової) автоматизації до створення комплексних автоматизованих систем, що охоплюють весь цикл робіт, вироблених в процесі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (КТПП). Машинобудівні САПР ХХІ століття об'єднують в своєму складі цілий комплекс комп'ютерних систем, які охоплюють практично всі завдання, які вирішуються в процесах КТПП (CAD / CAM / CAE / CAPP / PDM-системи). При роботі в складі комплексних систем автоматизації користувачами створюється безліч взаємопов'язаних комп'ютерних моделей різного виду і призначення. Для досягнення максимальної ефективності функціонування САПР, сучасними стандартами передбачається створення електронних моделей вже на самій ранній стадії розробки і далі їх розвиток і поновлення непереривна, протягом всього життєвого циклу виробів.

Метою цієї роботи є порівняльний аналіз популярних прикладних систем і програмних комплексів автоматизованого проектування, обговорюються можливості їх практичного використання для комплексної автоматизації конструкторсько-технологічної підготовки виробництва виробів машинобудування на прикладі механічної обробки деталі «Корпус».

## Розділ 1

### Стан питання і постановка задачі

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

маційних технологій в автоматизації цієї сфери виробництва також сприяє зниженню собівартості виробництва в поєднанні з підвищенням якості продукції, що випускається, в кінцевому підсумку веде до оптимізації виробництва, яка і є ко-кінцевою метою впровадження інформаційних технологій в машинобудування і логістику.

Автоматизація управління виробництвом має наступні переваж-вин: гнучку структуру, підтримку прийняття рішень в режимі реального часу, одночасно виконуються процеси, інтегроване рішення для всього підприємства, швидке впровадження, відкрити систему і багато іншого.

Застосування процесів автоматизації в виробництві не менше ре-результативності, оскільки забезпечення контролю над ходом виготовлення і складання різних вузлів забезпечує виготовлення продукції більш високого якості, а також значного зниження обсягу ручної праці, за-діяти на підприємстві. Питання зниження обсягів частки ручної праці на сучасних підприємствах варто останнім часом вкрай гостро.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

обробку складних криволінійних поверхонь і проводити її повну перевірку без використання пробної деталі.

Уподобання при виборі системи для практичної роботи, а також подальші стимули до їх розвитку сформуують широке інформування фахівців про різноманітні можливості систем і практичний досвід їх використання.

### 1.1 Комп'ютерне моделювання

Моделювання в класичному природознавстві зазвичай завжди асоціації-іровані з будь-яким натурних експериментом. Комп'ютерні технології ввели в практику так званий «обчислювальний експеримент», від-Ліча від звичайного «прямого» натурального експерименту тим, що в процес пізнання включається «проміжна ланка» - комп'ютерна модель, яка є одночасно і засобом, і об'єктом експериментального ного дослідження, який заміняє об'єкт, що вивчається.

Комп'ютерне моделювання дозволяє вивчати такі об'єкти, прямій експеримент над якими утруднений, економічно не вигідний або взагалі неможливий в силу тих чи інших причин.

Слід спеціально відмітити, що самі комп'ютерні технології по-народжують технічні об'єкти, що існують тільки віртуально. Напри-заходів, програмне забезпечення, Інтернет або віртуальне підприємство. Хоча був відсутній як

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 17.07.2023р.

ристанні знакових систем. На верховному рівні абстрагування відзначають концептуальне моделювання, при якому сукупність вже відомих фактів або подань щодо досліджуваного об'єкта або системи тлумачиться за допомогою деяких спеціальних знаків, символів, операцій над ними або за допомогою природного або спокуса-ного мов.

При знаковому моделюванні моделями служать знакові освітньо-ня будь-якого виду: схеми, графіки, креслення, формули, графи, слова і пропозиції в деякому алфавіті (природної або штучної мови).

Знакові освіти і їх елементи завжди розглядаються разом з певними перетвореннями, операціями над ними, які виконуються людиною або машиною (перетворення математичних, логічних, хі-вів формул, перетворення станів елементів цифрової машини, відповідних знаків машинного мови, і ін.). Сучасна форма реалізації знакового моделювання - це програмування на цифрових електронних обчислювальних машинах (комп'ютерах). Пам'ять комп'ютера дозволяє зафіксувати опис (модель) будь-якого об'єкта або процесу в вигляді його програми, тобто закодованою на машинній мові системи правил, дотримуючись яких машина може «відтворити» модельований об'єкт або хід модельованого процесу [10].

Історично сталося так, що перші програми комп'ютерного моделювання були пов'язані з розробкою ядерного та ракетного озброєння. На дорогих і рідкісних в той час ЕОМ, за допомогою їх прямого програмування, вирішувалося цілий ряд завдань динаміки польоту, гідравліки, теплообміну, механіки

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 17.07.2023р.

зково розробляється проект, який представляє собою інформаційно повну, виражену на встановленому стандарті технічній мові, модель. Впровадження методів і засобів комп'ютерного моделювання в проектування дозволило істотно підвищити цінність проектів, так як комп'ютерні моделі допускають не тільки фіксацію технічних рішень, а й дослідження залежності характеристик від параметрів моделі, що дозволяють оптимізувати проектні рішення. Оптимізація моді-лей - важливе досягнення, яке принесло з собою комп'ютерне моделювання в проектування виробів і процесів в машинобудуванні [16,17].

В проектно-конструкторських задачах, пов'язаних з синтезом нових технічних рішень, тільки поява і розвиток комп'ютерного моделювання дозволило реалізувати на практиці пошукові методи оптимізації. Оптимізація, яку вважали раніше долею чистої науки, в даний час є невіддільною складовою сучасної концепції автоматизованого проектування [6, 7, 18, 19].

Цілі і завдання комп'ютерного моделювання в техніці, як правило, зв'язуються з проектуванням і впровадженням інновацій. При проектування виробів і процесів в машинобудуванні завжди ставиться завдання відшукування найкращих, ефективних, економічних, тобто оптимальних проектів. При цьому комп'ютерне моделювання має в техніці дві чітко помітні завдання [20]:

1 - створення (синтез) моделей об'єктів і систем для подальшої їх практичної реалізації або підготовки виробництва виробів в промисловості;

2 - аналіз властивостей об'єктів і систем на основі дослідження їх моделей, які використовуються для виявлення значень параметрів проектуємих об'єктів систем і підтримки процесів прийняття інженерних рішень.

Виконання практично всіх проектних операцій і процедур в автоматизованих системах проектування і технологічної підготовки виробництва засноване на оперуванні з реалізованими на комп'ютері математичними моделями різного типу. За допомогою одних моделей прогнозуються характеристики і оцінюються можливості запропонованих-них варіантів схем і структур, за допомогою інших проводиться оптимізація параметрів, спеціальні моделі необхідні для автоматизації технічної документації і т.д. На сучасному рівні розвитку САПР для кожного ієрархічного рівня сформульовані основні по-розкладання математичного моделювання, обраний і розвинений відповідний математичний апарат, отримані типові моделі елементів проектуємих об'єктів, формалізовані методи отримання та аналізу математичних моделей систем [21, 6, 7, 14, 3].

### 1.3 Переваги, недоліки і помилки моделювання

Переваги комп'ютерного моделювання очевидні:

- Більшість із складних реальних технічних об'єктів і систем не можуть бути точно описані за допомогою аналітичних формул і відношень, тому комп'ютерне моделювання стає єдиною можливістю методом їх проектування.

- Моделювання дозволяє обчислити точні параметри виробу (масу, площа, обсяг і т.д.), оцінити експлуатаційні показники системи ще до її створення або матеріальної реалізації.

- Шляхом моделювання можна порівнювати запропоновані альтернативні варіанти проектів системи (або альтернативні стратегії процес-сов), щоб визначити, який з них більше відповідає зазначеним вимогам.

- Моделювання дозволяє вивчити тривалий інтервал функціонування системи (скажімо, економічної) в стислі терміни або, навпаки, вивчити більш детально роботу системи в розгорнутий інтервал часу.

- Комп'ютерне моделювання дозволяє скоротити витрати і трудоємкість досліджень і розробок, у порівнянні з використанням матеріальних зразків і реальних технічних систем.

Перелік достоїнств моделювання легко можна продовжити, але бо-леї важливим є зупинитися на можливих недоліках моделювання і небезпеки помилок.

Кожен з варіантів комп'ютерної моделі дозволяє отримати лише наближені оцінки справжніх характеристик модельованого об'єкта. Похибка моделювання може бути настільки велика, що навіть при вірних розрахунках отримані параметри виробу неприйнятні для практичного використання.

Однак за допомогою аналітичної моделі, в разі якщо вона підходить для вирішення даного завдання, часто можна легко отримати більш точні, «справжні» характеристики моделі для різних наборів вхідних параметрів. Тому, якщо доступна або може бути легко розроблена аналітична модель, адекватна системі, краще використовувати саме її, а не звертатися до комп'ютерного моделювання. Найчастіше, аналітичні співвідношення можна вивести для якогось

окремого випадку. Тоді він може бути використаний як тест для доказу адекватності і точності універсальна комп'ютерної моделі.

Велике число даних, одержуваних в результаті дослідження по-засобом моделювання, або переконливе вплив реалістичною анімації часто призводять до того, що результатами такого дослідження довіряють більше, ніж це виправдано. Якщо модель не є адекватним представлени досліджуваної системи, результати моделювання будуть містити мало корисної інформації про дійсну систему.

Приймаючи рішення, чи підходить дослідження за допомогою моделювання до конкретної ситуації, слід враховувати всі зазначені переваж-вин і недоліки комп'ютерного моделювання.

#### 1.4 Комп'ютерні геометричні моделі

Комп'ютерні геометричні моделі існують у внутрішньому, алгоритмічній поданні, пристосованому для обробки на електрон-обчислювальних машинах. Наявність точних параметрів всіх елементів і алгоритмів їх побудови, що становлять геометричну модель, дозволяє проводити будь-які допустимі перетворення без збитку для якості моделі, що неможливо досягти при роботі з образотворчої графікою.

У комп'ютерних системах, призначених для геометричного моделювання, форму виробу з тією або іншою точністю апроксимують деяким кінцевим набором простих геометричних елементів, так званих «примітивів»: точок, ліній, поверхонь, тіл і т.п. Для обмеженого набору примітивів, що мають однозначний математичний опис, розробляються бібліотеки комп'ютерних програм, які і складають геометричне ядро автоматизованої системи. З цих типових примітивів (як з деталей в дитячому конструкторі) за допомогою на-гою різних операцій формується внутрішнє уявлення унікальної геометричній моделі будь-якої складності.

У свою чергу, комп'ютерні геометричні моделі, використовувани в машинобудівних САПР, прийнято поділяти на дві наступні великі групи:

2D-моделі і 3D-моделі (від англійського слова Dimension - вимірювання) - плоскі (двовимірні) і об'ємні (тривимірні) геометричні моделі.

Плоскі комп'ютерні геометричні моделі (2D-моделі) в повній мірі використовуються в підсистемах САПР, призначених для розробки конструкторської документації.

Тільки технічний креслення, побудований в спеціалізованій ін-інженерної комп'ютерній системі на основі плоскої геометричної моделі, можна буде в подальшому успішно редагувати і модифікувати. В цьому випадку точна геометрична модель, що лежить в основі справжнього «електронного» креслення, може бути використана для вимірювань і розрахунків прямо по самому кресленню. Тільки геометрична модель може бути включена в інші технічні моделі (наприклад, використана в методі кінцевих елементів) або застосована в технологічному моделюванні (наприклад, як контур обробки на верстаті з ЧПУ).

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

І верде тіло містить внутрішній об'єм, обмежений зовнішньою поверхнею тіла. Таке уявлення дозволяє визначати обсяг виробу, його масу, моменти інерції, центр ваги і т.п. Ці параметри часто є критеріями оптимальності при оцінці ефективності конструкції виробу і необхідні для інженерних розрахунків і проектування технології.

Геометричні об'єкти, у яких все розміри ненульові, прийнято називати твердотільними, а моделювання таких тіл називаються твердотілим.

В процесі твердотільного моделювання також спочатку будуються поверхні, що розділяють тривимірний простір на частини. Однак на відміну від чисто поверхневого моделювання при цьому необхідно однозначно встановити внутрішню і зовнішню частини поверхні, щоб всі поверхні становили при цьому замкнутий внутрішній простір без щілин і розривів. Крім того, тверді тіла можуть об'єкто-б'єднуючим або відніматися, утворюючи самі мудрі форми.

Необхідність чисельного розрахунку та аналізу замкнутості і цілісності об'ємних моделей виступає основною відмінною рисою твердотільного комп'ютерного моделювання в порівнянні з поверхневим моделюванням, викликає основні алгоритмічні складності при про-програмних реалізації і вимагає значних ресурсів пам'яті і швидко-дії обчислювальних машин. На ранніх етапах розвитку комп'ютерного геометричного моделювання ця обставина істотно тор-Мозіло впровадження 3D-моделей в САПР. У минулому столітті сама

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

важного проектування вже проіснують тривалими і складними шляхи вдосконалення і метаморфоз. Всього за кілька десятиліть вони стрімко еволюціонували з утилітарних програм і лабораторних зразків в провідну галузь промислового програмного забезпечення і утворили велике поле діяльності для цілого ряду комп'ютерної наук. Методологія розробки, впровадження та інтеграції автоматизованих систем, методи моделювання та проектування, алгоритми чисельних розрахунків, оптимізація та багато інших комп'ютерні засоби і технології, реалізовані зараз в математичному, інформаційному, програмному, організаційному та інших видах забезпечень САПР, свого часу вимагали виконання великого обсягу досліджень і експериментів. Все це знайшло своє місце і свій відбиток у теоретичному і практичному арсеналі САПР як науки.

САПР - це організаційно-технічна система, що входить в структуру проектної організації і здійснює проектування за допомогою комплексу засобів автоматизації проектування (ксапи).

Розвиток і вдосконалення систем автоматизованого проектування, які активно продовжують культивуватися у всіх індустріально розвинених країнах світу, дають відчутні результати. З стрімкий-ним прогресом комп'ютерної техніки і технологій значно змінюються в позитивну сторону показники економічної ефективності автоматизованих систем. Багаторазове здешевлення електроніки помітно на побутовому рівні. Програмне забезпечення стає все більш

потужним і функціонально повним без помітного збільшення вартості, а в ряді випадків і більш доступним для користувачів за рахунок збільшення тиражів і використання промислових методів розробки.

За своїм енциклопедичним визначенням автоматизоване проектування є складним інформаційним процесом взаємодій-наслідком проектувальників і засобів автоматизації. Причому за людиною залишаються найвідповідальніші, інтелектуальні функції, такі як постановка завдань і прийняття рішень, які не можуть бути виконані з по-міццю формальних математичних методів. Таким чином, все більш критичним для прогресу промисловості стають наявність розвинутої системи підготовки фахівців з промисловим комп'ютерним тих-монолог і рівень їх підготовки. В економічно розвинених країнах свого часу були зроблені серйозні зміни в системі освіти з учё-те що відбувається комп'ютеризації промисловості. І зараз практичні скі всі навчальні заклади технічного профілю в США і Західній Євро-пе мають в своїх навчальних програмах практикуми з основ автомати-зірованого проектування.

Багато наукові методи і рекомендації по створенню і експлуатації автоматизованих систем доведені до рівня промислових стандартами-тов, які офіційно прийняті на міжнародному та державному рівнях [29-38].

Сучасні системи автоматизованого проектування підтрим-жива цілий комплекс інженерних робіт на кількох ключових етапах життєвого циклу виробу (ЖЦІ) - в процесах проектування, конструкторськ-технологічної підготовки виробництва і складають основу ін-нтегрованої систем управління ЖЦІ

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 17.07.2023р.

виробництва (моділювання і розрахунок заготовок, підбір оптимальних режимів обробки, обчислення параметрів технологічних процесів і т.д.).

CAE-системи (Computer-Aided Engineering - комп'ютерна підтримка інженерного аналізу), як правило, реалізують універсальні підходи методу скінченних елементів, за допомогою якого можна проводити моделювання та чисельні розрахунки практично будь-яких фізичних полів [39, 40, 41]. До CAE можна віднести великий клас підсистем, кожна з яких дозволяє автоматизувати певну інженерну задачу (клас однорідних завдань): від розрахунків на міцність, аналізу аеро-, гідро-, термодинамічних процесів - до моделювання функціонування машин і механізмів, розрахунків процесів лиття, штампування та ін.

CAPP (Caap) -системи (Computer-Aided Process Planning (Assembly Planning)) - комп'ютерна підтримка планування технологічних процесів (процесів складання). Призначені для проектування технологічних процесів, трудового та матеріального нормування і розробки технологічної документації. Ці системи спільно з компонентами CAD / CAM / CAE-систем складають сучасну основу САПР ТП [22].

PDM-системи (Product Data Management - управління даними про продукт) призначені для інтеграції і зберігання комплексної інформаційної моделі виробу, включаючи геометричні та інженерно-фізичні моделі, вихідні дані і результати розрахунків, креслення, програми для верстатів з ЧПУ, інші конструкторські та технологічні документи, результати вимірювань і контролю, матеріали системи якості і т.д. [8].

Похилені лінії в аббревіатурі CAD / CAM / CAE / ... скоріше не ділять, а об'єднують підсистеми САПР. Інтеграція комплексного використання інженерних підсистем є магістральним шляхом розвитку сучасних систем автоматизованого проектування і обґрунтовується необхідністю створення комплексних моделей, найбільш повно і всебічно відображають властивості виробу, а також зручністю і економічною целесообразністю комплексного вирішення проблем автоматизації КТПП.

## 1.7 Переваги САПР

1. Більш швидке виконання креслень (до 3 разів). Дисципліна роботи з використанням САПР прискорює процес проектування в цілому, дозволяє в строк терміни випускати продукцію і швидше реагувати на вимірювання ринкових кон'єктур.

2. Підвищення точності виконання. На кресленнях, побудованих з помістю системи САПР, місце будь-якої точки визначено точно, а для збільшення достатнього перегляду елементів є засіб, зване наїзд, або zooming, що дозволяє збільшувати або зменшувати будь-яку частину даного креслення в будь-яке число раз. На зображення, над яким виконується наїзд, що не накладається ніяких обмежень.

3. Підвищення якості.

4. Можливість багаторазового використання креслення. Запам'ятований креслення може бути використаний повторно для проектування, коли в со-

ставши креслення входить ряд компонентів, які мають однакову форму. Пам'яті комп'ютера є також ідеальним засобом зберігання бібліотек, символів, стандартних компонентів і геометричних форм.

5. САПР має креслярськими засобами (сплайни, сполучення, шари).

6. Прискорення розрахунків і аналізу при проектуванні. В даний час існує велика різноманітність ПО, яке дозволяє виконувати на комп'ютерах частина проектних розрахунків заздалегідь. Потужні засоби когось п'ютерного моделювання, наприклад метод кінцевих елементів, освоєнняється конструктора від використання традиційних форм і дозволяють проектувати нестандартні геометричні форми.

7. Зниження витрат на оновлення. Засоби аналізу та імітації в САПР, дозволяють різко скоротити витрати часу і грошей на тестування і вдосконалення прототипів, які є дорогими цпаами процесу проектування.

8. Великий рівень проектування. Потужні засоби, комплексного моделювання. Можливість проектування нестандартних геометри-чеських форм, які швидко оптимізуються.

9. Інтеграція проектування з іншими видами діяльності. Інтегруемі обчислювальні засоби забезпечують САПР більш тісним зв'язками з інженерними підрозділами.

## 1.8 Огляд машинобудівних САПР

Основними вимогами до промислового виробництва є скорочення терміну виходу продукції на ринок, зниження її собівартості і підвищення її якості. Виконати ці вимоги неможливо без широкого використання методів і систем автоматизованого Проектування, технологічної підготовки виробництва та інженерного аналізу (CAE / CAD / CAM-систем).

Можливості систем на першому етапі в значній мірі визначаються характеристиками наявних в той час вельми не розвинених графічних апаратних засобів. Переважно використовувалися графічні термінали, що підключаються до мейнфреймів, в якості яких застосовувались комп'ютери компаній IBM і CDC, або до міні-ЕОМ типу PDP / 11. За даними Dataquest на початку 80-х рр. вартість однієї ліцензії CAD-системи доходила до 90000 \$.

На другому етапі (80-ті роки) з'явилися і почали використовуватися графіческие робочі станції компаній Intergraph, Sun Microsystems з архі-тектури SPARC або автоматизовані робочі місця на комп'ютерах VAX від DEC під керуванням ОС Unix. До кінця 80-х років вартість CAD-ліцензії знизилася, приблизно, до 20000 \$. Тим самим були створені передумови для створення CAD / CAM / CAE-систем більш широкого примі-вати.

На третьому етапі (починаючи з 90-х років) бурхливий розвиток мікро-про-цессора призвело до можливості використання робочих станцій на персональних ЕОМ, що помітно знизило вартість впровадження САПР на пред-підприємствах. На цьому етапі триває вдосконалення систем і роз-ширення їх функціональності. Починаючи з 1997 р, робочі станції на плат-формі Wintel не

поступаються Unix-станціям за обсягами продажів. Вартість ліцензії знизилася до кількох тисяч доларів.

Четвертий етап (починаючи з кінця 90-х років) характеризується інтеграцією CAD / CAM / CAE-систем з системами управління проектними даними PDM і з іншими засобами інформаційної підтримки виробів.

Прийнято ділити CAD / CAM-системи за їх функціональними характеристиками на три рівні (верхній, середній і нижній). У 80-ті роки і в началі 90-х такий розподіл ґрунтувалося на значному розходженні характеристик використовуваного для САПР обчислювального обладнання. Апаратної платформою CAD / CAM-систем верхнього рівня були дорогі високо-продуктивні робочі станції з ОС Unix. Така техніка дозволяла виконувати складні операції як твердотільного, так і поверхневого геометричного моделювання стосовно складальним вузлів з багатьох деталей. CAD-системи нижнього рівня призначалися тільки для автоматизації креслярських робіт, що виконувалися на нізкопродуктивних робочих станціях і персональних комп'ютерах. У міру поліпшення характеристик персональних комп'ютерів вдавалося створювати порівнятельно недорогі системи з можливостями параметричного і асоціативного 3D-моделювання. Такі системи стали відносити до CAD / CAM-систем середнього рівня. Сьогодні розподіл CAD / CAM-систем на САПР верхнього, середнього і нижнього рівнів ще зберігається, хоча і страждає очевидною нечіткістю.

Так, до 1982 р твердотільне моделювання починають застосовувати в своїх продуктах компанії Computerision, IBM, Prime і ін. Проте методи по сля

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

System) - стандарт ANSI, що став стандартом ISO в 1989 р У 1993 році компанією Silicon Graphics запропонований стандарт OpenGL (SGI Graphical Language), широко використовуваний в даний час.

У цих системах використовуються графічні формати для обміну даними, що представляють собою опис зображення у функціях віртуального графічного пристрою (в термінах примітивів і атрибутів). Графіческого формат (метафайл) забезпечує можливість запам'ятовувати графічний інформацію єдиним чином, передавати її між різними сі-стем і інтерпретувати для виведення на різні пристрої. Такими форматами стали CGM - Computer Graphics Metafile, PostScript - Adobe Systems Language, GEM - GEM Draw File Format і ін.

Роботи зі стандартизації були спрямовані на розширення функціональності графічних мов і систем, включення в них коштів опису не тільки даних креслень і 3D-моделей, а й інших властивостей і характеристик виробів.

В області автоматизації проектування уніфікація основних операцій геометричного моделювання привела до створення інваріантних геометричних ядер, призначених для застосування в різних САПР. Поширення отримали два геометричних ядра: Parasolid (продукт фірми Unigraphics Solutions) і ACIS (компанія Spatial Technology). Ядро Parasolid розроблено в 1988 р і в наступному році стає ядром твердотельного моделювання для CAD / CAM Unigraphics, а з 1996 р - промисленого стандартом.

Паралельно проводилися роботи по стандартизації описів геометричних моделей для обміну даними між різними системами на різних етапах життєвого циклу промислової продукції. Спочатку з'явився стандарт IGES (Initial Graphics Exchange Specification). Фірма Autodesk в своїх продуктах стала використовувати формат DXF (Autocad Data exchange Format). Потім були розроблені мову Express і прикладні протоколи AP203 і AP214 в групі стандартів ISO 10303 STEP (Standard for Exchange Product Model Data).

Прикладами CAD / CAM-систем верхнього рівня є CATIA (компанія Dassault Systemes), Unigraphics (Unigraphics Solution), Pro / Engineer (PTC). Продукти цих фірм доступні з 1981, 1983 і 1987 року відповідно. До числа САПР верхнього рівня в 90-і роки ставилися також EUCLID3 (Matra Datavision), I-DEAS (UGS), CADD5 (Computervision), але їх розвиток було припинено в зв'язку зі злиттям компаній.

У 2001 р відбувається злиття компанії Unigraphics Solution з SDRC, що означає поступове припинення розвитку I-DEAS і використання вдалих рішень двох систем I-DEAS і Unigraphics (UG) в нових версіях системи Unigraphics NX.

Ще раніше система CADD5 була придбана компанією PTC (Parametric Technology Corp.). Ця компанія, штаб-квартира якої розташована в США, заснована в 1985 р колишнім професором Ленінградського університету Семеном Гейзбергом.

Найбільш відомими CAD / CAM-системами середнього рівня на основі ядра ACIS є AutoCAD 2000, Mechanical Desktop і Autodesk Inventor (Autodesk Inc.); Cimatron (Cimatron Ltd.); ADEM (Omega Technology); Mastercam (CNC Software, Inc.); Powermill (AUTODESK) і ін. До числа CAD / CAM-систем середнього рівня на основі ядра Parasolid належать, зокрема, Solid Edge і Unigraphics

Modeling (Unigraphics Solutions); SolidWorks (SolidWorks Corp.); MicroStation Modeler (Bentley Systems Inc.); Pro / Desktop (Parametric Technology Corp.); Anvil Express (MCS Inc.) і ін. Компанія PTC в своїх продуктах починає застосовувати розроблене нею в 2000 р геометричне ядро Granite One.

У 1992 році корпорація Intergraph, один з провідних на той момент виробників САД-систем для машинобудування, прийняла рішення про раз-розробці нового програмного продукту, цілком побудованого на базі платформи Wintel. В результаті в кінці 1995 року з'явилася система гео-метричного моделювання Solid Edge (таке ім'я отримала нова система). У 1998 році до Unigraphics перейшло все відділення Intergraph, займаю-щеся САПР для машинобудування. В цей же час Solid Edge змінює гео-метричний ядро ACIS на ядро Parasolid.

У 1993 р в США створюється компанія Solidworks Corporation і вже через два роки вона представила свій перший пакет твердотільного парамет-ричного моделювання Solidworks на базі геометричного ядра Parasol-id. Система Solidworks увійшла в число провідних систем середнього рівня.

Ряд САД / САМ систем середнього та нижнього рівнів розроблений в СРСР і Росії. Найбільшого поширення серед них отримали Компас (компанія Аскон) і Т-Flex САД (Топ Системи) і деякі інші систе-ми.

Класифікація найбільш популярних САПР представлена в табл. 1.1.

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 17.07.2023р.

	КРЕДО (САЕ)	НИЦ АСК
Лёгкий	AutoCAD	Autodesk
	SurfCAM 2D	Surfware
	DataCAD	DataCAD
	IntelliCAD	CADopia
	TurboCAD	IMSI
Спеціалізовані САПР		
Промислове проектування	AutoPlant	Rebis (належить фірмі Bentley)
Архітектурне проектування	Architectural Desktop	Autodesk
Проектування метало-конструкцій	StruCAD	AceCAD Software

Примітка. У таблиці перераховані далеко не всі САПР, а тільки основні продукти, представлені на українському і російському ринку.

### 1.9 Характеристика виробу та умови його експлуатації

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Рисунок 1.1 – Гідророзподільувач РСД-05

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Таблиця 1.3 Температура критичних точок, в °С

Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>	M <sub>H</sub>
730	810	796	680	360

Таблиця 1.4 Хімічний склад, у відсотках

C	Si	Mn	Cr	S	P	Cu	Ni	As
			не более					
0,32-0,4	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08

Таблиця 1.5 Механічні властивості в залежності від температури відпустки

t <sub>отп</sub> , °С	σ <sub>0,2</sub> , МПа	σ <sub>B</sub> , МПа	δ <sub>5</sub> , %	Ψ, %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	Твёрдость НВ
200	600	760	13	60	29	226
300	560	735	14	63	29	212
400	520	690	15	64	98	200
500	470	660	17	67	137	189

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 17.07.2023р.

## Розділ 2

### Програмний САМ-комплекс Autodesk FeatureCAM

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

своїм продукту FeatureCAM, який тепер буде розвиватися під патронажем і в інтересах Autodesk.

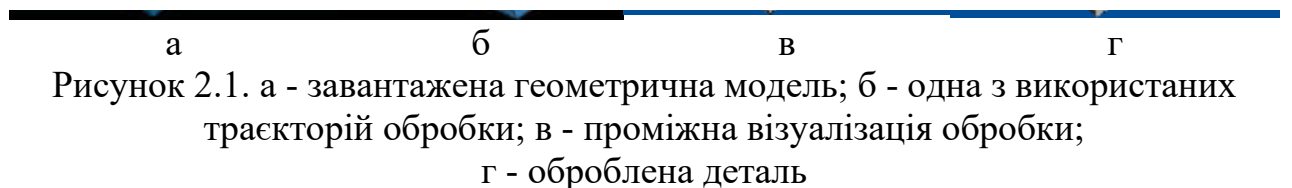
Багато користувачів САПР сприймають Autodesk насамперед як ав-тора ефективних інструментів для програмування верстатів з ЧПУ, але найважливішим своїм досягненням ідеологи фірми вважають комплексний підхід до автоматизації технологічної підготовки виробництва, Вирваний в концепції тотального моделювання (Total Modelling) [42]. Комплексні технології автоматизації від Autodesk підтримує цілий набір програмних засобів, що забезпечують геометричне моделює-вання, промисловий дизайн, імітацію різних стратегій обробки на металорізальних і ерозійних верстатах, генерацію оптимізованих програм, засоби вимірювання контролю та реверсивного інжинірингу.

В комплекс Power Solution входять наступні основні програмні продукти:

- PowerMILL - модуль програмування верстатів з ЧПУ;
- PowerSHAPE - модуль геометричного моделювання;
- PowerINSPECT - модуль цифрового вимірювання та контролю;
- CopyCAD - модуль реверсивного інжинірингу;

- ArtCAM - модуль промислового дизайну;
  - FeatureCAM - модуль генерації процесів і програм металлообництва.
- PowerMILL призначений для моделювання процесів фрезерної обробки машинобудівних виробів складної форми (рис. 2.1) і з-будівлі керуючих про-

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.



PowerSHAPE є гібридним геометричним моделлером з пре-майновим розвитком в області поверхневого моделювання (рис. 2.2).

У PowerSHAPE використовують унікальне математичне забезпечення поверхневого моделювання, розроблене в Кембриджі, в якому використовуються модифіковані Безьє-поверхні, що дозволяють при редагуванні легко змінювати форму поверхні і «ліпити» моделі практично будь-якої форми.

На відміну від твердотілого моделювання, яке переважно використовується для автоматизації проектно-конструкторських робіт, у багатьох технологічних завданнях кращі результати дає поверхневе моделювання. Це пов'язано не тільки з тим, що для створення поверхонь витрачається значно менше

ресурсів комп'ютера, але і з великими можливостями самого математичного апарату. Наприклад, відомо, що при твердотільному моделюванні неприпустимі навіть незначні ще-чи і розриви між геометричними об'єктами, які неминуче в процесі моделювання.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

підхід значно підвищує гнучкість і різноманітність засобів досягнення цілей геометричного моді-воджується форматворчих елементів виробів.

Для конструкторів оснащення в системі є засоби побудови лінії роз'єму і поверхні роз'єму, автоматичного розподілу моделі на матрицю і пуансон, виділення змін в конструкції, створення чи-Тейн ухилів, поднутрених і т.д.

В систему інтегрований креслярський модуль PS-Draft і модуль проектування прес-форм PS-Mold.

PowerINSPECT - спеціалізований програмний пакет для роботи з контрольно-вимірювальними машинами (КІМ). Поєднавши комп'ютер з КІМ, можна автоматизувати процес вимірювання та контролю готового через делія, обробити результати, візуалізувати в графічній формі і підготувати вичерпний текстовий звіт про його відповідність заданим умовам (рис. 2.3).

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

FeatureCAM - новий продукт в лінійці Autodesk, який доповнить-ет наявні рішення новими можливостями:

- розробка програм для токарних верстатів з ЧПУ і багатошпіндельних обробних центрів;

- напівавтоматична генерація технологічних процесів метало-обробки за даними аналізу конструктивних особливостей деталей.

Системи Power Solution можуть імпортувати дані з інших автоматизованих систем або через стандартні формати обміну, такі як IGES, Parasolid і STEP, або через прямі інтерфейси до наступних систем: 3 ADDS, SolidWorks, CATIA, Unigraphics, ProEngineer.

Компанія Autodesk успішно співпрацює з багатьма вузами України та Росії. Більше 20 українських вищих навчальних закладів офіційно використовують ліцензійні продукти Autodesk, а в найбільш просунутих з них організовані авторизовані навчальні центри.

Як і інші спеціалізовані промислові системи, програмно-методичні комплекси серії Power Solution від Autodesk можуть використовуватися автономно на локальних автоматизованих місцях або інтегрованої у вигляді підсистем з продукцією інших виробників, в тому числі і важкого класу.

## 2.2 Можливості PowerMILL

Втілила в собі 40-річний досвід розробки компанією Autodesk CAD / CAM-рішень для різних галузей промисловості, система PowerMILL пропонує неперевершену широту функціоналу: від спеці-альних програм, як обробка каналів двигунів, до обробки дета-лей багатошпindelними роботами [44].

### 2.2.1 Моделювання для виробництва

Модуль PowerMILL Modelling містить спеціалізовані інстру-менти, розроблені експертами в області механічної обробки, для упрощення процесу ви-робництва: спеціальний функціонал для відновлення процесів-ня даних без не-обхідності використання додаткової CAD-системи. PowerMILL Modelling є до-датковим модулем, який дозволяє ще значніше підвищити функціональність і ефективність PowerMILL, але, в той же час, він дуже простий в освоєнні і вико-ристанні. Модуль PowerMILL Modelling є частиною PowerMILL, але може бути запущений і сам по собі в офісі розробки CAD.

#### Підготовка даних.

Інтерактивні інструменти аналізу 3D-моделей визначають про-блемні зони, здатні викликати складності при подальшій обробці, а функції доопрацю-вання CAD-моделей дозволяють внести в геометрію необ-хідні виправлення:

- виявляти поверхні з проміжками, накладеннями або від-отворами, зна-ходити тонкі стінки і області з поднутреними;
- проводити лінії геометрії, створювати і редагувати поверхно-сти, усу-вати типові помилки 3D-моделювання;
- переглядати модель у вигляді цветокодірованої «карти», на кото-рій виділяються малі радіуси, які важко обробляти, а також ме-ста, в яких може зна-добитися обробка електродом.

#### Відновлення даних.

Унікальний набір інструментів для відновлення даних позво-ляєт усувати типові проблеми, що виникають при 3D-моделюванні, а також помилки імпорту CAD-моделей. За допомогою PowerMILL Modelling ви можете:

- відновлювати проміжки і отвори, інтерактивно змінюючи межі обрізу-вання або додаючи нові поверхні;
- видаляти повторювану геометрію для досягнення найбільшої ефектив-ності.

#### Зміна даних.

Високоєфективні інструменти для 3D-моделювання дозволяють швидко вносити зміни для обробки деталі:

- додавати або змінювати заокруглення для спрощення процесу фрези-вання і оптимізації часу обробки даних;
- налаштовувати кути ухилу для легшого вилучення деталі;
- визначати 2D елементи для обробки на електроерозійному верстаті і «на-кривати» їх тимчасовою поверхнею для спрощення обробки основний геометрії;
- створювати допоміжні поверхні для контролювання кричи-ентации ін-струменту при 5-осьовий обробці.

переваги:

- Швидке рішення виявлених проблем.
- Усунення затримок, викликаних необхідністю пересилки дан-них для проектування в КБ.
- Рішення потенційних виробничих проблем на етапі проєк-тування ви-роби.

Замовники: Shanghai Maple Motor Dies, Haribo, Thoratec Corporation, TsAGI.

Типові застосування:

- Виготовлення прес-форм.
- Виробництво комплектуючих для авіакосмічної галузі.
- Спрощення форми моделей шляхом видалення деяких елементів.
- Заповнення отворів і зазорів.
- Створення контрольних поверхонь для багатоосевой обробки деталей.

### 2.2.2 Високошвидкісна обробка (HSM)

Інноваційні технології CAD / CAM для обробки компонентів в найкоро-

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Рисунок 2.4 - Приклад чорнової обробки в PowerMILL

Обробка зі згладжуванням.

При такій обробці (рис. 2.5) чорнові проходи поступово сглаються в міру того, як траєкторія відлається від основної форми. Як і пучанин траєкторії

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Використання моделі матеріалу PowerMILL і «розумного» упорядкування забезпечує постійне різання і скорочує непотрібні переміщення по повітря. У будь-який момент можна виконати симуляцію і візуалізацію матеріалу, що залишився, що полегшить вибір наступного розміру інструмента і стратегії.

Траєкторія доопрацювання видалить матеріал, що залишився від попереднього інструмента великого розміру, залишаючи тільки ті області, для яких потрібно фреза меншого розміру, скорочуючи, таким чином, час фрезерування.

Інноваційна чистове обробка.

Високошвидкісна обробка вимагає постійного навантаження на інструмент і мінімум різких змін напрямку. Для виконання цих умов зазвичай потрібно комбінація декількох стратегій.

PowerMILL містить безліч стратегій чистової обробки, кото-які дають плавне рівномірне різання, необхідне для забезпечення швидкого видалення матеріалу і відмінної якості чистової обробки поверхні. Три приклади представляють обробку 3D зміщенням і з по-постійної Z, а також Оптимізовану Z.

### 2.2.3 5-осьова обробка

Просунуті CAD / CAM рішення для багатівісьової обробки, дозволяють скоротити час поставки, підвищити продуктивність і рентабельність, не знижуючи якості обробки поверхонь.

PowerMILL пропонує широкий ряд стратегій, що дозволяють зробити ефективно 5-координатне програмування реальністю. Комбінація потужності, гнучкості і простоти використання дозволяє успішно використовувати PowerMILL в різних сферах: лопатки і моноколеса, авіаційно-ні конструкції, обробка каналів, обрізка, гравірування на формах для пляшок [44].

Основною перевагою 5-координатної обробки є можливість зменшення тимчасових витрат шляхом обробки складних форм за допомогою одних початкових установок. PowerMILL включає кілька стратегій обробки, які використовують більш короткі фрези, виконуючи більш швидко і точно обробку при меншій вібрації:

Для успішної 5-координатної обробки дуже важливо контролюватися, що відбувається в шпинделі, а також в точці контакту інструменту. Недостатній контроль осі інструменту буде приводити до непередбачуваних переміщень верстата, нерівній обробці поверхні, передчасному зносу інструменту або навіть до сутичок. Контроль осі інструмента, що надається PowerMILL, гарантує неперевершені результати при 5-координатній обробці.

Автоматичне запобігання зіткнень.

Інструмент для запобігання зіткнень PowerMILL автоматично відхиляє фрезу від перешкод на задану відстань. Коли пере-перешкоджає пройдено, інструмент повертається до вихідного робочого кутку. Крім обходу перешкод це також корисно для обробки поднутрених.

Загальний контроль з редагуванням осі інструменту.

Для оптимального контролю 5-координатного верстата PowerMILL дозволяє налаштувати параметри осі інструменту для окремих областей траєкторії. Така тонка настройка траєкторії може давати значну різницю для загальної якості деталі і дозволяє верстату працювати максимально плавно.

Переваги позиційної 5-координатної обробки:

- надає доступ до глибоких областях;
- підвищує якість чистової обробки поверхні за рахунок використання більш коротких, жорстких фрез;
- дозволяє обробляти піднутрені;
- дає значні переваги за часом з-за використання тільки однієї установки.

Переваги безперервної 5-координатної обробки:

- ідеально підходить для обробки деталей за профілем, глибоких матриць і пуансонів;
- короткі фрези дають більш високу точність і більш високу якість обробки поверхні;
- дозволяє обробляти бічній або нижньою частиною інструменту;
- може використовуватися з широким спектром типів інструменту;

- повний захист від врізів;
- може використовуватися з моделями в форматі STL.

Елементи і функції: обробка поверхні, обробка боком фрези, обробка профілю, обрізка, фрезерування кишень, обробка пазів, багатоосеве свердління, інтегрований 5-координатний постпроцесор.

переваги:

- Значна економія часу завдяки можливості виконувати обробку деталей складної форми за одну установку.

- Використання більш короткого інструменту, що забезпечує більш швидку і точну обробку при меншій вібрації.

- Зниження тривалості технологічного циклу і поліпшення якості обробленої поверхні завдяки ефективному управлінню орієнтацією інструменту в робочому просторі.

- Повністю інтегровані симуляція і виявлення зіткнень-ний для забезпечення безпеки процесу обробки областей поднутрення.

- Можливість редагування осі інструменту, що дозволяє скор-коригуватися окремі ділянки траєкторії інструменту, що забезпечує плавність його руху.

Замовники: Goodrich Engine Control Systems, Beneteau, Mattel, Hyun-dai, Hindustan Aeronautics.

## Розділ 3

### Програмний САМ-комплекс ESPRIT

DP TECHNOLOGY - це провідний розробник і постачальник САМ-програмного забезпечення для програмування обробки верстатів з числовим програмним управлінням. ESPRIT - флагманський продукт DP Technology, що є високопродуктивною, повнофункціональною системою для програмування обробки фрезерних, токарних, електро-ерозійних і багатозадачних верстатів. Політика компанії DP Technology полягає в забезпеченні програмістів верстатів з ЧПУ найпотужнішим САМ програмним забезпеченням в світі, заснованому на розумінні техно-логічних задач і бажанням домогтися досконалості.

DP Technology інвестує близько 20% доходів компанії в дослід-вання та поліпшення свого програмного забезпечення. Така довготривала практика вивела ESPRIT на лідируючу позицію в галузі з моменту виходу в 1985 році. Сьогодні DP Technology має два патенти на технології, закладені в ESPRIT. Штаб-квартира компанії розташована в Samarillo, штат Каліфорнія. Команди розробників знаходяться в США і Італії. Підтримка і постачання ПЗ здійснюється через офіси в Європі, Азії, Південній і Північній Америці [45].

Програмне забезпечення ESPRIT працює більш ніж на 15 000 підприємствах по всьому світу і є на 15 мовах через 200 доларів. Повнота функціоналу системи полягає в здатності працювати з самими складними верстатами. Інженери-технологи можуть працювати з ESPRIT в різних виробничих галузях: від медицини до авіації.

ESPRIT розроблений на платформі Windows і є її повноцінним додатком. Інтерфейс ESPRIT використовує однакову з Windows систему іконок, меню, екранів і кнопок управління.

#### 3.1 Огляд САМ-системи ESPRIT

Використовувана в ESPRIT передова технологія адаптивної обробки дозволяє оперативно реагувати на постійно вносяться в конструкцію деталей зміни. ESPRIT розширює поняття асоціативності, виводячи її можливості за межі поновлення тільки траєкторії руху інструмента. Програмне забезпечення автоматично пристосовує наявнихся в його розпорядженні ріжучі інструменти, траєкторії руху, цикли і всі пов'язані параметри обробки, щоб вони оптимально відповіли новій геометрії деталі. Адаптивна технологія ESPRIT також працює і з родинками деталей, забезпечуючи продуктивну обробку подібних елементів у різних деталях [45].

Робота з будь-якими верстатами з ЧПУ.

Високопродуктивна система ESPRIT пропонує потужні середовища для будь-якого верстата з ЧПУ. Функціональність ESPRIT включає програмі-рування фрезерної обробки від 2-х до 5-ти осей, токарної обробки від 2-х до 22-х осей, електроерозійної обробки від 2-х до 5-ти осей, багатозадачних токарно-фрезерних верстатів з синхронізацією, верстатів з віссю В.

Обробка деталі будь-якої складності.

ESPRIT пропонує прямий CAD / CAM інтерфейс для імпорту моделей з різних джерел без необхідності виправлення або перестроювання геометрії, дозволяє обробляти будь-яку комбінацію твердих тіл, по-поверхонь, каркасної ге-

ж  
а-

1-  
2-  
1-

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

### Рисунок 3.1 – Програмування токарної обробки

Автомати поздовжнього точіння.

ESPRIT використовує особливості автоматів поздовжнього точіння і робить їх програмування набагато простішим; забезпечує симуляцію, визначення зіткнень і генерацію точного коду; забезпечує сертифіковані програмні рішення для верстатів: Citizen, Star, Tsugami.

Токарна обробка на верстатах з декількома шпинделями і декількома револьверними головками.

Використовуючи САМ-систему ESPRIT, ви можете отримати повний контроль над синхронізацією, динамічної симуляцією і точним визначенням зіткнень. Система дозволяє програмувати одночасну обробку спереду і ззаду, одним або декількома інструментами. Набір циклів ESPRIT містить операції з управління подачею прутка, люнетом і відрізків деталі.

Традиційна токарне оброблення.

ESPRIT раціоналізує вашу токарної обробки, з мінімальні-ми витратами часу на навчання. Система пропонує контурну (про-профільними) обробку для торця, внутрішнього і зовнішнього діаметра або позитивну обробку для вирішення широкого діапазону технологічних задач. Чорнові цикли ESPRIT дозволяють працювати з виливками, заготовками складної форми або прутком і мають опції для контролю над кожним переміщенням інструменту.

Просунуті верстатні цикли.

ESPRIT надає сім циклів для обробки канавок з широкі-ми можливостями по контролю над переміщеннями інструменту: одне врізання, безліч врізання, ступінчаста обробка, зігзаг обробка. Для нарізування різьблення система пропонує багато опцій, включаючи точку входу, нахил, змінний крок.

Гнучкі можливості по налаштуванню інструменту.

ESPRIT спрощує процес визначення токарного інструменту. Ви можете вибрати інструмент з повною бібліотеки ANSI / ISO, що містить пластини і державки, намалювати інструмент в CAD системі, або імпортуваннятировать його.

Синхронізація та оптимізація.

Лист синхронізації ESPRIT призначений для оптимізації G-коду і зменшення загального часу обробки деталі. ESPRIT представляє шкалу для зручного управління головкою, шпинделем і супорті. Підтримується метод "Drag-and-drop" (Бери-і-Кинь) для швидкого налаштування операцій синхронізації.

Повна симуляція процесу обробки.

Система дозволяє обробляти найскладніші деталі завдяки всебічній, реалістичною і точною симуляції, переглядати процес обробки деталі разом з елементами верстата: шпинделем, головками, В-віссю і складанням інструменту.

### 3.1.3 База знань KnowledgeBase

База знань ESPRIT KnowledgeBase™ надає можливість для оператора або програміста отримати доступ до інформації про кращому методі для обробки обраної деталі, автоматично обчислює підходячи-шую стратегію обробки, ріжучий інструмент, технологічні пара-метри траєкторії. Цей доступ відкривається при натисканні всього однієї кнопки, що дозволяє звільнити програміста від рутинної роботи по обра-лення схожих деталей, і дати йому можливість сфокусуватися на загальному технологічному процесі і поліпшення своїх знань.

Раціональне програмування.

З базою знань ESPRIT вам не доведеться згадувати про те, яка робота була пророблена раніше. У базі знань зберігається вся технологічна інформація, яка дозволяє програмісту і оператору верстата з ЧПУ автоматично отримувати дані про бажаних методах обробки, що зробить процес програмування раціональним.

Замкнутість виробничого ланцюжка.

Розрахована на багато користувачів SQL база даних, вбудована в Базу знань ESPRIT замикає ланцюжок між програмістами і цехом, забезпечує централізоване сховище для збору виробничого досвіду.

Автоматизація технологічного процесу.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

---

Рисунок 3.2 – База знань конструктивних елементів

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

База знань швидкостей і подач.

Калькулятор швидкостей і подач представляє оптимальні швидкості і подачі для кожної ситуації, засновані на класі деталі і матеріалі, типі інструменту, стратегії і глибині різання. Менеджер бази знань швидкостей різання і подач дозволяє програмістам додавати і оновлювати параметри швидкостей різання для будь-якого виду обробки, а додаткова база даних CUTDATA™ спрощує програмування завдяки використанню більш ніж 100 тисяч рекомендацій для вибору режимів різання.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Специфікація ESPRIT KnowledgeBase:

- Менеджер проекту. Управляє і впорядковує елементи деталі, операції обробки і ріжучі інструменти.
- Браузер властивостей. Забезпечує повне управління режимами різання.
- Конструктор правил і виразів. Визначає, як адаптувати наявні процеси обробки до різних конфігурацій деталей.
- База знань процесів:
  - база даних за рекомендованими процесам і режимам обробки;
  - менеджер процесів для створення, редагування і автоматичного вибору процесів обробки для різних елементів деталі;
  - призначений для користувача інтерфейс для редагування процесів.

- База знань швидкостей різання і подач:
  - база даних за рекомендованими матеріалами і швидкостям різання;
  - Калькулятор для автоматичного розрахунку оптимальних швидкостей різання для кожної конкретної ситуації;
  - призначений для користувача інтерфейс для управління швидкостями різання і подач;
  - CUTDATA™ - додаткова база даних з більш 100 000 рекомендації для вибору швидкостей різання і подач.
- База знань ріжучих інструментів:
  - база даних по рекомендованим ріжучим інструментам;
  - призначений для користувача інтерфейс для вибору та управління ріжучим інструментом.
- База знань стандартних налаштувань:
  - база даних по групам процесів, рекомендованим для кожного циклу обробки;
  - призначений для користувача інтерфейс для управління параметрами рекомендована процесів.
- База знань «Деталь-Елемент»:
  - класифікатор конструктивних елементів.

### 3.1.4 Розробка ПО

Виробники верстатів, програмісти, досвідчені користувачі напів-ють набір розробника ESPRIT для швидкого створення різноманітних CAD / CAM рішень, як для виконання своїх завдань, так і для продаж іншим користувачам системи. Розробники можуть вибрати будь-який рівень функціональності системи для кінцевого користувача або інтегрують власні компоненти в структуру ESPRIT.

Набір розробника ESPRIT складається з програмного інтерфейсу (API), заснованого на Microsoft Component Object Model (COM) і Microsoft Visual Basic для додатків. Інтерфейс забезпечує розробникам доступ до масиву CAD / CAM технологій ESPRIT. Графічний інтерфейс (GUI) ESPRIT може бути адаптований під потреби OEM виробника устаткування [45].

### 3.2.1 Ефективність багатозадачності

Багатофункціональні обробні центри, що володіють можливостями фрезерування, точіння, свердління знаходять сьогодні все більше застосування. Подібне обладнання дозволяє виконувати за один установ одночасно токарних і фрезерну обробку на обох сторонах деталі. Таким чином, в токарно-фрезерні центри закладений величезний потенціал продуктивності, однак вони складні в програмуванні. Тому правильний вибір САМ системи - це ключовий фактор в успішному при-трансформаційних змін багатофункціональних верстатів. Крім того, він безпосередньо визначає терміни окупності інвестицій в це дороге

устаткування. Компанія ESPRIT надає високу продуктивність верстатів такого типу [45].

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 17.07.2023р.

для роботи з багатофункціональними центрами. ESPRIT підтримує роботу обладнання будь-якої конфігурації, будь-які комбінації звичайної, синхронізованою і одне-часової фрезерної і токарної обробки, а також будь-які комбінації робочих переміщень по осях A, B, C, X, Y і Z. П'ять рівнів функціональних можливостей ESPRIT для 2 -5-осьової обробки повністю охоплюють завдання програмування токарно-фрезерних операцій, включаючи 3-5-осьовий фрезерування складних деталей. Ви зможете зробити обрамлення будь-якої складності, використовуючи каркасну геометрію або 3D твердо тільні / поверхневі моделі.

Гнучке програмування осі B.

ESPRIT дозволяє реалізувати весь потенціал і гнучкість токарно-фрезерних центрів, оснащених віссю B, для високоточного виконання одночасної

5-осьової і індексної фрезерної обробки на передньому і задньому торці лю-бій заготовки. Функціональність повноцінної 5-осьовий обробки в ESPRIT дозволяє легко програмувати переміщення з будь-яким положенням осі інструменту. Такі переміщення зазвичай необхідні для обра-лення складних елементів і поверхонь різних виробів для медицини, складних клапанів, державок інструментів, інструментів для буріння нафтових свердловин і т.п. ESPRIT забезпечує

широкі можливості 5-осьовий обробки для таких машинних циклів як: торцева обробка, розточування, нарізування канавок, нарізання різьби, контурна обробка, обробка кишень, отворів і чистове обробка.

Точіння, фрезерування і свердління.

Система ESPRIT пропонує 5 рівнів функціональності при роботі з осями С і Y для підтримки всієї гами багатозадачних верстатів. ESPRIT забезпечує повний набір фрезерних операцій (конттури, кишень, осі С, В, Y, інструмент під кутом, дообробки, обробка отворів) при роботі з токарно-фрезерними верстатами. Система виконає 2 1/2-осьовий фрезерування на токарно-фрезерному верстаті, використовуючи осі Z, X і С, або Z, X і Y. Обробка пазів і похиле свердління простіше виконується при «Навої-рачіванні» кишень, отворів профілю навколо осі С. Для нецентрового фрезерування з віссю Y, ESPRIT надає широкий набір операцій включають торцювання, обробку кишень, дообробки, свердління та ін. Ці цикли ефективно застосовувати для фрезерування елементів зі складними кутами по осях С, Y і В на торці, зовнішньому або внутрішньому діаметрі.

Повна синхронізація і верифікація.

Система ESPRIT дозволяє оптимізувати, синхронізувати і графічно перевірити багатозадачну обробку за допомогою функції твердотільної симуляції. ESPRIT готовий до симуляції процесу обробки для будь-якої комбінації операцій на токарно-фрезерних верстатах. Ви отримаєте реалістичне зображення готової деталі на моніторі ПК і забезпечите себе від можливої поломки дорогого устаткування.

SolidMillTurn Traditional - САМ-модуль для токарно-фрезерної проництв з використанням осі С:

- Багатофункціональний фрезерування - звичайне, синхронізований-ве і синхронне.
- 4-осьові токарно-фрезерні цикли з використанням повороту заготовки: обробка кишень на діаметрі, контурна обробка на діаметрі, обробка отворів на діаметрі.

SolidMillTurn Advanced - САМ-модуль для токарно-фрезерної обробки з використанням осі Y:

- Багатофункціональний фрезерування - звичайне, синхронізований-ве і синхронне.
- Токарно-фрезерні цикли для осевой обробки деталі з використанням 2,5 осей: торцева обробка, обробка кишень, контурна обробка, дробка матеріалу, що залишився, обробка отворів, спіраль-ва обробка, нарізування різьблення і багато іншого.

SolidMillTurn Production - САМ-модуль для токарно-фрезерної проництв з використанням осі В:

- Багатофункціональний фрезерування - звичайне, синхронізований-ве і синхронне.
- 4- і 5-осьовий індексне позиціонування (осі С, В).
- Індексне фрезерування з використанням будь-яких циклів обробки, пропонувані в SolidMillTurn Advanced.

SolidMillTurn FreeForm - САМ-модуль для одночасної 3-5-осьової обробки:

- Обробка криволінійних поверхонь.
- багатозадачність тривимірне фрезерування - звичайне, Сінхронізується-рованное і синхронне.
- Цикли 3-осьовий обробки.
- Цикли 5-осьовий обробки.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

### Рисунок 3.6 – 5-ти вісьове фрезерування

Поворотний фрезерування (фрезерування на діаметрі).

Поворотний фрезерування ESPRIT виконується для 3D або 2D елементів. ESPRIT вмiє обробляти контури, кишені, виконувати свердління на 4-ій поворотній осі. ESPRIT конвертує стандартні 3-х осьові переміщення (X, Y, Z) в повороти осі C. Намотуючи профіль навколо осі обертання, виконується додаткове зміщення осі Y для забезпечення прямих стінок.

Чорнова обробка і обробка кишень.

Цикли обробки кишень ESPRIT забезпечують повний контроль над інструментом, чорновим і чистовим фрезеруванням. ESPRIT може значно спростити процес програмування кишень з прямими стінками або кишень складної

форми, кишень з островами і бобишками. Широкий вибір стратегій обробки кишень забезпечує безмежні-ні можливості для користувача системи.

Контурна обробка (рис. 3.7).

Програмісти верстатів з ЧПУ вважають ESPRIT потужним і надійним інструментом для обробки контурів, профілів, пазів, прямих і нахил-них стінок з постійною або змінною глибиною. Налаштування параметрів обробки дозволяє вважати властивості геометричних елементів деталі і створює траєкторію руху інструменту. Для більш повного контролю над інструментом, ESPRIT може керувати індивідуальними переміщеннями в будь-якій точці траєкторії [45].

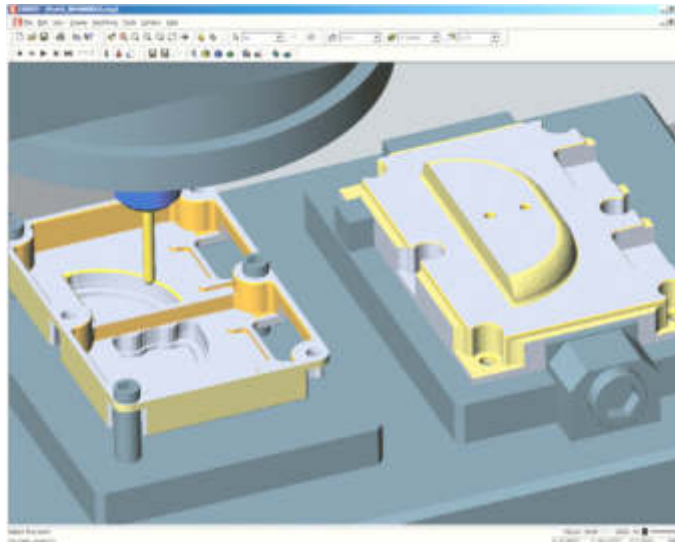


Рисунок 3.7 – Контурна обробка

Дообробки.

Функція дообробки автоматично розпізнає операції обробки і ріжучі інструменти асоціативні елементам геометрії деталі, скомпаривши вийшла і оригінальну деталі, виконує контурну або кишенькову обробку недообработаних областей. Так само цикл доопрацювання використовується при виконанні чорнового і напівчистового фрезерування, забезпечуючи оптимальний вибір ріжучого інструменту.

Свердління і обробка отворів (рис. 3.8).

При програмуванні операцій свердління та інших видів обробки отворів пропонується вибір між циклами ESPRIT, стандартними циклами верстата або комбінацією тих і інших. Використовуючи менеджер про-процесу, за один раз, ви можете запрограмувати центрування зі зняттям фаски, глибоке свердління, розточування і розгортання набору отверстий. Фрезерування різьблення в ESPRIT дозволить обробити внутрішню або зовнішню, ліву чи праву різьблення. Спиральний цикл - ідеальне рішення для фрезерування отворів. Система ESPRIT автоматично генерують-ет оптимізовану траєкторію, тим самим, зменшуючи час обробки.

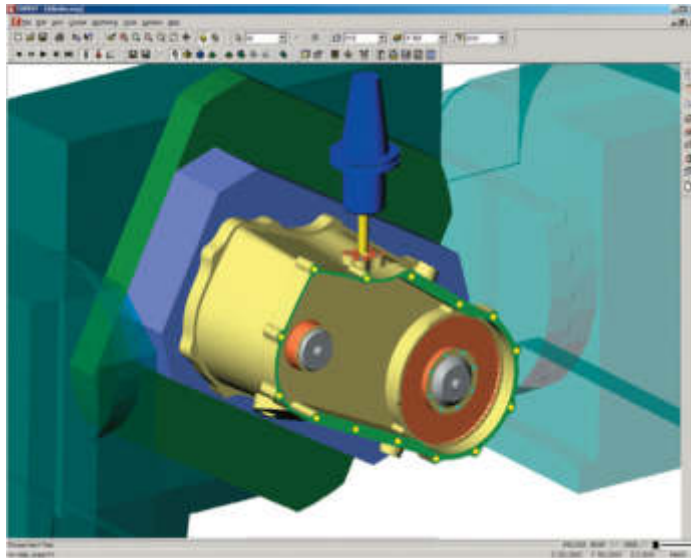


Рисунок 3.8 – Обробка отворів

Призначені для користувача цикли обробки.

При необхідності самостійного управління будь-якими переміщеннями ріжучого інструменту в ESPRIT застосовуються спеціальні пользоницького цикли. За допомогою функції вставки можна редагувати па-параметром для користувача циклу в будь-якій точці різання і вставляти в керуючу програму додаткові команди і G-коди. Можливості ESPRIT дозволяють призупинити процес обробки і відвести ріжучий інструмент від деталі, провести його перевірку, повернути у вихідну позицію, здійснювати редагування траєкторії інструменту, використовуючи відповідний редактор.

SolidMill Traditional - САМ-модуль для 2,5-осьового фрезерування:

- Фрезерування площин - обробка стандартних і нестандартних профілів з заглибленнями, виступами або без них, застосовуючи попутне, зустрічне або зигзагообразное фрезерування.
- Фрезерування кишень - обробка стандартних і нестандартних профілів з необмеженою кількістю заглиблень і виступів, використані різні методи обробки.
- Контурне фрезерування - застосовується для чорнової обробки профілів, пазів, напівчистового і чистового фрезерування прямих і похилих стінок з постійними або змінними глибинами різання.
- Доопрацювання що залишився - автоматична обробка місць, де залишився невидалений матеріал.
- Обробка отворів - свердління, розточування, нарізування різьблення мітчиком і ще тринадцять додаткових циклів поетапної обробки отворів.
- Спиральна обробка - обробка циліндричних кишень і наскрізних отворів по концентричних колах всередину або назовні, по правильній спіралі або дотичній дузі.
- Фрезерування різьблення - цикли фрезерування внутрішньої і зовнішньої, правої та лівої різьби.

- Фрезерування по каркасних моделям - тривимірне фрезерування, при якому в якості керованих і базових кривих різання використовуються контур площин і поверхонь.
  - Фрезерування в ручному режимі - обробка від заданої точки та за обра-ною вручну геометрії.
  - Користувальницькі цикли - створення спеціальних керуючих ко-манд, посилань і вбудованих G-кодів.
  - Функція Зупинка - призупиняє процес обробки і відводить ріжучий ін-струмент від деталі для його перевірки.
  - Функція Вставка - дозволяє змінювати параметри обробки влюбій точці циклу.
  - Бібліотека стандартних інструментів. Включає в себе фрези: циліндриче-скіе, сферичні, конічні, із закругленою і прямий фаскою на торці.
  - Можливість створення бібліотеки спеціальних інструментів і оправок з будь геометрією.
- SolidMill Production - САМ-модуль для 4- і 5-осьовий індексного обра-лення і фрезерування на діаметрі.
- Індексний обробка з використанням 4-й і / або 5-й осі і циклів звичайного фрезерування, пропонованих в модулі SolidMill Traditional.
  - 4-осьовий фрезерування на діаметрі, включаючи фрезерування карма-нів, контурне фрезерування і свердління.
  - Фрезерування на горизонтальних (НМС) і вертикальних (VMC) обється центрах з поворотними осями:
    - підтримка будь-яких комбінацій осей обробки;
    - підтримка поворотних головок і столів.

### 3.3 Порівняння САМ-систем FeatureCAM та ESPRIT

САМ-системи призначені для проектування обробки виробів на верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПУ) і видачі про-грам для цих верстатів. САМ-системи ще називають системами технологи-чеський підготовки вироб-ництва. В даний час вони є практично єдиним способом для виготовлення скла-днопрофільних деталей і скорочення циклу їх виробництва.

Компанії Autodesk і DP TECHNOLOGY відносяться до САПР середнього рівня.

Autodesk і DP TECHNOLOGY для геометричного моделювання викорис-товують комерційне ядро Parasolid фірми Unigraphics Solutions, підтримуване компанією Siemens PLM Software. Parasol-id є базовою платформою геометрич-ного моделювання для багатьох провідних світових САПР.

DP TECHNOLOGY, в свою чергу, використовує ядро MachineWorks компа-нии

MachineWorks Ltd для симуляції складної обробки, визначення потовк-Новен і моделювання верстата. Ядро MachineWorks є найшвидшим і точним на ринку, пропонуючи чудову симуляцію і аналіз траєкторій.

Обидві системи русифіковані.

Серед безлічі САМ-систем різних компаній в усьому світі, компанія Autodesk займає 5,0% частки від загального ринку систем автоматизованій підготовки виробництва, а компанія DT Technology - 2,1%.

### 3.4 Вартість ліцензій систем

Всі пакети Autodesk є модульними, тому вартість сильно залежить від вибірки модулів. PowerMILL для трьохкоординатної обробки коштує орієнтовно 12000 \$. Для п'ятикоординатної безперервної обробки вартість зростає до 24000 \$. Окрему вартість складляють модулі обробки моноколеса, каналів, спецстратегія Vortex і техно-логія Machine DNA, модуль програмування промислових роботів. Система FeatureCAM також модульна. Вартість комплексу Токарно-фрезерної обробки (багатоканальна обробка, субшпіндель, осі В і Y) + трьохкоординатної фрезерної обробки становить близько 20000 \$. Для п'ятикоординатної фрезерної обробки вартість також зростає - до 30000 \$.

Вартість ліцензійної САМ / САМ системи ESPRIT за комплект складають:

- Комплект "Токарна обробка" - 4000 \$.
- Комплект "Фрезерна обробка" - 5000 \$.
- Комплект "Токарно-фрезерна обробка з синхронізацією" - 13000 \$.
- Комплект "Фрезерна 3D обробка +" - 14000 \$.
- Комплект "Електроерозійна 3D обробка" - 5500 \$.
- Комплект "Багатоосьова 3D обробка +" - 20000 \$.

### 3.5 Особливості ESPRIT SolidMILL

Програмний комплекс ESPRIT оснащений прямим інтерфейсом до САМ-систем (рис. 4.1). Це означає, що комплексом можлива обробка будь-якої САМ-моделі, в тому числі імпортованої з будь-якої іншої сукупності САМ-систем. Програмний інтерфейс ESPRIT імпортує і зберігає моделі прямо в вихідному форматі, і для подальшої обробки не потрібні ніяких змін або відновлення геометрії моделі. ESPRIT дає можливість роботи з будь-якою геометрією моделі. ESPRIT підтримує формати ACIS (розширення SAT), AutoCAD (розширення файлу DWG), Autodesk Inventor, CATIA V4 і V5, CSV, DXF, IGES, Mechanical Desktop, Parasolid (розширення X\_B і X\_T), Pro / ENGINEER, Solid Edge, SolidWorks, STEP, STL, TXT, Unigraphics, VDA-FS.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

... яка дозволяє створювати високопродуктивні програми для верстатів з різними керуючими ЧПУ, котрі повноцінно використовують всі можливості конкретного верстата. Пост-процесори поставляються в якості безкоштовного доповнення до купуватися-му програмному комплексу ESPRIT, а відкритість їх архітектури дозволяє легко застосувати постпроцесор під будь-які потреби клієнта, навіть в собдарських програмних розробках.

Можливості тривимірної візуалізації та симуляції дозволяють про-вірити програму і модель до запуску верстата (рис. 4.2). Візуалізація в реальному часі в ESPRIT дуже реалістична і точна, а після неї можна бути впевненим в аналогічній обробці і самої деталі, причому будь-якої складності. Під час візуалізації обробки на екрані можна побачити всі рухомі елементи верстата з ЧПУ - револьверні головки, шпинделі, інструментальну головку і оснащення (рис. 4.3). Симуляція в ESPRIT забезпечує коректну перевірку на зіткнення під час одночасної передачі і обробки деталі між шпинделем і противошпинделем. Швидкість і точність комп'ютерної симуляції обробки дозволяє обійтись без дорогих неодружених запусків верстатів з ЧПУ. Перевірка дає можливість переконатися в правильності роботи програми шляхом порівняння моделі деталі і результату запуску програми. Навіть найскладніші деталі виробляються практично з першого запуску завдяки точному механізму визначення зіткнень в реальному режимі часу симуляції.



Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.



Рисунок 4.3 – Симуляція обробки (нарізання різьби) в SolidMILL

База знань ESPRIT дозволяє будь-якому програмісту або оператору одним натисканням кнопки вибрати найбільш підходящий метод обробки, виходячи з особливостей деталі. При цьому автоматично пропонується оптимальний процес обробки, ріжучий інструмент та режими різання. Звільняючи від рутинних операцій, база знань дає програмістам ЧПУ можливість зосередитися на вдосконаленні процесів обробки.

Недоліками ESPRIT є можливі проблеми з передачею файлів 3D моделі деталі - передається «порожній файл».

При використанні кульової фрези в стратегії «Фрезерування контуру» відбувається зміщення траєкторії в тіло деталі. Така поведінка фрези було

задумано розробниками програми. Якщо таке відбувається в ESPRIT 2011, то щоб уникнути врзів траєкторії, потрібно використовувати або велику глибину різання, або рівні кутовому радіусу фрези. У ESPRIT 2012 Таку поведінку фрези можна відключити в параметрах операцій.

### 3.6 Особливості Autodesk FeatureCAM

Пакет FeatureCAM є автономною (яка не є частиною CAD / CAM системи) CAM-системою середнього рівня, з високим ступенем автоматизації розрахунку керуючих програм, підготовки подай-котельної документації.

FeatureCAM володіє засобами 2,5D обробки, найбагатшим арсену-лом інструментів 3D обробки і сильними засобами для написання п'ятикоординатних програм. Підтримує велику кількість типів інструмента (в тому числі і довільної форми). Має велику гнучкістю і тому зазвичай рекомендується для інструментального виробництва та обробки виробів складної геометрії, тому як деталі

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

### Рисунок 4.4 – Вікно програми Autodesk FeatureCAM

Застосування модуля для підготовки керуючих програм в найскладніших поєднаннях поверхонь у оброблюваних виробів підтвердило заявлену фірмою «обробку без підрізів». Відстеження форми по-поверхні для інструменту

заданої геометрії, що відповідає перед-перегляду в системі, виявилось бездоганним. Спектр задаються параметрів інструменту широкий і забезпечує всі основні потреби інструментальні виробництва.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Рисунок 4.5 – Траекторія обробки чорнового фрезерування (виборка зміщенням 3D модель) в FeatureCAM

Високої наочністю відрізняються зображення результату обробки модулем візуалізації ViewMILL (рис. 4.6). Надзвичайно важливою з точки зору обробки кутів у виробках є наявність так званої «карандашної» обробки – доборка в кутах фрезами ряду типорозмірів. Іс-ключітельно ефективним є апарат оптимізації керуючих програм з умови мінімізації часу обробки складної поверхні.

Поряд з видатними достоїнствами модуля FeatureCAM, був відзначений і ряд недоліків, що знижують ефективність його використання. Однак більша їх частина при застосуванні в комплексній системі спільно з САПР високого рівня і іншими конструкторськими і технологічними системами стає несуттєвою.

Відсутність в модулі FeatureCAM власного геометричного дизайнера при побудові технологічних та інших обмежень у вигляді поверхонь і складних координів ускладнює роботу, вимагаючи переходу в зовнішні системи, що незручно.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

числювальна техніка, придатна для експлуатації модуля FeatureCAM, як і раніше залишається дорогою для використання рядовими технологами-програмістами.

### 3.7 Висновки щодо застосування САМ-систем для механічної обробки корпусних деталей

У програмного комплексу ESPRIT є багато унікальних можностей, яких немає в іншого ПО подібного призначення, включаючи і Autodesk FeatureCAM. Це і динамічна верифікація, і набір розробника для самостійного розширення функціональності комплексу, і набір готових рішень для роботи з багатозадачними фрезерно-токарськими верстатами. Наявність високопродуктивних технологій і суміщення (сертифікована відомими виробниками верстатів) практично з усіма існуючими верстатами з ЧПУ роблять цей про-програмний комплекс одним з кращих в своєму класі. Механізм адаптивної підстроювання дає можливість автоматично багаторазово використовувати створену програму обробки, якщо геометрія деталі змінюється лише незначно, взагалі без ручного зміни програми. При великих обсягах роботи це істотно заощаджує час.

Відкритий програмний інтерфейс ПО ESPRIT дозволяє як завгодно налаштовувати і модифікувати під свої потреби базовий функціонал, а також

інтегрувати комплекс з іншим використовується на виробництві програмним забезпеченням. Готові рішення і програми обробки виконують величезну базу знань, яка є у вільному доступі і дозволяє використовувати новітні апаратні можливості верстатів. Також по-подібній набір готових модулів значно спрощує введення в курс справи нових фахівців і працівників.

ПО ESPRIT буде зрозумілим і для користувачів, звичних до широко розповсюдженим в Україні CAD-систем - в системі використовується звичний Windows інтерфейс з гнучкими можливостями настройки. По-цьому навчання співробітників роботі з ESPRIT і впровадження ПО на прийнятті займає небагато часу, не більше двох тижнів. Навіть базовий функціонал комплексу охоплює майже всі можливі виробничі потреби - він включає процедури контурного і поздовжнього точіння, свердління та іншої обробки отворів, чорнового точіння, обробки канавок, від-різання, передачі деталі, бібліотеки стандартних пластин, державок, і багато інше. За допомогою ПО ESPRIT можна програмувати будь-який вузол верстата і повністю керувати ним, є можливість управління інструментами будь-якої конфігурації і геометрії.

В цілому з досвіду роботи з двома системами слід зазначити, що FeatureCAM є високоефективним засобом підготовки керуючих програм найвищої складності. Його включення до складу програмного забезпечення інструментального виробництва дозволяє підвищить складність деталей, оброблюваних на верстатах з ЧПУ, істотно скоротити час підготовки керуючих програм, збільшити ефектність використання верстатного парку. Перевагами системи FeatureCAM є: просунуті CAD / CAM рішення для багатовісної обробки, емуляція процесу обробки ViewMILL, гнучкі стратегії чорновий і чистові траєкторії, підготовка керуючих програм найвищої складності, можливість обробки деталей розміром менше 1 см (мікрообробка). Основною перевагою 5-координатної обробки є можливість зменшення витрат часу шляхом обробки складних форм за допомогою одних початкових установок.

Однак основними і найбільш вагомими перевагами ESPRIT для трьохкоординатної обробки є:

- 1) програмування фрезерної, токарної, електроерозійної і токарно-фрезерної обробки.
- 2) можливість спостереження відпрацювання програми безпосередньо на верстаті (режим верифікації) для запобігання зіткнень вузлів верстата з деталлю;
- 3) симуляція робочих органів верстата і базування деталі;
- 4) перевірка програми з використанням всієї верстатної системи;
- 5) база знань ESPRIT KnowledgeBase і вільний доступ до неї;
- 6) вартість ліцензій системи ESPRIT за окремо взятий комплект менше на 20-40%, ніж вартість ліцензій системи Autodesk;
- 7) економія часу на розробку проекту становить близько 20%.

З огляду на зростання попиту на систему ESPRIT в останні роки, можна зробити висновок, що для механічної обробки корпусних деталей доцільніше використовувати саме цю систему - як більш наочну і менш витратну САМ-систему.

## Розділ 4

### Автоматизована технологія обробки деталі «Корпус»

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

9 10 11	3 отвори Ø16, Ø22	H12	+0,18 +0,21	R <sub>a</sub> 6,3	Зенкування
14 15	2 отвори Ø5	H14	+0,3	R <sub>a</sub> 12,5	Свердління
16 21	2 отвори Ø70	H10	+0,12	R <sub>a</sub> 3,2	Чистове розто- чування
17 22	2 фаски 3x45°	-	-	R <sub>a</sub> 3,2	Чистове розто- чування
18 23	2 фаски 5x150	-	-	R <sub>a</sub> 3,2	Чистове розто- чування
19 24	2 отвори Ø60	H8	+0,046	R <sub>a</sub> 1,25	Полірування
20 25	2 отвори Ø50	H14	+0,62	R <sub>a</sub> 12,5	Чернове розто- чування

Конфігурація деталі дозволяє в якості заготовки використовувати вилівок в металеві форми  
або вилівок в піщано-глинисті форми

Розглянемо характеристики отримання заготовки

1) вилівок в металеві форми

Погляньмо на цей спосіб для механізованого серійного виробництва.

Технологічний процес лиття: лиття під тиском в металеві форми;

Клас розмірної точності вилівка 8т;

Ступінь викривлення елементів вилівки 4;

Ступінь точності поверхонь вилівка 9;

Шорсткість поверхонь вилівки Ra 12,5;

Клас точності маси вилівка 5т;

Ряд припусків на обробку вилівка 5;

Позначення точності вилівки 8т-4-9-5т

Таблиця 5.2 - Припуски і допуски, призначені на поверхні деталі для відливання в оболонкові форми

№ п/п	Розмір деталі (мм)	Допуск на розмір (мм)	Шорсткість R <sub>a</sub> , (мкм)	Припуск на сторону (мм)	Допуск на розмір (мм)	Розмір заготовки (мм)
1	2	3	4	5	6	7
1	220h14	-1,15	12,5	3x2	+1 -0,5	226
2	120h14	-0,87	12,5	3x2	+1 -0,5	126
3	240h14	-1,15	12,5	3x2	+1 -0,5	246
4	∅70H1 0	+0,12	3,2	3,5x2	+0,5 -1	∅63
5	∅60H8	+0,046	1,25	4x2	+0,5 -1	∅52
6	∅50H1 4	+0,62	12,5	3x2	+0,5 -1	∅44

$M_{отлм} = 46,9$ кг.

$M_d$  - маса деталі, = 40 кг.

Коефіцієнт використання матеріалу КИМ =  $M_d/M_{отлм}$

$KBM = 40/46,9 = 0,85$

При проектуванні маршруту обробки визначається послідовність обробки всіх поверхонь деталі, не вирішуючи питань про способах і засобах обробки. Порядок механічної обробки окремих поверхонь залежить від необхідної точності, розмірних зв'язків між ними і обраної схеми базування. При цьому процес

поділяється на чорнову і чистову обробку, що викликано технічними вимогами забезпечення точності розмірів, відносного положення і якості по-поверхонь деталі.

Кожна проектована технологічна операція повинна вирішувати конструкторську задачу: видалити найбільший шар металу з оброблюваної поверхні (чорнова обробка) або отримати більш точні розміри і взаємне розташування поверхонь (Чистова обробка), або домогтися високої точності і якості оброблюваної поверхні (обробна обробка).

Таблиця 5.2 План обробки найбільш точних поверхонь

Поверхня	Вид обробки	Розмір після обробки
----------	-------------	----------------------

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

	зенкування	Ø22H12
--	------------	--------

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

## Вибір схеми базування та опис роботи пристосування

Аналізуючи технічне завдання, ескіз деталі під виконувану операцію з

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Рис.1.2 - Загальний вигляд пристосування

Заготівля встановлюється на площину столу поз.2, базується в координатних кут. Стіл закріплений і заштіфтований на плиті поз. 1. На столі розміщені кронштейни поз.3 і пневмоциліндри поз.4. Закріплення заготовки проводиться рухом штоків пневмоциліндрів за допомогою ри-Чагів поз.5.

Пристосування базується на столі розточувального верстата за допомогою квадратних шпонок в шпонкові пази столу верстата і закріплюється кріпючими елементами.

### Технічне завдання

Спроекувати установчо-затискні пристрої для деталі корпусу для операції Сверільні-фрезерно-розточна в умовах серійного виробництва;

Геометричні параметри:

довжина x ширина x висота - 1430x890x435

- точність виконуваної операції в мм:

1) Точіння поверхні діаметром 60H8, 70H10 (забезпечується схемою обробки і знімається припуском).

2) Міжцентрова відстань  $100 \pm 0,4$  (забезпечується точністю обробки верстата).

3) Відстань від базової поверхні  $60 \pm 0,3$  (забезпечується точністю обробки верстата і налаштування на розмір партії оброблюваних деталей).

4) Розміри А (див. Малюнок нижче) (забезпечуються точністю обробки верстата, попередньої виставки і вивірки - налаштування / обкатки на розмір партії оброблюваних деталей).

5) Відхилення від паралельності осей оброблюваних отворів не більше 0,2 мм (за IT14 / 2 при заданому діаметрі і довжині обробки) (забезпечувалась точністю обробки верстата і точністю виготовлення пристосування)

#### 4.2.2 Силовий розрахунок пристосування

1. Силовий розрахунок верстатних пристосувань можна розбити на наступні етапи:

- визначення сил та моментів різання.
- вибір коефіцієнта тертя  $f$  заготовки з опорними і затискними елементами.
- складання розрахункової схеми і вихідного рівняння для розрахунку зажимного зусилля  $P_z$ .
- розрахунок коефіцієнта надійності закріплення  $K$ .
- складання розрахункової схеми і вихідного рівняння для розрахунку вихідного зусилля  $P_i$ ,
- розрахунок діаметрів силових циліндрів пневмо- і гідроприводів.

2. Визначення сил і моментів різання

3. Визначимо сили різання при чорновому розточуванні, так як по сравнению з чистовим проходом сила різання буде максимальною. Сили різання будуть діяти уздовж трьох осей координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  і називаються відповідно  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ . Найбільшою з них є сила  $P_z$ , яка прагне оторвати заготовку від столу і осьова сила  $P_0$ , яка прагне зрушити заготовку. Тому подальший розрахунок ведемо по ним.

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot v^n \cdot K_p, \text{ (Н)}$$

де,  $C_p = 92$  – коефіцієнт;

$x, y, n$  - показник ступеню.  $x = 1.0$ ;  $y = 0.75$ ;  $n = 0$ ;

$K_p$  - поправочний коефіцієнт визначаємо по формулі:

$$K_p = K_{mp} \cdot K_{\alpha p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{\tau p}$$

де,  $K_{\alpha p}$  - коэффициент зависящий от главного угла в плане;  
 $K_{\gamma p}$  - коэффициент зависящий от переднего угла;  
 $K_{\lambda p}$  - коэффициент зависящий от заднего угла;  
 $K_{\tau p}$  - коэффициент зависящий от радиуса на вершине резца;  
 $K_{mp}$  - коэффициент зависящий от материала заготовки, определяется как:

$$K_{mp} = (\sigma_b/750)^n$$

где  $n=1$  – показатель степени.

Подставляя известные величины в формулу, получим:

$$K_{mp} = (980/750)^1 = 0.81.$$

По табл. выбираем:  $K_{\alpha p} = 0.98$  ;  $K_{\gamma p} = 1.15$  ;  $K_{\lambda p} = 1.0$  ;  $K_{\tau p} = 0.87$ .

Подставляя известные величины в формулу, получим:

$$K_p = 1 \cdot 0.98 \cdot 1.15 \cdot 1 \cdot 0.87 = 0.81.$$

Подставив все вычисленные значения в формулу, получаем:

$$P_z = 10 \cdot 92 \cdot 4^1 \cdot 0.2^{0.75} \cdot 83^0 \cdot 0.81 \approx 890 \text{ Н.}$$

$$P_o = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot v^n \cdot K_p, (\text{Н}) \quad (36)$$

где  $C_p = 15$  – коэффициент;

$x, y, n$  - показатели степени.  $x = 1.0$ ;  $y = 0.75$ ;  $n = 0$ ;

$K_p$  - поправочный коэффициент определяем по формуле:

$$K_p = K_{mp} \cdot K_{\alpha p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{\tau p} \quad (37)$$

де,  $K_{\alpha p}$  - коэффициент зависящий от главного угла в плане;

$K_{\gamma p}$  - коэффициент зависящий от переднего угла;

$K_{\lambda p}$  - коэффициент зависящий от заднего угла;

$K_{\tau p}$  - коэффициент зависящий от радиуса на вершине резца;

$K_{mp}$  - коэффициент зависящий от материала заготовки, определяется как:

$$K_{mp} = (\sigma_b/750)^n \quad (38)$$

где  $n=1$  – показатель степени.

Подставляя известные величины в формулу, получим:

$$K_{mp} = (980/750)^1 = 0.81.$$

По табл. выбираем:  $K_{\alpha p} = 0.98$  ;  $K_{\gamma p} = 1.15$  ;  $K_{\lambda p} = 1.0$  ;  $K_{\tau p} = 0.87$ .

Подставляя известные величины в формулу, получим:

$$K_p = 1 \cdot 0.98 \cdot 1.15 \cdot 1 \cdot 0.87 = 0.81.$$

Подставив все вычисленные значения в формулу, получаем:

$$P_o = 10 \cdot 92 \cdot 4^1 \cdot 0.2^{0.75} \cdot 83^0 \cdot 0.81 \approx 150 \text{ Н.}$$

1.

2. Рассчитаем эквивалентную силу  $P_{\Sigma}$ .

$$3. \quad P_{\Sigma} = \sqrt{P_z^2 + P_o^2} \quad (39)$$

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Знаходимо силу закріплення заготовки. Для цього складаємо рівняння сил і моментів.

Проекція сил на вісь X.

$$P_3 - F_{mp1} - F_{mp2} = 0 \quad (40)$$

где  $F_{тр1}$  и  $F_{тр2}$  – сили тертя, що виникають при затиску.

$$F_{mp1} = P_3 f_1 \quad (41)$$

$$F_{mp2} = N f_2 \quad (42)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – коефіцієнти тертя.

остаточно отримаємо

$$P_3 - P_3 f_1 - P_3 f_2 = 0$$

$$P_3 = \frac{P_0}{f_1 + f_2}$$

Введемо поняття коефіцієнта запасу.

Коефіцієнт запасу вводиться в формулу для забезпечення надійного закріплення заготовки і визначається в залежності від умов обробки за формулою:

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6, \quad (43)$$

где  $K_0$  – гарантированный коэффициент запаса принимаем равным 1,5;  
 $K_1$  – коэффициент, учитывающий возрастание сил обработки при затуплении инструмента принимаем равным 1,1;  
 $K_2$  – коэффициент, учитывающий неравномерность сил резания, обусловленную непостоянством снимаемого при обработке припуска принимаем равным 1,2;  
 $K_3$  – коэффициент, учитывающий изменение сил обработки при прерывистом резании принимаем равным 1,0;  
 $K_4$  – коэффициент, учитывающий непостоянство развиваемых приводом сил зажима, коэффициент принимаем равным 1,3;  
 $K_5$  – коэффициент, учитывающий неопределенность положения мест контакта заготовки с установочными элементами, принимаем равным 1,0.

Подставляя числовые значения в формулу, определяем коэффициент запаса:

$$K = 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 2,579$$

Принимаем коэффициент запаса  $K = 2.7$

Тогда формула примет вид

$$P_3 = \frac{P_э}{f_1 + f_2} K \quad (44)$$

$$P_3 = \frac{P_э}{f_1 + f_2} K = \frac{900}{0.15 + 0.15} \cdot 2.7 = 8100 \quad (H)$$

Складання розрахункової схеми і вихідного рівняння для розрахунку вихідного зусилля  $P_i$ .

Силкові механізми зазвичай виконують роль підсилювача. Його основний характеристики є коефіцієнт посилення і (передавальне відношення сил).

Поряд зі зміною величини вихідного зусилля силковий механізм може також змінювати його напрямок, розкласти на складові і сов-місцево з контактними елементами забезпечувати додаток затискного зусилля до заданої точки. Іноді силкові механізми виконують роль самогальмівного елемента, перешкоджаючи розкріпленню заготовки при раптовийном виході з ладу приводу.

Силкові механізми діляться на прості і комбіновані. Прості складаються з одного елементарного механізму - гвинтового, ексцентрикового, клинового, важільного. Комбіновані є комбінацію декількох простих: важільного і гвинтового, важільного і ексцентрикового, важільного і клинового і т.д.

Силкові механізми використовуються в пристроях з затискними пристроями як першої, так і другої груп. Для пристосувань з за-режимних пристроями першої групи силковий механізм слід вибрати спільно з приводом, щоб можна було раціонально узгодити сило-ші можливості механізму (коефіцієнт посилення і) з силковими даними приводу.

Вибір конструктивної схеми силового механізму проводиться також з урахуванням конкретних умов компонування пристосування.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

$l_2 = 100$  мм,

$P_3 = 2160$  Н.

$$P_u = \frac{100}{156} \cdot \frac{\cos 6^\circ}{\cos 14^\circ} \cdot \frac{1}{0.85} \cdot 8100 \approx 6232 \quad (\text{Н}).$$

Діаметр пневмоциліндра визначається за формулою

$$D = \sqrt{\frac{P_u}{\pi p \eta}} \quad (47)$$

где  $D$  – рабочий диаметр поршня, мм;

$p$  – давление рабочее в пневмосистеме, Па;

$\eta$  - КПД пневмоцилиндра;

$q$  – учитывается при наличии пружины возврата в системе.

Тогда получаем:

$$D = \sqrt{\frac{6232}{3.14 \cdot 0.63 \cdot 10^6 \cdot 0.85}} \approx 0.061 \quad (\text{м}).$$

По конструктивних міркувань приймаємо діаметр поршня 80мм, тим самим забезпечуємо додатковий запас по зусиллю притиснення заготовки.

#### 4.2.3 Розрахунок пристосування на міцність по слабкій ланці

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

Напряжения на смятие

$$\sigma = \frac{P}{d \cdot l} \leq [\sigma]$$

$$\sigma = \frac{P}{d \cdot l} = \frac{2 \cdot 2562}{0.014 \cdot 0.02} = 18.3(\text{МПа}) \leq [\sigma] = 320(\text{МПа})$$

где P - действующая сила на ось;

$\sigma$  - действующие напряжения на смятие;

$[\sigma]$  - допускаемые напряжения на смятие;

d - диаметр оси;

l - длина участка оси на которую действует сила.

За конструктивних міркувань приймаємо діаметр поршня 80мм, тим самим забезпечуємо додатковий запас по зусилля притиснення заготовки.

#### 4.2.3 Розрахунок пристосування на міцність по слабкій ланці

Міцність - одна з основних вимог, що пред'являються до деталей и пристосувань в цілому. Міцність деталей може розглядатися за коефіцієнтам запасу або за номінальними допускаються напруженого. Розрахунки за номінальними допускаються напруженого Менш Точні и про-прогресивного, но значний простіше.

За допомогою розрахунку деталей (елементів) пристосувань на міцність можна вирішувати два завдання:

а) перевірку на міцність Вже існуючих деталей з визначеними розмірами перерізів Шляхом порівняння Фактично напруженого (моментів, сил) з допустимими - перевірочній розрахунок;

б) визначення Розмірів перетинів деталей - Попередній проект-ний розрахунок.

Очевидно, що найбільш навантажена частина пристосування представляється вісь важеля, Проведемо перевірочній розрахунок на міцність осі  $\varnothing 14$  мм по напрузі, що допускається.

Таблиця 5.6

Параметр складової сумарної похибки	Позначення
Похибка верстата в навантаженому стані, що викликається похибками виготовлення та складання основних деталей і вузлів і їх зносом («технологічна точність обладнання»)	$\delta_c$
Похибка розташування пристосування на верстаті - розташування посадочних поверхонь пристосування щодо посадочних місць верстата	$\delta_{рп}$
Похибка розташування опорних поверхонь щодо посадочних місць пристосування	$\delta_{рп}$
Похибка базування вихідної бази заготовки в пристосуванні	$\delta_{биб}$
Похибка, що викликається закріпленням заготовки в пристосуванні	$\delta_z$
Похибка розташування напрямних елементів щодо опорних елементів	$\delta_{п.н.}$
Похибка інструменту, породжувана похибкою його виготовлення	$\delta_{и}$
Похибка розташування інструменту на верстаті	$\delta_{ри}$
Похибка, що виникає внаслідок деформації технологічної системи СНІД під впливом сил різання	$\delta_d$
Похибка, що викликається зносом інструменту	$\delta_{из}$

Виявимо складові похибки:

-  $\delta_c$  в даному випадку викликана непаралельністю робочої поверхні столу верстата напрямку переміщення шпинделя. Для розточувальних верстатів з габаритами робочої поверхні столу до 2500 мм і нормального класу точності, (Верстати розточні гори-зонтальним з хрестовим столом. Норми точності) непаралельність вказаних поверхонь на довжині ходу до 1250 мм допускається не більше 0,03 мм. Отже  $\delta_c = 0,03$ .

-  $\delta_{pn} = 0,15$ , так як расположение приспособления на столе станка влияет на точность получаемого размера;

- погрешность  $\delta_{п.о} = 0,02$  мм, потому что допуск параллельности установочных плоскостей составляет 0,01 на 100 мм длины, а длина обработки составляет 240 мм;

- погрешность  $\delta_z = 0$  (принята без расчёта);

- погрешность  $\delta_{п.н.} = 0,1$  мм;

- погрешность  $\delta_n$  и  $\delta_{pn}$  примем равными нулю, так как их влияние устраняется настройкой инструмента на размер;

- погрешность  $\delta_d = 0,01$  (принята без расчёта);

- погрешность  $\delta_{из} = 0,01$  – износ резца.

Підсумовування складових похибок розрахуємо за формулою:

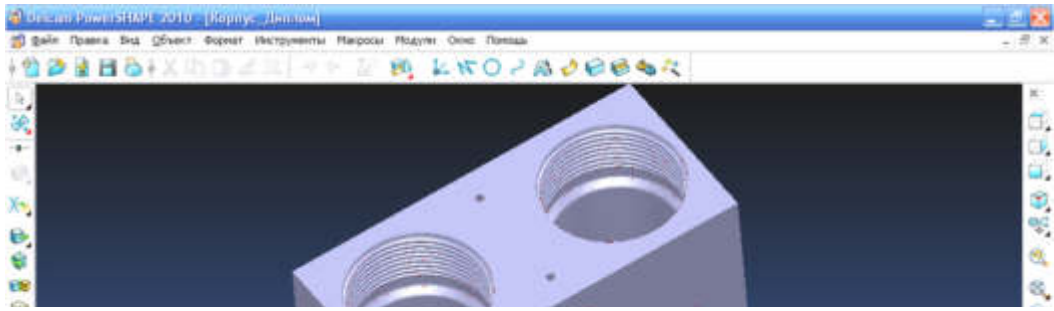
$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_c^2 + \delta_{б.и.б}^2 + \delta_{п.о}^2 + \delta_{п.н}^2 + \delta_d^2 + \delta_{из}^2} \quad (48)$$

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{0,03^2 + 0,15^2 + 0,02^2 + 0,1^2 + 0,01^2 + 0,01^2} = 0,086$$

Результуюча похибка 0,086 менше допуску 0,2 мм. Пристосування забезпечить необхідну точність.

### 5.3 Побудова 3D моделі деталі з використанням Autodesk Power SHAPE

За кресленнями і технічним завданням заводу виробника 3D модель деталі «Корпус» побудована в САД-системі Autodesk Power SHAPE (рис. 5.1)



Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.



Рисунок 5.2 – Фотореалістика в програмі Autodesk PowerSHAPE

#### 4.4 Проектування автоматизованої механічної обробки деталі в САМ-системах Autodesk PowerMILL і ESPRIT

У САМ-системі PowerMILL була спроектована механічна обробка деталі «Корпус» (рис. 5.3) згідно заводському маршруту обробки деталі.



Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

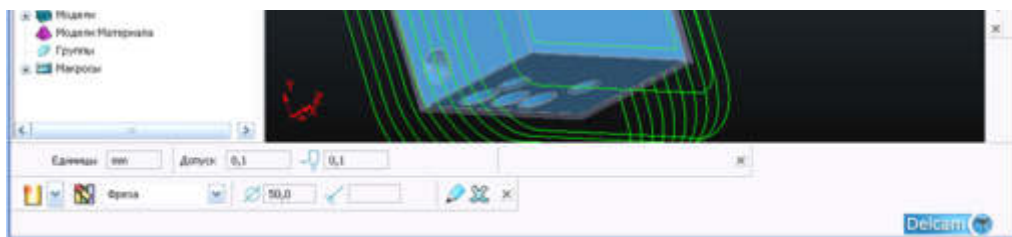
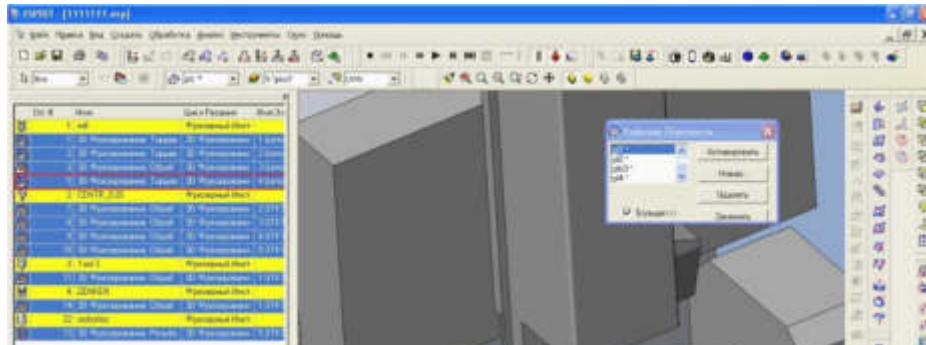


Рисунок 5.4 – Обробка деталі в PowerMILL

У САМ-системі ESPRIT була спроектована механічна обробка деталі «Корпус» (рис. 5.4). У базі даних системи ESPRIT підібраний відповідний верстат для механічної обробки деталі - Okuma MU-400VA (рис. 5.5). Багатофункціональні верстати цієї серії мають поворотний стіл і працюють по 5-ти координатах. Даний верстат дозволяє поєднувати в одному циклі токарні, фрезерні й свердильно-розточувальні операції.



Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 17.07.2023р.

рацію,



Рисунок 5.6 – Верстат Okuma MU-400VA

## ВИСНОВКИ

У роботі була розглянута модель комп'ютерно-інтегрованої підготовки виробництва деталі «Корпус», що виготовляється на Дніпропетровському агрегатному заводі.

Особливому вивченню було піддано комп'ютерне моделювання механічної обробки деталі «Корпус» на базі таких САМ-систем, як Autodesk FeatureCAM і ESPRIT.

Підвищення продуктивності проектно-конструкторських і технологічних робіт при створенні та запуску у виробництво нових виробів забезпечується САД / САМ системами. Ці програмні системи дозволяють конструктору і технологу вирішувати широке коло завдань із застосуванням методів комп'ютерного моделювання, автоматизованого формування конструкторської документації і керуючих програм для обробки деталей на верстатах з ЧПУ. При цьому різко скорочуються терміни проектування і підготовки виробництва, забезпечуються сучасні вимоги до дизайну і якості виробів, що. Але досягти цього можна лише при наскрізному проектуванні використання коштів САПР на всіх етапах життєвого циклу виробу, «від ідеї конструктора до металу».

У даній роботі наочно показані гідності однієї й іншої системи і рекомендована найкраща з них для трьохкоординатної обробки - ESPRIT. Перевагами ESPRIT над FeatureCAM є: програмування токарної, електроерозійної і токарно-фрезерної обробки; високопродуктивна симуляція в режимі реального часу; симуляція робочих органів верстата і базування деталі; перевірка програми із використанням користуванням всієї верстатної системи; база знань ESPRIT KnowledgeBase і вільний доступ до неї; вартість ліцензій ESPRIT на 20-40% менше, ніж PowerMILL; економія часу на розробку проекту близько 20%.

Таким чином, вирішено актуальне для ПАТ «Дніпропетровський агрегатний завод» виробнича задача.

У підсумку можна констатувати, що застосовуючи систему ESPRIT в рамках комп'ютерно-інтегрованої технологічної підготовки виробництва, можна домогтися значного скорочення часу на підготовку виробництва, підвищити якість виробів, що випускаються за рахунок виключення людських помилок і передачі ідей конструкторів на верстат з числовим програмним управлінням.

В результаті проведеної роботи можна зробити висновок, що приміня САД / САМ систем дозволить не тільки скоротити час на розробку проекту, а й засоби виробництва на створення пробної моделі. Все не-обхідні дослідження майбутньої конструкції можна провести засобами самої системи і отримати досить точний і об'єктивний результат. Те ж саме і з моделюванням обробки. За допомогою даних систем можна будувати обробку складних криволінійних поверхонь і проводити її повну перевірку без використання пробної деталі.

Такі системи вигідно застосовувати не тільки в серійному і масовому виробництві, а й у одиничному, де виробляють унікальні і дуже складні вироби.

Дану роботу можна віднести до розряду високих технологій, характеристик яких є: наукоємність, системність, математичне моделювання, комп'ютерна технологічне середовище і автоматизація всіх етапів проектування.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 8833:2019. Національний стандарт України виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=82147](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=82147).
2. ДСТУ 8981:2020 Виливки з металів та сплавів. Допуски розмірів, маси та припуски на механічне оброблення. ДСТУ (Державний Стандарт України).
3. Технічне креслення. Розробка робочих креслеників деталей за креслеником загального виду [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О.Г.Гетьман, Н.В. Білицька, Г.В. Баскова. – Електронні текстові дані (1 файл: 10,474Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 150 с.
4. Петраков Ю.В. Лабораторно-комп'ютерний практикум з теорії різання // Рекомендовано МОН України як навчальний посібник для вищих навчальних закладів (Лист МОН України №1.4/18-Г-212), Київ, Політехніка, 2006, 190с.
5. Гейчук, В. М. Функціональне проектування верстатів, роботів та машин в Autodesk Inventor. Частина I [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю «Галузеве машинобудування» / В. М. Гейчук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,39 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 394 с.
6. Технології формоутворення сучасних складнопрофільних деталей [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізацій «Технології виготовлення літальних апаратів», «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Петраков, С. В. Сохань, В. К. Фролов, В. М. Кореньков. – Електронні текстові дані (1 файл: 15,26 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 380 с.
7. David A. Stephenson, John S. Agapiou Metal Cutting Theory and Practice. Third Edition 2016 by Taylor & Francis Group, LLC 932p.
8. Найкращі рішення для обробки. Лінійка необертальних інструментів. Токарна обробка. Обробка канавок. Різьбонарізання. Відрізання. Метрична версія каталогу 2019. 08/2020 3395080. Member IMC Group ISCAR / [www.iscar.com.ua](http://www.iscar.com.ua).
9. Найкращі рішення для обробки. Фрезерування. Свердління. Інструментальна оснастка. Метрична версія каталогу 2020-2021. 10/2020 3395081. Member IMC Group ISCAR / [www.iscar.ua](http://www.iscar.ua)
10. Петраков Ю.В., Мацківський О.С. Моделювання фрезерування кінцевими фрезами. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування №1 (73). 2015.
11. Петраков Ю.В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПК: Монографія. – Київ, Січкара, 2011. – 220 с.
12. Дубовой В.М. Моделювання та оптимізація системи: підручник / Дубовой В.М., Кветний Р.Н., Михальов О.І., Усова А.В. – Вінниця: ПП «ТД Едельвейс», 2017. – 804с.
13. Васильченко Я.В. Математичне моделювання процесів різання та різальних інструментів. Практикум. ДДМА, Краматорськ, 2019. – 249с