

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»



Пархоменко А.В., Притула А.В., Кришук В.М.

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ
ЗАСОБІВ В СЕРЕДОВИЩАХ CREO ТА ALTIUM DESIGNER**

Навчальний посібник

Видання 3-тє, уточнене

Житомир
Видавець О. О. Євенок
2020

УДК 004.896
ББК 30.2-2
П18

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються
за напрямом підготовки «Комп'ютерні науки» (лист № 1/11-11845 від 22.07.2013)*

Рецензенти:

Петров Е.Г., д.т.н., професор, академік Міжнародної академії інформатизації, завідувач кафедри системотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки;

Тарасов О.Ф., д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерних інформаційних технологій Донбаської державної машинобудівної академії;

Теслюк В.М., д.т.н., професор кафедри систем автоматизованого проектування Національного університету «Львівська політехніка».

Пархоменко А. В., Питула А. В., Крищук В. М.

П18 Автоматизоване проектування електронних засобів в середовищах CREO та ALTIUM DESIGNER: навчальний посібник. – вид.3-тє, уточн. – Житомир: Вид. О. О. Євенок, 2020. – 252 с.

ISBN 978-966-995-192-2

Розглянуто особливості програмної підтримки процесу системного інженерного проектування електронних засобів. Викладено основні принципи організації сучасних CAD/CAM/CAE – систем. Наведено практичний приклад створення та дослідження віртуального прототипу контрольно-вимірювального пристрою в середовищах Creo та Altium Designer. Посібник призначений для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями галузей знань 12 «Інформаційні технології», 17 «Електроніка та телекомунікації» та 15 «Автоматизація та приладобудування», а також може використовуватись інженерами, аспірантами і студентами інших спеціальностей для отримання знань та практичного досвіду роботи з системами автоматизованого проектування.

Видання здійснено за підтримки міжнародного освітнього проекту «Innovative Multidisciplinary Curriculum in Artificial Implants for Bio-Engineering BSc/MSc Degrees» (BIOART, реєстр. номер 586114-EPP-1-2017-1-ES-EPPKA2-CBHE-JP) програми Erasmus+ Європейського Союзу. Зміст матеріалу відображає думку авторів. Європейська комісія не несе відповідальності за використання інформації, що міститься у виданні.

**УДК 004.896
ББК 30.2-2**

ISBN 978-966-995-192-2

© ЗНТУ 2013, 2016

© НУЗП 2020

© Видавець О. О. Євенок, видання, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ПРОГРАМНА ПІДТРИМКА ПРОЦЕСУ СИСТЕМНОГО ІНЖЕНЕРНОГО ПРОЄКТУВАННЯ.....	9
1.1 Задачі та проблеми застосування програмних інструментів для реалізації етапів ЖЦВ.....	9
1.2 Інтеграція етапів життєвого циклу створення виробів .	11
1.3 Технології віртуальної інженерії.....	15
1.4 Хмарне проєктування	18
1.5 Практичні завдання.....	21
1.6 Тестові контрольні запитання.....	21
1.7 Література до розділу	24
2 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ CAD/CAM/CAE - СИСТЕМ	25
2.1 Категорії систем автоматизованого проєктування	25
2.2 Параметричне моделювання в САПР	26
2.3 Відкритість САПР	28
2.4 Методи та формати обміну даними	30
2.5 Тенденції розвитку сучасних CAD/CAM/CAE-систем .	36
2.6 Практичні завдання.....	38
2.7 Тестові контрольні запитання.....	38
2.8 Література до розділу	40
3 СИСТЕМИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	41
3.1 Різновиди систем геометричного моделювання	41
3.2 Функції роботи з об'ємними формами в системах	44
твердотільного моделювання.....	44
3.3 Структури даних в системах твердотільного моделювання	46
3.4 Розрахунок базових інженерних параметрів.....	50

3.5 Практичні завдання	51
3.6 Тестові контрольні запитання	51
3.7 Література до розділу	53
4 АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА	54
4.1 Інтеграція САD та САМ - систем.....	54
4.2 Особливості організації САМ-систем	57
4.3 Числове програмне управління	58
4.4 Ручне складання програм обробки деталей	61
4.5 Розробка програм на мові АРТ	63
4.6 Генерація програми обробки на базі даних САD-систем	64
4.7 Практичні завдання	65
4.8 Тестові контрольні запитання	66
4.9 Література до розділу	68
5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНЖЕНЕРНОГО АНАЛІЗУ ТА РОЗРАХУНКІВ.....	69
5.1 Основні тенденції розвитку САЕ-систем	69
5.2 Огляд відомих FEA-пакетів	72
5.3 Використання пакету Mathcad для інженерних розрахунків	75
5.4 Практичні завдання	76
5.5 Тестові контрольні запитання	77
5.6 Література до розділу	79
6 ПРОЄКТНИЙ ПРАКТИКУМ. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПУ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ В СЕРЕДОВИЩАХ CREO ТА ALTIUM DESIGNER	80
6.1 Особливості організації процесу автоматизованого проектування електронних засобів	80
6.2 Структура та функціональні можливості системи Creo	85

6.2.1 Creo Layout.....	89
6.2.2 Creo Sketch	89
6.2.3 Creo Direct	90
6.2.4 Creo Parametric.....	91
6.2.5 Creo Simulate.....	91
6.2.6 Creo Schematics.....	92
6.2.7 Creo Illustrate.....	92
6.2.8 Creo View MCAD	93
6.2.9 Creo View ECAD.....	94
6.2.10 Модулі Creo Parametric	95
6.3 Структура та функціональні можливості системи ALTIUM DESIGNER.....	97
6.3.1 Програмна платформа Design Explorer	98
6.3.2 Редактори системи Altium Designer.....	101
6.4 Проектування контрольно-вимірювального приладу в середовищах CREO та ALTIUM DESIGNER.....	106
6.4.1 Аналіз особливостей конструкції	106
6.4.3 Приклад побудови плоского кресленника	147
6.4.4 Приклад створення динамічного складня.....	156
6.4.5 Моделювання роботи складня	165
6.4.6 Структурний аналіз у середовищі Creo.....	182
6.4.7 Дослідження FEA-сітки та AutoGEM.....	197
6.4.8 Проектування та аналіз друкованої плати в середовищах Altium Designer та Creo.....	199
6.5 Розробка математичного забезпечення аналізу паразитних параметрів конструктивів електронних засобів.....	207
6.5.1 Обґрунтування необхідності аналізу паразитних зв'язків у конструктивах ЕЗ на ранніх етапах проектування	207
6.5.2 Моделювання паразитних ємнісних зв'язків	208
6.5.3 Моделювання паразитних індуктивних зв'язків... ..	214

6.5.4 Розробка методики урахування впливу паразитних ємнісних та індуктивних параметрів на функціонування електронного виробу	217
6.6 Розробка комплексних фізико-топологічних моделей елементної бази електронних засобів і методики ідентифікації їх параметрів	221
6.6.1 Вибір і обґрунтування виду вихідної математичної моделі взаємопов'язаних фізичних процесів	221
6.6.2 Розробка узагальненого алгоритму методики створення КФТМ елементної бази ЕЗ	223
6.6.3 Розробка КФТМ елементної бази ЕЗ	225
6.6.4 Розробка методик визначення параметрів моделей елементної бази ЕЗ.....	228
6.6.5. Застосування інтервального аналізу для розрахунку допускових значень параметрів моделей	236
6.7 Студентський інтегрований курсовий проект в середовищах Creo та Altium Designer	238
6.8 Література до розділу	239
ЛІТЕРАТУРА.....	240
АЛФАВІТНО-ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	245

ВСТУП

На думку провідних світових аналітиків, основними факторами успіху в сучасному промисловому виробництві є: скорочення терміну виходу продукції на ринок, зниження її собівартості та підвищення якості. До числа найбільш ефективних інструментів, що дозволяють виконати ці вимоги, належать системи автоматизованого проєктування (САПР).

Технологія САПР, що починалася з електронної креслярської дошки, дуже розвинулась та включає сьогодні безліч напрямків: системи автоматизованого проєктування механічного обладнання (MCAD), електронних засобів (ECAD), інженерного аналізу (CAE), підготовки виробництва (CAM), застосунки для публікації технічної інформації, візуалізації, сервісного обслуговування та, нарешті, системи керування інженерними даними (PDM) і життєвим циклом виробу (PLM).

Сьогодні важко собі уявити виробничу компанію, яка не використовує САПР для розробки нових видів продукції. Автоматизоване проєктування, тобто широке використання засобів обчислювальної техніки для виконання проєктних операцій та процедур, є єдиною на цей час прийнятною альтернативою, що дозволяє забезпечити принципову можливість проєктування нових суперскладних об'єктів та систем.

САПР вже не є чимось новим і незрозумілим, і, тим не менш, рівень володіння функціоналом САПР у різних фахівців, що працюють в одній компанії, може різнитися. Конструктор, що працює з системою, зазвичай, використовує відомий йому і вже добре вивчений функціонал. З одного боку, це добре, і в той же час обмежує можливості фахівця - адже частина функцій залишається не використаною. В результаті досягти максимальної ефективності в роботі САПР деколи не вдається, і час виконання проєктів виявляється не оптимальним. Виходом з такого становища може стати програма оптимізації застосування системи проєктування, яка передбачає приведення знань, процесів і технологій, що використовуються на підприємстві, до єдиного знаменника. Програма передбачає комплексний підхід до оптимізації використання САПР на підприємстві, включаючи персонал, процеси та технології. Такий підхід дозволяє підвищити рівень індивідуальної та колективної продуктивності конструкторів, допомогти розробити найбільш оптимальні методики проєктування на підприємстві. Підприємство

на разі отримує кваліфіковану та скоординовану команду фахівців та ефективну методику проектування. Всі ці чинники ведуть до зростання продуктивності, скорочення термінів виконання проєктів та підвищенню якості їх виконання. І звичайно, все це дозволяє добитися головної для кожного керівника мети - зниження витрат на виконання проєкту.

Розробка внутрішньої методології проектування із застосуванням інструментів САПР, яка була б адаптована під специфічні завдання підприємства, вимагає як знання певної предметної області, так і високого рівня володіння САПР. Для створення нових та використання існуючих систем автоматизації проектування необхідні фахівці відповідної кваліфікації.

Знання математичного апарату, що використовується в інженерних дослідженнях, вміння розробляти математичні моделі, методи та алгоритми для оптимального проектування реальних об'єктів і систем, знання сучасних програмних засобів САПР та вміння користуватися ними в якості інструмента дослідника та проєктувальника дозволять сучасним інженерам ставити і успішно розв'язувати задачі автоматизації проектування в різних галузях техніки.

У зв'язку з цим, вивчення матеріалу даного посібника несумнівно буде сприяти підвищенню рівня фахівців за напрямом підготовки "Комп'ютерні науки", використанню ними у майбутній діяльності сучасних програмних інструментів та технологій розробки складних виробів.

1 ПРОГРАМНА ПІДТРИМКА ПРОЦЕСУ СИСТЕМНОГО ІНЖЕНЕРНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

1.1 Задачі та проблеми застосування програмних інструментів для реалізації етапів ЖЦВ

Ключовим поняттям системного інженерного проектування є *Життєвий Цикл Виробу* (ЖЦВ). Життєвий цикл промислових виробів складається з низки етапів, розпочинаючи з появи ідеї нового продукту до утилізації по закінченню терміну його експлуатації. Існує безліч програмних інструментів, що відповідають завданням, які виникають на кожному етапі [20].

Створення концепції майбутнього виробу - найважливіший і найскладніший етап, на якому здійснюється перехід від усвідомлення або відкриття потреби в деякому продукті до його концептуальної моделі. Існують різноманітні мови і системи моделювання, придатні в залежності від характеру розроблюваної системи до застосування на даному етапі. Крім того, необхідні засоби аналізу ринків та споживчих аудиторій, збору та каталогізації інформації та легальної технічної розвідки, системи правової та патентної підтримки і т. п. Проблема полягає у відсутності універсальних систем моделювання, а також недостатній увазі, яка зазвичай приділяється цьому етапу.

Наступний етап ЖЦВ - оцінка реалізованості концептуального проєкту, коли відшукуються безлічі конкуруючих доступних реалізацій потенційно необхідних вузлів та агрегатів, будуються та оптимізуються можливі моделі виробничих процесів і логістики. На цьому етапі оцінюється не просто можливість реалізації майбутнього виробу, але і всі ризики, з якими пов'язаний проєктний процес. Відомий у західній практиці процес *Feasibility Assessment* (оцінка здійсненності), є обов'язковою складовою початкової стадії всіх проєктів і повинен проводитися на основі аналізу економічної, технічної, технологічної та соціальної доцільності нового рішення. Такий комплексний аналіз є досить складним, вимагає високої кваліфікації фахівців і використання спеціальних програмних інструментів.

Третій етап –галузь CAD/CAM/CAE, для якої розроблені та активно використовуються численні системи автоматизованого проектування, інженерного аналізу, моделювання та технологічної підготовки виробництва. Сучасні програмні системи підтримки процесів інженерного проектування повністю розмивають кордони між умовними і без того розмитими категоріями Design, Engineering, Manufacturing. Інструментальний набір інженера з кожним роком поповнюється абсолютно новими і раніше недоступними в інженерії програмами. Вибір програмної підтримки в цій галузі такий, що відповідає практично будь-яким потребам, областям діяльності і фінансовим можливостям.

Основою практично всіх сучасних CAD-систем є системи геометричного моделювання, які також називають моделлерами або геометричними ядрами. Їх основне призначення - формування геометричних 2D і 3D моделей об'єктів проектування: деталей, вузлів і виробів в цілому.

Техніка 3D моделювання, виходячи з думок експертів і динаміки розвитку програмного забезпечення (ПЗ), досягла стадії насичення, давно відпрацьовані і реалізовані:

- конструктивна твердотільна геометрія (CSG), що дозволяє оперувати тривимірними моделями тіл як математичними об'єктами - об'єднувати декілька тіл в одне, утворювати нові тіла областями перетину декількох і т.і.,

- параметричне моделювання з історією побудови, при якому модель тіла стає одночасно і виконуваною програмою, і класом, що дозволяє при виконанні генерувати безліч об'єктів методом зміни обраних параметрів, причому параметризація доступна мало не для кожної дії конструктора;

- проектування із застосуванням моделей конструктивних елементів (feature-based modeling), коли модель виробу збирається з різних параметризованих «отворів», «фланців», «кишень» і т.і.;

- вільне моделювання (direct modeling), що забезпечує «ліплення» 3D моделі немов би з ідеального пластиліну, без історії ланцюжка створення.

Більш того, в сучасних CAD-системах поступово реалізуються всі ці методи одночасно. Крім такої низькорівневої інтеграції, спостерігається масовий процес об'єднання CAD/CAM/CAE-

програм в єдині комплекси, засоби моделювання стають буденними інструментами конструкторів.

Прогрес автоматизованої розробки привніс нову парадигму в проектування та аналіз. Перш за все, системи геометричного моделювання настільки просунулися вперед за останнє десятиріччя, що сучасні CAD-системи здатні обробляти моделі деталей і агрегатів самої складної геометрії та конструкції. Агрегат можна відобразити, оцінювати і модифікувати як єдине ціле, а його рухи імітувати так само, як це робиться з фізичним прототипом.

По-справжньому ж цікаві події в світі CAD/CAM/CAE зараз відбуваються за межами «геометричної області» та інтеграції пакетів, а саме, в хмарних обчисленнях.

На кожному з наступних за детальним проектуванням етапів використовуються свої спеціалізовані програми і відповідні підсистеми глобальної PLM-системи. При цьому, отримана в ході цих етапів інформація ніби замикає ланцюг «зворотного зв'язку» і викликає потребу в наскрізних змінах в проєкті. Для особливо складних робіт такі ланцюги зворотного зв'язку іноді використовуються для налаштування (калібрування) програмних комплексів, що відповідають, наприклад, за рішення складних задач моделювання. Для виготовлених реальних виробів повторюється натурний експеримент, для якого є результати моделювання, і за підсумками випробувань вносяться корективи в налаштування моделюючих програм (для цієї мети серйозні системи моделювання передбачають можливість підключення датчиків і цілих вимірювальних комплексів).

Вибір дуже великий, але проблема полягає в тому, що у великих проєктах кожним етапом життєвого циклу займаються різні люди і тут необхідно інтегрувати їх досвід для оптимального вибору і застосування програмних інструментів [20].

1.2 Інтеграція етапів життєвого циклу створення виробів

Основні етапи життєвого циклу виробів та найбільш поширені види автоматизованих систем, що використовуються на цей час наведені на рис.1.1 [36].

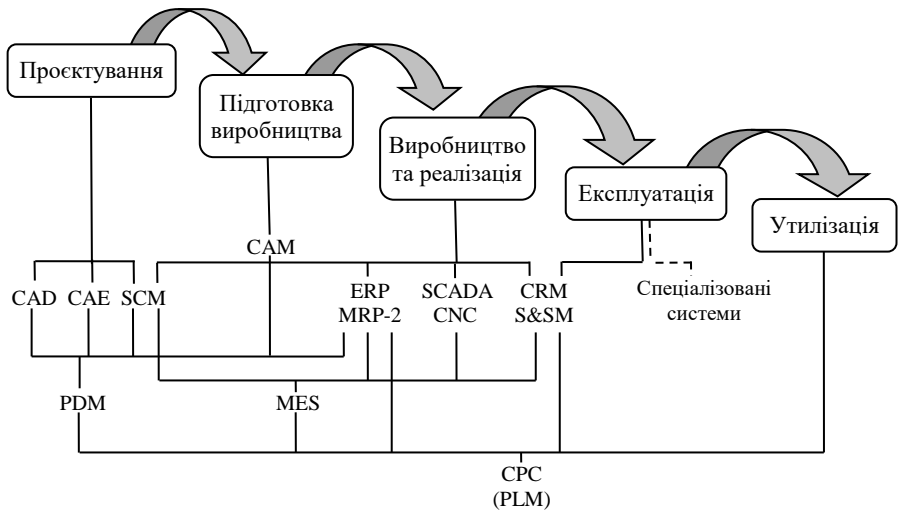


Рисунок 1.1 – Етапи ЖЦВ та використовувані автоматизовані системи

CAD (*Computer Aided Design*) - системи конструкторського проєктування – загальний термін для означення всіх аспектів проєктування з використанням засобів обчислювальної техніки, охоплює створення геометричних моделей виробу, а також генерацію креслеників виробу та їх супроводження.

SAM (*Computer Aided Manufacturing*) - системи автоматизованої підготовки виробництва – загальний термін для означення програмних систем розробки технологічних процесів, програм для програмно-керованого обладнання, спеціального оснащення та пристосувань.

CAE (*Computer Aided Engineering*) - системи розрахунків та інженерного аналізу – загальний термін для означення інформаційного забезпечення автоматизованого аналізу проєкту, метою якого є знаходження помилок проєкту або оптимізація виробничих можливостей.

PDM (*Product Data Management*) – системи керування виробничою інформацією, призначені для координації роботи систем

CAD/CAM/CAE, керування проєктними даними та процесами розробки виробу на підприємстві.

SCM (Supply Chain Management) або *CSM (Component Supplier Management)* – система керування ланцюгами постачання необхідних матеріалів і комплектуючих.

ERP (Enterprise Resource Planning) – система планування та управління підприємством, виконує різні бізнес-функції, що пов'язані із плануванням виробництва, закупівлями, збутом продукції, аналізом перспектив маркетингу, керуванням фінансами, персоналом, складським господарством, обліком основних фондів тощо.

MRP-2 (Manufacturing Requirement Planning) – система планування виробництва та вимог до матеріалів, орієнтована, головним чином, на бізнес-функції, безпосередньо пов'язані з виробництвом.

MES (Manufacturing Execution System) – виробнича виконавча система, орієнтована на вирішення оперативних завдань керування проєктуванням, виробництвом і маркетингом.

CRM (Customer Requirement Management) – система керування взаєминами з покупцями й замовниками, виконує функції аналізу ринкової ситуації та визначає перспективи попиту на плановані вироби.

Системи ERP, MRP-2, MES, CRM, SCM можна віднести до автоматизованих систем управління підприємством (АСУП).

S&SM (Sales and Service Management) – система рішення маркетингових завдань і проблем обслуговування виробів.

На етапі експлуатації також використовуються спеціалізовані комп'ютерні системи, що вирішують питання діагностики, контролю й ремонту експлуатованих систем.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – система виконання диспетчерських функцій (збір і обробка даних про стан устаткування та технологічних процесів) і розробки програмного забезпечення для вбудованого устаткування.

CNC (Computer Numerical Control) – система, що здійснює безпосереднє програмне керування технологічним устаткуванням на базі контролерів (спеціалізованих комп'ютерів, які називаються промисловими).

Системи SCADA, CNC можна віднести до автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП).

CPC (Collaborative Product Commerce) або *PLM (Product Lifecycle Management)* – системи керування даними в інтегрованому інформаційному просторі, вирішують завдання об'єднання інформації про запити замовників і даних про можливості підприємств та організацій, що спеціалізуються на наданні різних послуг, а також проектуванні, виготовленні й постачанні замовлених виробів. Таким чином, створюється інтегрований інформаційний простір, у якому функціонують різні автоматизовані системи й взаємодіють багато підприємств. Світовими лідерами в області розробки PLM-систем сьогодні є: PTC, Siemens, Dassault Systèmes SA, Лоція Софт, Oracle, Аскон, IFS.

Автоматизація різноманітних процесів, пов'язаних з розробкою, виробництвом та експлуатацією виробів промисловості найбільш ефективна в тому випадку, коли вона охоплює всі етапи ЖЦВ, але при цьому виникає ряд проблем:

- відсутність єдиного комплексу стандартів електронного опису різних етапів ЖЦВ, що забезпечують інформаційну взаємодію електронних технологій у рамках одного підприємства чи віртуального об'єднання підприємств;

- повний перехід на безпаперову електронну технологію проектування вимагає розробки стандартів і пропозицій шляхів розв'язання цієї задачі;

- наявність безлічі різних систем, які ефективно розв'язують конкретні задачі, що відносяться до окремих етапів ЖЦВ, приводить до проблем обміну даними між суміжними системами;

- наявність великої кількості підприємств, що беруть участь у підтримці ЖЦВ, що вимагає ефективного обміну інформацією про виріб між підприємствами-партнерами як всередині держави, так і на міжнародному рівні;

- постійно зростаюча складність виробів, наявність безлічі модифікацій, запозичення, стандартизація та уніфікація вимагають підтримки багаторівневих і різноманітних проєктів та моделей.

Відомою інформаційною стратегією підтримки всіх етапів ЖЦВ є CALS-технологія.

CALS (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support) спрямована на ефективне створення, обмін, керування і використання електронних даних, що підтримують ЖЦВ, за допомогою міжнарод-

них стандартів реорганізації підприємницької діяльності і передових технологій.

Складові CALS – технології:

- ідеологія створення єдиного інформаційного середовища, яке охопить всі стадії ЖЦВ від задуму до утилізації;
- стандартизація представлення інформації на всіх етапах ЖЦВ, що забезпечує з одного боку єдність інформаційного опису для кожного етапу ЖЦВ, а з іншого – інформаційну взаємодію результатів роботи комп'ютерних систем, застосовуваних на різних етапах ЖЦВ;
- система інформаційної інтеграції, що дозволяє вирішити проблему забезпечення взаємодії підприємств партнерів у єдиному інформаційному просторі;

Метою впровадження CALS є послідовне перетворення існуючих виробничих процесів у єдиний високоавтоматизований і інформаційно-інтегрований процес керування ЖЦВ при розробці, виробництві та експлуатації наукоємної продукції.

1.3 Технології віртуальної інженерії

Сучасні технології віртуальної інженерії пропонують нові підходи як до проєктної та і до виробничої діяльності. Вони дозволяють:

- оцінити можливість виробництва різних варіантів конструкції (включаючи оцінку якості збирання або експлуатаційних характеристик проєктованих виробів);
- оптимізувати виробничий процес (методом цифрової імітації);
- легко налаштувати продукт під вимоги замовника;
- ефективно накопичити широку базу знань;
- забезпечити основу для колективної розробки проєктів.

Віртуальна інженерія надає засоби імітації різних видів інженерної діяльності на всіх етапах розробки та виробництва виробів:

- проєктування та моделювання;
- імітація машинної обробки;
- імітація збирання

- управління виробничими лініями;
- візуальний контроль та оцінювання.

Дослідження віртуального прототипу дозволяє:

- скоротити час розробки;
- дослідити більше альтернативних варіантів конструкції;
- не створювати фізичні прототипи, які багато коштують;
- виконати дослідження прототипу, які є неможливими в реальних умовах на макеті;
- не проводити фізичні експерименти, що потребують значного часу.

Згідно з [24], *віртуальне виробництво* – це інтегроване виробниче середовище, що може бути класифіковане як:

- проектно-орієнтоване віртуальне виробництво, або імітаційне середовище для проектування продукту та оцінки можливостей його виробництва.

- виробничо-орієнтоване віртуальне виробництво, або імітаційне середовище для планування виробничих процесів та виробництва;

- управлінсько-орієнтоване віртуальне виробництво, або імітаційне середовище для моделювання функціонування виробничих цехів.

Основними компонентами віртуального виробництва є віртуальне проектування, цифрова імітація, віртуальне прототипування та віртуальний завод [24].

Віртуальне проектування надає можливість створювати компоненти, модифікувати їх, управляти різними пристроями і взаємодіяти з віртуальними об'єктами в віртуальному середовищі. Конструктор може бачити стереоскопічне зображення віртуальних об'єктів і чути просторовий реалістичний звук. Ці зображення та звук виникають, коли рука конструктора рухає віртуальною рукою і пальцем. Дотик до віртуального об'єкту відчувається конструктором у вигляді зворотного зв'язку. Конструктор отримує можливість ефективно втілити в проєкті свої ідеї, а також перевірити функціональну поведінку конструкції. Даний підхід дозволяє також врахувати точку зору потенційного користувача продукції, оскільки вже на ранніх стадіях проектування можуть бути повною мірою оцінені такі якості, як доступність і керованість. З'являється також можливість врахувати при проектуванні складний і важко формалізова-

ний досвід експертів в збиранні або маніпулюванні деталями. При цьому, система віртуального проектування допоможе зрозуміти положення користувача, його взаємодію з об'єктами і послідовність операцій збирання.

Цифрова імітація спрямована на оцінювання роботи виробів без використання фізичних прототипів, а також перевірку технологічних процесів. За допомогою імітації користувач може спрогнозувати зіткнення між інструментом і пристосуванням або деталлю, перевірити траєкторію переміщення інструменту верстата з ЧПУ, щупа координатно-виміральної машини або руки робота. Візуалізація допомагає інженерам краще зрозуміти систему, оскільки дозволяє легко усвідомити ідею конструкції і заздалегідь перевірити її експлуатаційні якості. В даний час для цієї мети використовуються головним чином кінематична імітація твердих тіл. Імітація моделей більш високого рівня - рідин, людських істот і складних середовищ вимагає складного моделювання фізичних ефектів, включаючи ефекти динаміки, вібрації, акустики і деформації. Тим не менш, складні імітації з використанням віртуальних прототипів можуть здійснити перевірку робочих характеристик системи швидше і з меншими витратами.

Віртуальне прототипування передбачає побудову комп'ютерного прототипу спроектованого виробу, геометрія та фізична поведінка якого відповідають реальному продукту. Системи віртуального прототипування дозволяють перевіряти можливість створення агрегатів в наявних виробничих умовах шляхом візуалізації процесу збирання. Збирання віртуального прототипу дозволяє виявити конструктивні прорахунки, відпрацювати послідовність та оптимальну траєкторію руху деталей і, в разі необхідності, внести зміни в проєкт. Передові системи надають можливість проведення структурного та функціонального аналізу віртуального прототипу, а також кінематичної та динамічної імітації його роботи.

Віртуальний завод – це модель виробничої системи, що імітує виробничі ділянки, процеси, складські системи, а також автоматизоване заводське обладнання – верстати, роботи і конвеєри. Побудована модель виробництва дозволяє проаналізувати витрати на робочу силу, експлуатаційні витрати, витрати на обробку і тривалості виробничого циклу. Це дозволяє використовувати віртуальний завод для планування виробництва, оцінки проєктів вироб-

них систем і порівняння альтернативних способів виробництва. Якщо за допомогою віртуального заводу зімітувати весь ланцюжок поставок, це дозволить оцінювати та оптимізувати весь процес управління ресурсами і виробництвом.

На цей час функціональні можливості застосування систем віртуальної інженерії обмежені. Для її перетворення в розвинену технологію треба дослідити та розв'язати наступні проблеми:

- розробка нового середовища проектування для зручної взаємодії проектувальника з виробом за допомогою органів почуттів (зору, мови, жестів і т.і.);
- розвиток методів моделювання процесів та фізичних об'єктів для імітації в реальному часі;
- дослідження можливостей виробництва та їх кількісної оцінки для визначення тривалості виробничих процесів та їх вартості;
- підвищення швидкодії та потужності систем, розвиток технології розподілених обчислень для повноцінного віртуального проектування;
- розвиток стандартів інтерфейсу даних для ефективної взаємодії різних систем та колективної розробки;
- об'єднання на базі відкритої архітектури систем віртуального проектування з іншими інженерними системами для розширення функціональності або розв'язку різноманітних задач [24].

1.4 Хмарне проектування

Сьогодні практично всі застосунки CAD/CAM/CAE/PLM, з технічної точки зору, мають шанс потрапити в хмару. До того ж, використання Інтернет-технологій є природнім для сучасного виробництва через його глобалізацію та територіальну розподіленість. Звичайно, не для всіх напрямків застосування хмарних технологій поки що представляється ефективним.

За однастайною думкою експертів, у першу чергу це ті області, які передбачають взаємодію людей. Із усього набору інженерного ПЗ найбільш пристосовані для роботи в хмарі PDM- і PLM-системи. Вони передбачають колективний доступ до даних, що зручно й природно реалізувати саме за допомогою хмарних технологій. Завдання PLM добре переносяться в хмару, оскільки висока

обчислювальна потужність не потрібна, а розміри сховища даних - лише питання оплати. До того ж дані будуть резервуватися. Однак, при цьому встають питання забезпечення безперебійності доступу до даних і швидкості їхнього завантаження з мережних сховищ. Оскільки сумарний обсяг файлів проєкту може бути досить великий, вимоги до каналу зв'язку також пред'являються високі.

Немає сенсу переносити в хмару той функціонал CAD/CAM/CAE/PLM, що ефективно реалізується за допомогою стандартних десктопних систем. Але є цілий ряд завдань, для яких хмарний підхід дозволяє скоротити час виконання й вартість, підвищити якість проєкту і взаємодії.

Перше - зберігання значних обсягів даних. Чим більше даних і вище ймовірність швидкого збільшення їхнього обсягу, тим вигідніше зберігати їх у хмарі в стороннього провайдеру. Але тут, зазвичай, на перший план виходить наявність функціонала, що дозволяє правильно організувати зберігання, упорядкування інформації та доступ до неї, оптимізувати пошук.

Друге - організація взаємодії людей.

Третє завдання - доступ до часто оновлюваних баз даних. В області проєктування це можуть бути бази елементів, наприклад опалення або вентиляції, стандартних деталей і т.і. Хмарні технології дозволяють не тільки виконувати зберігання, але й, головне, забезпечити повноту й актуальність інформації.

І нарешті, четверте завдання, - ресурсномісткі обчислення. Інженерам і архітекторам часто доводиться проводити розрахунки певних конструкцій, аналізувати декілька проєктних рішень, виконувати якісну візуалізацію. Необмежені обчислення, які можна реалізувати за допомогою хмарних технологій, дозволяють значно прискорити ці процеси.

Що стосується CAD-систем, застосовуваних для проєктування виробів, то експерти сумніваються в перспективності їхнього переносу в хмару. По-перше, вони висувають спеціальні вимоги до апаратної платформи, насамперед в області графіки, а по-друге, оперують значними потоками даних, особливо при 3D-модельованні. Для проєктування, особливо тривимірного, важливі висока інтерактивність інтерфейсу, швидке перерахування геометрії моделі при її зміні, гарна якість зображення й висока частота відновлення екрана. Це накладає високі вимоги на ту частину хма-

ри, що генерує зображення, а також на канали зв'язку. У цей час робота декількох серйозних CAD-користувачів із прийнятною якістю практично неможлива навіть у локальній хмарі. Причин дві: зараз кожному користувачеві необхідна окрема потужна відеокарта для обробки зображення, що ускладнює структуру хмари, а пропускна здатність каналів ще недостатня для роботи з високим ступенем інтерактивності. Тому, CAD як і раніше, простіше реалізувати на локальних робочих місцях і ця тенденція збережеться, як мінімум, у коротко- і середньостроковій перспективі.

Для CAE ситуація інша. Обчислювальні потужності для інженерних розрахунків уже успішно створюються й використовуються. Тут головна проблема - забезпечення безпеки даних і підтримка актуальності програмного й апаратного забезпечення хмари його власниками.

Таким чином, на даний момент найбільш оптимальним шляхом розвитку CAD/CAM/CAE/PLM є не повний перенос у хмару того або іншого застосунку, а комбінація можливостей стаціонарних комп'ютерів і хмарних технологій. При цьому, в ідеалі, користувач не повинен замислюватися про те, який саме комп'ютер - стаціонарний або хмарний - на даний момент вирішує поставлене їм завдання. Головне, щоб завдання вирішувалося якісно і швидко.

Які типи хмар краще підходять для CAD/CAM/CAE/PLM? Рішення про застосування того або іншого виду хмари повинен приймати замовник, виходячи з конкретних особливостей своєї діяльності. При цьому потрібно враховувати необхідну продуктивність, специфіку розв'язуваних завдань (моделювання, розрахунки, зберігання й передача файлів), вимоги до безпеки даних, наявність каналів зв'язку, можливість утримувати локальний центр обробки даних, наявність кваліфікованого персоналу для обслуговування апаратного й програмного забезпечення й т.п.

Для CAD-систем більше підійдуть приватні хмари, оскільки в них більш широкі канали передачі даних, або гібридні, в яких робочі місця проєктувальників будуть розташовані локально, а інші робочі місця й зберігання даних - у публічній хмарі. Але, для цього потрібно спочатку вирішити питання із продуктивною обробкою графіки на віртуальних робочих місцях. Що стосується організації приватної хмари для CAD, то це не менш затратно, ніж створення окремих робочих місць, і більш складно. Для інженерних розраху-

нків, можливо, найбільш ефективними стануть публічні хмари, які можуть забезпечити високу обчислювальну потужність, позбавивши підприємство від необхідності купувати дороге “залізо” і софт. Але в приватної хмари є важлива перевага: її завжди можна сконфігурувати і тонко налаштувати для підвищення продуктивності.

На цей час, два гіганти світу CAD різко активізували реалізацію своїх хмарних рішень. Autodesk пропонує гібридний підхід - поєднання локальних робочих станцій і високопродуктивних хмарних обчислень для рішення складних задач моделювання. Стратегія Dassault Systemes - це вже справжнє хмарне 3D-проектування, що реалізується через віддалений доступ конструкторів до обчислювальних ресурсів, необхідних для ефективного виконання ресурсоемних ACIS/CGM і застосунків на їх основі.

Якщо вигода й зручність хмарних рішень будуть очевидні, світ автоматизованого проектування і взаємопов'язані з ним світи (наприклад, робочих станцій) чекають дуже серйозні зміни. Якщо ні, то перехід до хмар буде відкладений на невизначений термін [16].

1.5 Практичні завдання

Завдання 1. Скористайтесь вільними хмарними сервісами, виконайте дослідження наданих можливостей та підготуйте комп'ютерну презентацію на тему «Хмарне проектування».

Завдання 2. Виконайте огляд джерел інформації та напишіть реферат на тему «Технології швидкого прототипування».

1.6 Тестові контрольні запитання

1. Широке використання засобів обчислювальної техніки для виконання проектних операцій та процедур - це:

- а) автоматичне проектування
- б) неавтоматизоване проектування
- в) автоматизоване проектування

2. Життєвий цикл виробів складається з:

- а) етапів
- б) рівнів

- в) аспектів
- 3. Життєвий цикл виробів завершується етапом:
 - а) утилізації
 - б) експлуатації
 - в) виробництва
- 4. Засоби аналізу ринків та споживчих аудиторій, збору та каталогізації інформації та легальної технічної розвідки, системи правової та патентної підтримки використовуються на етапі:
 - а) створення концепції проекту
 - б) оцінки реалізованості проекту
 - в) детального проектування
- 5. Який з наведених термінів не стосується системи геометричного моделювання:
 - а) моделлер
 - б) геометричне ядро
 - в) постпроцесор
- 6. Яка з цих технологій не стосується етапу проектування:
 - а) feature-based modeling
 - б) direct modeling
 - в) feasibility assessment
- 7. Найбільш цікаві події в світі CAD/CAM/CAE зараз відбуваються:
 - а) в геометричній галузі
 - б) в галузі інтеграції програм
 - в) в хмарних обчисленнях
- 8. Загальний термін для означення всіх аспектів проектування з використанням засобів обчислювальної техніки, охоплює створення геометричних моделей виробу, а також генерацію креслеників виробу та їх супроводження – це:
 - а) CAD
 - б) CAM
 - в) CAE
- 9. Системи, що призначені для керування проектними даними та процесами розробки виробу на підприємстві, називаються:
 - а) CAD
 - б) CAM
 - в) PDM

10. Загальний термін для означення програмних систем розробки технологічних процесів, програм для програмно-керованого обладнання, спеціального оснащення та пристосувань – це:

- а) CAD
- б) CAM
- в) CAE

11. Загальний термін для означення інформаційного забезпечення автоматизованого аналізу проекту, метою якого є знаходження помилок проекту або оптимізація виробничих можливостей – це:

- а) CAD
- б) CAM
- в) CAE

12. Технології комплексної комп'ютеризації сфер промислового виробництва, мета яких уніфікація та стандартизація специфікацій промислової продукції – це:

- а) CALS
- б) CASE
- в) ODBC

13. Дозволяє здійснювати імітацію різних видів інженерної діяльності на всіх етапах розробки та виробництва виробів:

- а) програмна інженерія
- б) віртуальна інженерія
- в) комп'ютерна інженерія

14. В основі віртуальної інженерії лежить:

- а) імітаційне моделювання
- б) теорія планування експерименту
- в) теорія масового обслуговування

15. Який з термінів не стосується віртуального прототипу проєктованого виробу:

- а) цифровий макет
- б) попередній цифровий складень
- в) натурний макет

16. Якого типу хмар не існує:

- а) приватні
- б) публічні
- в) віртуальні

1.7 Література до розділу

Методологія автоматизації системного проектування розглянута в: [20,36,50], використовувани на різних етапах ЖЦВ автоматизовані системи та сутність CALS-технологій висвітлено в [23,24,30,31,48,49,51,54], проблеми віртуальної інженерії містяться в [24,30], особливості хмарного проектування описані в [16,37].

2 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ CAD/CAM/CAE - СИСТЕМ

2.1 Категорії систем автоматизованого проєктування

Системи «тяжкої ваги» - забезпечують весь цикл створення виробу від концептуальної ідеї до реалізації, а також створюють проектно-технологічне середовище для одночасної роботи всіх учасників створення виробу з єдиною віртуальною електронною моделлю цього виробу. Ці системи застосовуються для вирішення найбільш трудомістких задач: побудови великих складаних одиниць, моделювання поведінки складних механічних систем у реальному масштабі часу, оптимізаційних розрахунків з візуалізацією результатів, розрахунків температурних полів і теплообміну, підготовки керуючої інформації для верстатів з ЧПУ і т.д. Зазвичай до складу системи входять як суто графічні модулі, так і модулі для проведення розрахунків і моделювання, постпроцесори для верстатів з ЧПУ (CATIA, Creo, NX, Euclid).

Системи «легкої ваги» – служать для виконання практично всіх робіт з двомірними креслениками та мають обмежений набір функцій з тривимірною моделювання. За допомогою цих систем виконується значна частина проєктних робіт. Область їх застосування - створення креслеників окремих деталей та складаних одиниць (CADkey, bCAD, GstarCAD, nanoCAD, RhinoCAD, FreeCAD, LibreCAD).

САПП «середньої ваги». Займають проміжне положення між важкими та легкими системами, дозволяють виконувати значну частину функцій важких, але мають прийнятну вартість (Autodesk Mechanical Desktop, Solid Edge, T-Flex CAD, Solid Work, КОМПАС).

Наведена класифікація є досить умовною, оскільки розробники постійно удосконалюють системи автоматизованого проєктування, розширюють їх функціональні можливості, що сприяє переходу системи в іншу «вагову категорію» [53].

2.2 Параметричне моделювання в САПР

Процес параметричного моделювання - моделювання з використанням параметрів елементів моделі і співвідношень між цими параметрами. Параметризація дозволяє за короткий час перебрати різні конструктивні схеми (за допомогою зміни параметрів або геометричних відносин) і уникнути принципів помилок. Параметричне моделювання істотно відрізняється від звичайного двовимірного креслення або тривимірного моделювання. Конструктор, у разі параметричного проектування, створює математичну модель об'єктів з параметрами, при зміні яких відбуваються зміни конфігурації деталей, взаємні переміщення деталей в складаній одиниці і т.п.

Параметризація двовимірних креслеників зазвичай доступна в САД-системах середньої і легкої ваги. Однак, упор в цих системах зроблено на тривимірну технологію проектування і можливості параметризації двовимірних креслеників практично не використовуються. Параметричні САД-системи, що орієнтовані на двовимірне креслення, найчастіше є «урізаними» версіями більш розвинених САПР.

Тривимірне параметричне моделювання є набагато більш ефективним (але і більш складним) інструментом, ніж двовимірне параметричне моделювання. У сучасних системах середньої і важкої ваги наявність параметричної моделі закладено в ідеологію самих САПР, а параметричний опис об'єкта є базою для всього процесу проектування.

Існують різні типи параметризації.

Таблична параметризація полягає у створенні таблиці параметрів типових деталей. Створення нового екземпляра деталі проводиться шляхом вибору з таблиці типорозмірів. Можливості табличної параметризації досить обмежені, оскільки завдання довільних нових значень параметрів і геометричних відносин зазвичай є неможливим. Однак, таблична параметризація знаходить широке застосування у всіх параметричних САПР, оскільки дозволяє істотно спростити і прискорити створення бібліотек стандартних і типових деталей, а також їх застосування в процесі конструкторського проектування.

Ієрархічна параметризація (параметризація на основі історії побудов) полягає в тому, що в ході побудови моделі вся послідовність побудови відображається в окремому вікні у вигляді «дерева побудови». У ньому перераховані всі існуючі в моделі допоміжні елементи, ескізи і виконані операції в порядку їх створення. Крім «дерева побудови» моделі, система запам'ятовує не тільки порядок її формування, але й ієрархію її елементів (відносини між елементами). Наприклад: складень > складання одиниця > деталь. Параметризація на основі історії побудов присутня у всіх САПР, що використовують тривимірне твердотільне параметричне моделювання. Зазвичай такий тип параметричного моделювання поєднується з варіаційною та/або геометричною параметризацією.

Варіаційна або розмірна параметризація заснована на побудові ескізів з накладанням на об'єкти ескізу різних параметричних зв'язків і обмежень у вигляді системи рівнянь, що визначають залежності між параметрами. Варіаційна параметризація дозволяє легко змінювати форму ескізу або значення параметрів операцій, що дозволяє зручно модифікувати тривимірну модель.

Геометричною параметризацією називається параметричне моделювання, при якому геометрія кожного параметричного об'єкта перераховується залежно від положення батьківських об'єктів, його параметрів і змінних. Параметрична модель, в разі геометричної параметризації, складається з елементів побудови і елементів зображення. Елементи побудови (конструкторські лінії) задають параметричні зв'язки. До елементів зображення належать лінії зображення (якими обводяться конструкторські лінії), а також елементи оформлення (розміри, написи, штрихування і т.п.). Одні елементи побудови можуть залежати від інших елементів побудови. Елементи побудови можуть містити й параметри (наприклад, радіус кола або кут нахилу прямої). При зміні одного з елементів моделі всі залежні від нього елементи перебудовуються відповідно зі своїми параметрами і способами їх завдання. Геометрична параметризація дає можливість більш гнучкого редагування моделі. У разі необхідності внесення незапланованої зміни в геометрію моделі не обов'язково видаляти вихідні лінії побудови (це може призвести до втрати асоціативних взаємозв'язків між елементами моделі), можна провести нову лінію побудови і перенести на неї лінію зображення.

Технологія параметричного моделювання більше 20 років займає провідне становище в області 3D-САПР. Але поряд з перевагами, цей метод має істотний недолік: за його допомогою складно редагувати раніше створені моделі, особливо імпортовані з інших САПР. Відповіддю на цю проблему стала технологія *прямого моделювання (direct modeling)*, застосування якої істотно розширилося останнім часом. Пряме моделювання не має недоліку, властивого параметричному моделюванню, але залишає користувачеві занадто багато ступенів свободи. Тому в результаті редагування вихідна модель може змінитися до невпізнання і відійти від початкового задуму проєктувальника.

Щоб взяти найкраще з обох методів, постачальники об'єднують пряме і параметричне моделювання. Ці події вселяють надію, що злиття технологій призведе до появи більш "інтелектуальних" САПР, що полегшують життя проєктувальників [31].

2.3 Відкритість САПР

Однією з головних тенденцій сучасної індустрії інформатики є створення відкритих систем.

Відкритість – комплексне поняття, що означає:

- мобільність – переносимість ПЗ на різні апаратні платформи;
- модифікованість – пристосованість системи до її змін;
- інтегрованість – пристосування системи до комплексування з іншими системами для розширення її функціональних можливостей та/або надання системі нових якостей.

Відкритість дозволяє:

- замінити тривалу й вартісну розробку нових систем за повним циклом, їх компонуванням з раніше спроектованих підсистем або швидкою модернізацією вже існуючої системи (реінжиніринг);
- підвищити ступінь універсальності програм;
- розширити можливості адаптації програм до конкретних умов.

Основою створення відкритих систем є стандартизація та уніфікація в галузі інформаційних технологій.

Аспекти відкритості відображені в стандартизації:

- API (Application Program Interface) - інтерфейсів прикладних програм з операційною системою;
- міжпрограмного інтерфейсу, в тому числі мови програмування;
- мережевої взаємодії;
- користувальницького інтерфейсу, у тому числі засобів графічної взаємодії користувача з ЕОМ;
- засобів захисту інформації.

Стандарти, що забезпечують відкритість ПЗ, на цей час розроблюються такими організаціями як ISO (International Standard Organization), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), EIA (Electronics Industries Association).

Профілем відкритої системи називають сукупність стандартів та інших нормативних документів, що забезпечують виконання системою заданих функцій.

Інтеграція ПЗ САПР базується на ідеях об'єктно-орієнтованого програмування. При цьому існують два аспекти:

- синтаксична інтеграція – реалізується за допомогою уніфікованих мов та форматів даних, а також технологій типу ODBC або CBD;
- семантична інтеграція має на увазі автоматичне розпізнавання різними системами змісту переданих між ними даних, базується на прикладних протоколах STEP, вимагає уніфікації моделей застосунків і механізмів взаємодії (OLE, DDE, CBD).

Теоретичною базою для створення технологій інтегрування програмного забезпечення є:

- методологія автоматизованого проектування, згідно з якою здійснюється типізація проектних процедур і маршрутів проектування, виявлення типових вхідних і вихідних даних, побудова й узагальнення інформаційних моделей застосунків, а також порівняльний аналіз альтернативних методів і алгоритмів виконання типових процедур;
- об'єктно-орієнтована методологія, у відповідності з якою множини сутностей, що фігурують у процесах проектування, підділяються на інваріантні й прикладні класи, а в класах з'являються свої процедури й типи даних з відносинами спадкування.

Узагальнення та уніфікація класів призводить до появи таких понять та засобів, як:

- інтегровані ресурси і прикладні протоколи (в стандартах STEP);
- уніфіковані програмні компоненти (наприклад, графічні ядра САПР, типові ПМК, тощо) [36].

2.4 Методи та формати обміну даними

Фактично завжди виникає потреба зв'язати декілька автоматизованих систем або всередині організації, або зовні, наприклад, при взаємодії з постачальниками або суміжниками.

Якщо декілька CAD/CAM/CAE-систем об'єднуються та зв'язуються в один інтегрований застосунок для сумісного використання даних, виникає задача обміну даними. Проблема полягає в тому, що різні системи зберігають дані в різних структурах, що вимагає перетворення даних з одного формату в інший. Розв'язати цю задачу можливо на основі двох підходів [24]:

- *метод прямого конвертування*: передбачає розробку двох конверторів для кожної пари систем для безпосереднього двобічного обміну даними;

- *метод непрямого конвертування*: базується на використанні нейтрального файлу, через який здійснюється взаємодія систем.

Хоча прямі конвертори працюють швидше непрямих, а створені ними файли мають менший розмір, метод непрямого конвертування прийнятий в якості основного метода обміну даними між різними системами. Це пояснюється тим, що він вимагає розробки меншої кількості конверторів.

Типовими представниками форматів нейтрального файлу є *IGES (Initial Graphics Exchange Specification)*, *DXF (Drawing Interchange Format)*, *STEP (Standard for Exchange of Product Model Data)*.

Оскільки формат *IGES* є відкритим, з появою нових версій спектр типів даних, що підлягають обміну, постійно розширюється:

- кресленик;
- дані аналізу за методом скінченних елементів;
- дані друкованих плат;
- обмін стандартними бібліотеками деталей;
- структура даних CSG;

- структура даних B-Rep.

Формат IGES складається з 6 розділів: Flag (необов'язковий); Start (початок); Global (глобальні дані); Directory Entry (запис у каталоги); Parameter Data (параметричні дані); Terminate (кінець файлу).

П'ять обов'язкових розділів ідентифікуються початковими літерами (S, G, D, P, T). Запис – це рядок з 80 символів.

Розділ Flag використовується тільки у стислому ASCII-форматі та у бінарному форматі.

Формат ASCII має два різновиди: фіксовану довжину рядка 80 символів та стислу форму (за рахунок усунення пробілів між записами).

Бінарний формат – це бінарне представлення даних у вигляді потоку біт в форматі з фіксованою довжиною запису.

Щоб ідентифікувати формат як стислий ASCII, в стовбець 73 розділу Flag записується символ C, якщо бінарний, тоді в першому байті цього розділу міститься символ B.

У розділі Start вказується система, що є джерелом даних, препроцесор та продукт, що описується.

У розділі Global знаходиться інформація про препроцесор, а також інформація, необхідна постпроцесору для інтерпретації файлу. У цьому розділі описуються наступні елементи:

- символи, які використовуються як роздільники між окремими полями й записами;
- ім'я IGES-файлу;
- кількість значущих цифр у поданні цілих чисел і чисел з плаваючою точкою;
- дата й час створення файлу;
- масштаб простору моделі;
- одиниці вимірювання моделі;
- мінімальна роздільна здатність і максимальні значення координат;
- ім'я автора файлу та назва організації.

У Directory Entry міститься список усіх елементів і деяких їх атрибутів. Дані технічних вимог представляються у вигляді списку визначених елементів: геометричних (лінії, криві, площини, поверхні) та пояснювальних (коментарі, значення розмірів). Кожному елементу привласнюється номер типу – перше та одинадцяте поле,

друге поле містить покажчик на запис у розділі Parameter Data, у якому зберігаються фактичні дані, що визначають кожен з елементів. В інших полях зберігаються атрибути: стиль лінії, номер шару, матриця перетворення, товщина та колір лінії.

У Terminate знаходиться єдиний запис, у якому зберігається кількість записів у кожному з чотирьох попередніх розділів.

При використанні препроцесорів та постпроцесорів з нейтральним форматом IGES на практиці виникають наступні проблеми:

- внутрішній спосіб подання елемента в системі може відрізнятися від того, як цей елемент представляється у IGES.

- геометричний елемент може не підтримуватись явно, що спричиняє необхідність його перетворення у найближчий за формою доступний елемент;

- системи можуть використовувати різні версії IGES, що призводить до втрати символічної інформації при обміні даними.

Завдяки популярності AutoCAD, формат ***DXF*** став фактичним стандартом обміну файлами CAD-креслеників. Формат DXF розроблявся для того, щоб надати користувачам гнучкість в управлінні даними і перетворенні креслеників програми AutoCAD в формати файлів, які могли б читатися і використовуватися іншими САПР. Практично всі сучасні САПР мають транслятор у формат DXF.

DXF-файл - це текстовий ASCII-файл, що складається з п'яти розділів: Header (Заголовок), Table (Таблиця), Block (Блок), Entity (Елемент) і Terminate (Кінець). У розділі Header описується середовище AutoCAD, в якому був створений DXF-файл. У розділі Table міститься інформація про типи ліній, шари, стилі тексту і види, які можуть бути визначені на кресленику. У розділі Block міститься список графічних елементів, визначених як група. Конкретні дані по кожному елементу зберігаються у відповідному розділі Entity, який слідує відразу за розділом Block. Розділ Entity - це головний розділ DXF-файлу, в якому описуються всі елементи, присутні на кресленику.

Файл DXF складається з безлічі груп, кожна займає два рядки: перший рядок містить код групи – позитивне ненульове ціле число; другий рядок містить значення групи.

Наприклад:

- 0 – встановлює початок графічного примітива, входів у таблицю або роздільника файлу;
- 2 – задає ім'я розділу, таблиці;
- 6 – ім'я типу лінії;
- 7 – тип текстового шрифту;
- 8 – ім'я шару;
- 10 – код групи 10, первинні координати X, (початкові лінії, центр окружності);
- 11–18 – нефіксовані координати;
- 20 – первинні координати Y;
- 21–28 – для інших координат Y;
- 70–78 – цілочисельні значення: кількість повторів, режими (максимальне число елементів таблиці).

З появою нових версій AutoCAD, список можливих елементів розширюється, що спричиняє неможливість зчитування файлів, створених в більш пізніх версіях AutoCAD, системами, що використовують старі версії формату DXF.

Формати IGES і DXF були розроблені для обміну даними технічних вимог, а не даними про продукт. Під даними про продукт ми розуміємо дані, що відносяться до всього життєвого циклу продукту. Хоча специфікації IGES і DXF були розширені з метою включення деяких з цих даних, інформації, що міститься в цих файлах, недостатньо для опису всього життєвого циклу продукту. Внаслідок цього, ведеться розробка стандартів для обміну даними про продукти.

В основі розробки **STEP** лежать наступні принципи.

- стандарт STEP повинен орієнтуватися на дані про продукт, які включають інформацію про весь життєвий цикл продукту: проектування, виробництво, контроль якості, випробування та підтримку. Таким чином, в якості даних має розглядатися інформація про допуски, технологічні особливості форми, скінченно-елементна модель, модель для кінематичного аналізу і т.і., а також дані технічних вимог, що стосуються головним чином форми продукту;

- у структурах даних STEP інформація, що відноситься до застосунку, повинна зберігатися в модулі рівня застосунку, окремо від загальної інформації про форму. Завдяки такому підходу струк-

тура даних зможе підтримувати широкий спектр застосунків, уникаючи при цьому надмірності в загальній структурі даних;

- для визначення структури даних повинна використовуватися формальна мова. Специфікації IGES і DXF описують формат фізичного файлу, в якому зберігаються всі геометричні та інші дані. У STEP дані описуються на мові EXPRESS, а потім результат перетворюється в фізичний файл. Таким чином можна уникнути неоднозначностей при інтерпретації даних про продукт, витягнутих з файлу.

Частини стандарту групуються за методами опису, інтегрованими інформаційними ресурсами, прикладними протоколами, методами реалізації та методологією узгодження. Кожна частина має свій статус, що позначається певними літерами.

Частини, які позначаються I, E, F вважаються розробленими на високому рівні для того, щоб розробники програмних продуктів приступили до їх реалізації.

Очікується, що STEP увійде в систему стандартів CALS-технологій як стандарт обміну даними про продукти [24].

Взагалі, в сфері CAD використовується безліч файлів – як стандартних, так і власних форматів різних розробників, що створює проблеми при обміні даними. Але в індустрії швидкого прототипування господарює один єдиний формат - **STL**. Аббревіатура STL розшифровується як STereoLithography (тобто, об'ємна літографія). Формат STL та його специфікації були створені компанією Albert Consulting Group, яка займалася розробкою першого алгоритму пошарової обробки на замовлення компанії 3D Systems.

Для всіх пошарових систем необхідно, щоб 3D-модель була “нарізана” горизонтальними шарами, щоб потім можна було відтворити її геометрію у вигляді фізичної моделі шар за шаром. STL – це “мозаїчний” формат, в якому для представлення форми числової 3D-моделі використовується послідовність трикутників (фасетів). Тривимірна геометрія в провідних 3D CAD-системах описується поверхнями високого порядку, а при триангуляції поверхня моделі розділяється на маленькі трикутники. Кожен фасет описується наступним набором даних: координати X,Y,Z кожної з трьох вершин та нормаллю, яка описує орієнтацію фасета.

Існує два типи STL-форматів: текстовий (ASCII) і бінарний. Бінарний варіант файлу займає менше місця, ніж текстовий. У свою чергу текстовий варіант можна переносити на комп'ютер з іншим представленням чисел і числа можуть мати довільну кількість знаків.

Фактично будь-яка тривимірна поверхня (що принаймні технічно реалізується на сучасному устаткуванні) може бути інтерпольована сіткою трикутників: вершини цих трикутників належать поверхням, а максимальне відхилення площини від профілю залежить від наперед заданої точності інтерполяції. Особливостями STL-формату є:

- напрям вектора нормалі до площини трикутника завжди вказує "назовні" деталі;
- всі координати вершин є позитивними числами (якщо не задані особливі налаштування при конвертації);
- інформація декілька надлишкова, оскільки одна і та ж точка повинна належати декільком трикуткам.

Текстовий STL-файл повинен починатися ключовим словом `solid` і закінчуватися `endsolid`. Після слова `solid` (у цьому ж рядку) можна помістити коментар (назва об'єкта, автор і т.і.). Далі йдуть описи трикутників. Опис кожного трикутника включає опис одиничного вектора нормалі і тривимірні координати вершин. Всі координати представлені в декартовій системі координат і записані у вигляді чисел з плаваючою крапкою. Структура текстового STL-файлу має наступний вигляд:

```
solid < коментар >
...
facet normal CosA CosB CosC
outer loop
vertex x1 y1 z1
vertex x2 y2 z2
vertex x3 y3 z3
endloop
endfacet
...
endsolid
```

Бінарний STL-файл умовно можна представити наступним чином:

```

struct facet
{
    float normal[3];        // 12 байт
    float vertex[3][3];    // 36 байт
    unsigned short attr;   // 2 байта У специ-
фікаціях значення цього параметра не задокумен-
товане і тому дорівнює 0
};

struct stl_file
{
    char head[80]; // коментарий - 80 байт
    unsigned long n; // к-во граней - 4 байта
    facet arr[n]; // масив граней - n*50байт
};

```

У будь-якому випадку, при необхідності створення прототипу 3D-поверхні необхідно підготувати STL-файл, а надання необхідної точності і якості при заміні 3D-поверхні триангульованою полігональною сіткою – є ключовим питанням. Крім того, важливою є здатність системи виводити STL-файл для складаних одиниць, як в цілому, так і для їх окремих деталей. Також дуже корисним є попередній перегляд і візуалізація сітки трикутників. Ця властивість важлива, оскільки відразу може виявитись неточність або недостатньо висока роздільна здатність для створення точного прототипу моделі. Є багато CAD-систем, які надають можливість створення та обробки STL-файлів, але складність полягає у тому, що у кожній системі управління процесом відбувається по різному і не завжди так як треба.

2.5 Тенденції розвитку сучасних CAD/CAM/CAE-систем

Сучасний етап розвитку програмного забезпечення САПР характеризується постійним розширенням функціональності систем. Однак, чим складніше використовуване програмне забезпечення, тим вище вимоги до кваліфікації спеціалістів, що працюють з даним програмним забезпеченням. У зв'язку з розповсюдженням

«важких» САПР загострюється кадрова проблема на підприємствах, оскільки:

- утримання висококваліфікованих фахівців, які володіють навичками роботи з системами, обходиться підприємству недешево;

- формується залежність колективів від таких спеціалістів.

Тому, успішними стають програмні продукти, які при достатньо повній функціональності є простими і зрозумілими в експлуатації та не вимагають високої кваліфікації користувачів.

Розробники САПР сьогодні застосовують також різні методи для підвищення продуктивності роботи з системами:

- розробка майстер-процесів для спрощення та прискорення процесу проектування виробів;

- організація проектування на основі бази знань, в якій накопичується досвід проєктувальників;

- створення програмних комплексів і застосунків у середовищі CAD/CAM/CAE-системи, що експлуатується на підприємстві.

Використання програмних середовищ САПР для створення власних застосунків є могутнім інструментом підвищення продуктивності та якості роботи. Сучасні САПР надають широкі можливості по розробці спеціалізованих програмних комплексів та застосунків з використанням відомих мов програмування високого рівня. Це дозволяє ефективно адаптувати систему для розв'язку конкретних задач підприємства. Використовуючи програмні розробки в середовищі вже існуючої САПР, підприємства отримують можливість працювати в єдиному інформаційному просторі, без придбання додаткових пакетів.

Одночасно з ініціативами розробників систем, свої послуги по адаптації й впровадженню САПР на підприємствах пропонують компанії-інтегратори, які перетворюють придбану підприємством CAD/CAM/CAE-систему в систему «під ключ» [25].

Як відомо, ефективність роботи з САПР сильно залежить від можливостей комп'ютерів. Останнім часом в області апаратного забезпечення відбулися суттєві зрушення, якими не забарилися скористатися постачальники софту. Практично всі провідні вендори випустили 64-розрядні версії САПР, які можуть звертатися до практично необмеженого об'єму оперативної пам'яті. Поява багатоядерних процесорів особливо позитивно відбилася на системах

інженерного аналізу, пов'язаних з інтенсивними обчисленнями. За деякими оцінками, складний аналіз, який в 2003-му тривав 5 годин, тепер виконується за 10 хвилин.

Цікаво також, що в галузі САПР відчувається вплив соціальних мереж. Навіть з'явився новий термін – «соціальна розробка виробів». Постачальники підтримують вікі, блоги, відеокліпи, Twitter і Facebook, запускають комунікаційні портали. Результатом стануть розширення взаємодії між розробниками, залучення їх до участі в проєкті на самій ранній стадії, поліпшення зворотного зв'язку з вендорами та зміцнення контактів із споживачами [17].

2.6 Практичні завдання

Завдання 1. Створіть будь-які проєкти в форматах IGES і DXF, передайте в інші системи, перевірте правильність відтворення інформації, зробіть висновки про можливості цих форматів і наявні проблеми обміну даними.

Завдання 2. Дослідіть особливості та структуру інших популярних форматів, що використовуються при обміні даними між CAD/CAM/CAE системами (наприклад, JT, Parasolid, ACIS та ін.)

2.7 Тестові контрольні запитання

1. Служать для виконання практично всіх робіт з двовимірними креслениками та мають обмежений набір функцій тривимірного моделювання:

- а) САПР «середньої ваги».
- б) САПР «легкої ваги»
- в) САПР «тяжкої ваги»

2 Застосовуються для побудови великих складнів, моделювання поведінки складних механічних систем у реальному масштабі часу, оптимізуючих розрахунків з візуалізацією результатів, розрахунків температурних полів та теплообміну, підготовки керуючої інформації для верстатів з ЧПУ:

- а) САПР «середньої ваги».
- б) САПР «легкої ваги»
- в) САПР «тяжкої ваги».

3. Параметризація на основі історії побудов, інакше називається:

- а) таблична
- б) ієрархічна
- в) варіаційна

4. Заснована на побудові ескізів з накладанням на об'єкти ескізу різних параметричних зв'язків і обмежень у вигляді системи рівнянь, що визначають залежності між параметрами:

- а) таблична
- б) ієрархічна
- в) варіаційна

5. Термін "відкритість" включає:

- а) економічність, точність, ефективність
- б) адекватність, надійність, універсальність
- в) мобільність, модифікованість, інтегрованість

6. Можливість налаштування системи для рішення конкретних задач підприємства, а також підключення власних програмних модулів, написаних на мовах високого рівня - це:

- а) інтегрованість
- б) мобільність
- в) модифікованість

7. Пристосованість системи до комплексування з іншими системами для розширення її функціональних можливостей та/або надання системі нових якостей – це:

- а) інтегрованість
- б) мобільність
- в) модифікованість

8. Сукупність стандартів та інших нормативних документів, що забезпечують виконання системою заданих функцій, називається:

- а) профілем відкритої системи
- б) нормативною базою відкритої системи
- в) стандартом відкритої системи

9. Базується на ідеях об'єктно-орієнтованого програмування та буває синтаксична та семантична - це

- а) інтеграція
- б) модифікація
- в) мобільність

10. Який з цих форматів **Не** є стандартним для обміну даними між САПР

- а) DXF
- б) IGES
- в) DWG

11. Який з форматів структурно будується на основі наступних розділів: Flag,Start,Global,DE,PD,Terminate:

- а) DXF
- б) IGES
- в) STEP

12. Який з форматів структурно будується на основі наступних розділів: Header,Table,Block,Entity,Terminate:

- а) DXF
- б) IGES
- в) STEP

13. Який з форматів дозволяє зберегти інформацію про всі етапи життєвого циклу виробів:

- а) DXF
- б) IGES
- в) STEP

14. Який з наведених стандартів входить в систему стандартів CALS-технологій:

- а) DXF
- б) IGES
- в) STEP

15. Яка з тенденцій **Не** є характерною для сучасного етапу розвитку програмного забезпечення САПР:

- а) зниження функціональності систем
- б) спрощення експлуатації
- в) зниження вимог до професійного рівня користувачів

2.8 Література до розділу

Категорії САПР описано в [53], сутність параметричного моделювання висвітлено в [11,31], питання відкритості САПР та стандарти обміну даними розглядаються в [5,24,36], тенденції розвитку сучасних CAD/CAM/CAE-систем наведені в [6,8,9,10,17,25].

3 СИСТЕМИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Різновиди систем геометричного моделювання

Системи каркасного моделювання були популярні на початку розвитку комп'ютерного проектування. В цих системах форма проєктованого об'єкта представляється у вигляді набору ліній та кінцевих точок, що характеризують її. Візуальна модель являє собою каркасний кресленик форми, а відповідний математичний опис – набір рівнянь кривих, координат точок та відомостей про зв'язність кривих та точок (тобто належність точок певним кривим, а також перетинання кривих).

На теперішній час каркасне моделювання - це моделювання найнижчого рівня, якому притаманна ціла низка обмежень:

- недостатність інформації про грані, заключені між ребрами;
- неоднозначність розпізнавання орієнтації та видимості граней каркасного зображення;
- відсутність відомостей про зовнішні та внутрішні поверхні модельованого об'єкта.

В той же час, каркасне моделювання є простим та швидким способом моделювання, який сьогодні здебільшого, використовується в 2D-системах при розробці креслеників. В 3D-системах воно може бути корисним для спрощеної візуалізації проєктованих об'єктів.

Поява *систем поверхневого моделювання* – ще один крок до створення реалістичного дизайну.

В цих системах математичний опис візуальної моделі містить не лише відомості про характеристичні лінії та їх кінцеві точки, але також дані про поверхні та їх зв'язність.

В сучасних системах поверхневого моделювання зазвичай використовуються наступні стандартні методи створення поверхонь: інтерполяція вхідних точок, інтерполяція криволінійних сіток, трансляція чи обертання заданої кривої. Створювані поверхні можна розділити на: елементарні геометричні поверхні, поверхні обертання, аналітичні поверхні, та поверхні довільних форм (скульптурні).

Поверхнєве моделювання дозволяє розв'язати проблеми, що виникають з каркасом: інформація про розміри складної форми тепер є доступною, а також є реальний поділ в просторі між об'єктом та порожнинами.

Системи поверхневого моделювання сьогодні використовуються для створення моделей об'єктів зі складними криволінійними поверхнями, оскільки візуальна модель дозволяє оцінити естетичність проєкту, а математичний опис - виконати розробку програм обробки поверхонь на верстатах з ЧПУ.

Не дивлячись на чисельні переваги поверхневого моделювання, його застосування в ряді випадків обмежене через складність процедури видалення невидимих ліній та проблеми відображення внутрішніх областей об'єкта.

Системи твердотільного моделювання призначені для роботи з об'єктами, які складаються із замкнутого об'єму. Математичний опис об'єкта, створеного в такій системі, містить відомості про те, де знаходиться будь-яка точка (усередині, зовні чи на границі об'єму).

На цей час твердотільне моделювання є передовим засобом, що забезпечує повний та однозначний опис тривимірної геометричної форми.

Переваги даного підходу:

- повне визначення форми та об'єму проєктованого об'єкта;
- забезпечення автоматичного видалення невидимих ліній;
- автоматична побудова двовимірних креслеників с усіма потрібними видами, перерізами, перетинами;
- автоматичне отримання значень маси, площини поверхні, центра тяжіння, моменту інерції для будь-якої деталі або виробу в цілому;
- підвищення ефективності імітації руху інструмента або робочих частин виробу;
- наявність різноманітних інструментів для створення реалістичного зображення проєктованого виробу.

Сучасні високорівневі системи твердотільного моделювання дозволяють не тільки описувати геометрію моделі, але також включати в модель властивості та інші організаційні дані (так звані дані про виріб). Приклади каркасної, поверхневої та твердотільної моделей наведено на рисунку 3.1.

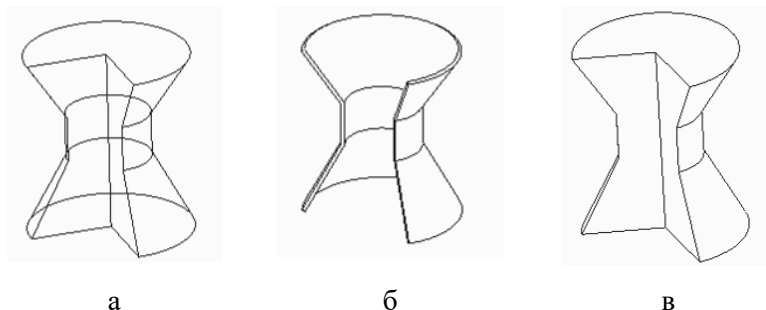


Рисунок 3.1 – Каркасна (а), поверхнева (б) та твердотільна (в) моделі об'єктів.

Тіла з замкненим об'ємом, які створюються в системах твердотільного моделювання, представляють собою *різноманіття* (manifold). Проте, на проміжних стадіях процесу проєктування часто з'являються нерізноманітні моделі. У моделі, яка не є різноманіттям, околиця деякої точки не зобов'язана бути плоскою. Основні порушення умов різноманіття:

- торкання двох поверхонь в одній точці;
- торкання двох поверхонь уздовж відкритої або замкненої кривої;
- два замкнених об'єми з спільною гранню, ребром або вершиною;
- ребро, яке виступає з точки на поверхні;
- поверхні, що утворюють структури типу сот.

Абстрактні моделі, які складаються з суміші одно-, дво-, тривимірних елементів або з елементів заниженої розмірності (соти) є зручними з точки зору розвитку творчого задуму конструктора, а також проведення аналізу.

Системи гібридного моделювання нерізноманітних об'єктів дозволяють використовувати каркасні, поверхневі, твердотільні та сотові моделі одночасно в одному середовищі моделювання, а також здійснювати переходи між геометричними елементами різної розмірності [24].

3.2 Функції роботи з об'ємними формами в системах твердотільного моделювання

Розробники систем твердотільного моделювання надають користувачам прості та природні функції роботи з об'ємними формами. Функції моделювання, що підтримуються більшістю систем твердотільного моделювання, можуть бути розділені на п'ять основних груп.

Функції для створення простих форм на основі об'ємних заготовок:

- функції створення примітивів – дозволяють обирати та створювати найпростіші об'єкти, заздалегідь визначені в системі моделювання (циліндр, конус, шар, тор, тощо);

- функції віднімання та додавання об'єму – дозволяють комбінувати примітиви за допомогою булевих операцій теорії множин (об'єднання, віднімання, перетинання та розрізання).

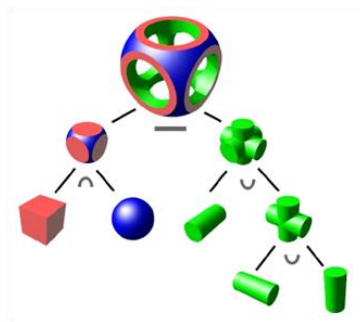


Рисунок 3.2 – Створення твердого тіла з використанням булевих операцій

Функції створення об'ємних тіл шляхом переміщення поверхонь:

- функція замітання – дозволяє створювати об'ємне тіло за допомогою трансляції чи обертання замкненої плоскої фігури, яка була задана на площині (див. рис. 3.3, а).

- функція скінінга – створює об'ємне тіло, натягуючи поверхні на задані плоскі поперечні перетини (див. рис. 3.3, б).

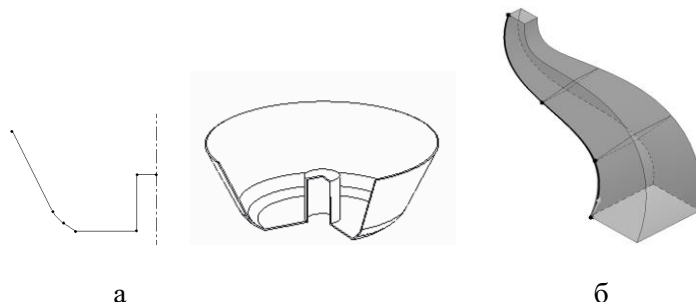


Рисунок 3.3 – Застосування функції замітання (а) та функції скінінга (б).

Функції моделювання форми :

– функції округлення або плавного спряження – дозволяють вносити зміни в існуючу модель шляхом заміни гострого ребра чи вершини гладкою криволінійною поверхнею;

– функції підняття – переміщення всієї грані об’ємного тіла чи її частини в заданому напрямку з одночасним подовженням тіла в цьому напрямку.

Функції моделювання границь – дозволяють безпосередньо маніпулювати складовими частинами об’ємних тіл (вершинами, ребрами, гранями). Вони аналогічні функціям систем поверхневого моделювання та використовуються для:

– створення плоских фігур, які служать перерізами при замітання чи скінінзі;

– для зміни форми вже існуючого тіла (функції тонкого редагування).

Функції об’єктно-орієнтованого моделювання – дозволяють створювати об’ємне тіло за допомогою елементів форм (features), які також називають *виробничими*, оскільки вони створюються за допомогою визначених технологічних операцій (наприклад, фаски, отвори, округлення, пази, тощо).

Модель, побудована за їх допомогою (див.рис.3.4), містить інформацію про наявність, розмір та розташування виробничих елементів, що дозволяє спростити планування технологічного процесу виготовлення деталі.

Набір доступних в конкретній системі елементів форм визначається сферою її використання. Для додавання в систему специфічних елементів форм використовують параметричне моделювання та вбудовану мову системи. Параметричне моделювання полягає в побудові форми шляхом введення геометричних обмежень та певних розмірних параметрів [24].

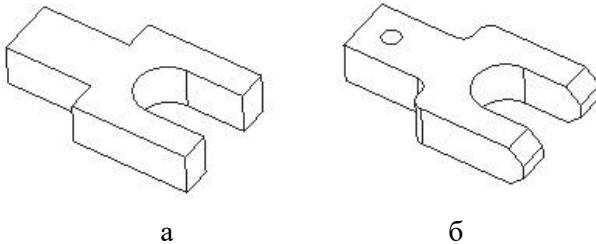


Рисунок 3.4 – Побудова твердого тіла за допомогою базового фічера видавлювання (а) та додаткових фічерів - фаски, округлення, отвору (б).

3.3 Структури даних в системах твердотільного моделювання

Для зберігання інформації про математичний опис об'ємного тіла, створеного за допомогою функцій моделювання, використовуються різні типи структур даних.

Дерево CSG (Constructive Solid Geometry) – описує історію застосування булевих операцій до примітивів. При реалізації структури дерева, для кожного примітива вказується: тип, положення екземпляра, орієнтація екземпляра, значення розмірів примітива; для кожного вузла вказуються: координати; для кожного оператора вказується тип).

Переваги дерева CSG:

- структура даних проста, а їх представлення компактне, що полегшує обробку;
- опис об'ємного тіла завжди коректний, тобто його внутрішній об'єм однозначно відокремлений від зовнішнього;

- представлення CSG може бути перетворене в структуру даних В-гер, тобто можлива інтеграція програм, що підтримують різні структури даних;

- можна реалізувати параметричне моделювання шляхом зміни параметрів примітивів.

Недоліки дерева CSG:

- оскільки в процесі моделювання можуть використовуватись тільки бульові операції, обмежується діапазон модельованих об'єктів, а також виключається можливість використання зручних функцій моделювання форми (округлення, підняття);

- отримання відомостей про граничні поверхні, їх ребра та зв'язки між цими елементами з дерева CSG потребує складних обчислень.

Розробники програмного забезпечення, що базується на представленні CSG, зазвичай створюють гібридне математичне представлення та додають відомості про границі.

В структурі даних *B-rep* (*Boundary representation*) зберігаються елементарні геометричні об'єкти (вершини, ребра, грані), а також інформація про їх зв'язність. Базове представлення В-гер базується на використанні трьох таблиць - граней, ребер та вершин.

Переваги структури В-гер:

- простота та компактність;

- можливість модифікувати структуру для використання в системах каркасного моделювання та розробки 2D-креслеників;

- наявність інформації про зовнішній та внутрішній об'єм проєктованого тіла.

Але ця базова структура не використовується в розвинених системах твердотільного моделювання через наступні недоліки:

- структура орієнтована на зберігання плоских багатогранників;

- грань з внутрішніми та зовнішніми границями (наприклад, з отворами) потребує для опису декількох списків ребер, або надлишкових з'єднувальних ребер (містків);

- кількість ребер у різних граней може відрізнитись, тому кількість стовбців в таблиці граней є змінною;

- пошук інформації про зв'язність шляхом перегляду даних, збережених в таблицях значного розміру є неефективним.

Щоб уникнути перелічених проблем та зберегти граничне представлення, створили різновиди структури В-гер – структуру напівребер та структуру крилових ребер.

Структура напівребер – список граней, кожній з яких відповідає список кілець, а для кожного кільця зберігається список напівребер (протилежно спрямовані половинки ребер).

Переваги структури даних з напівребрами:

- дозволяє зберігати дані про зв'язність вершин, ребер та граней та отримувати відомості про суміжність;
- фіксована кількість стовбців в таблиці граней;
- зручно обробляти грані з будь-якою кількістю отворів за допомогою системи кілець;
- зберігається інформація про внутрішній та зовнішній боки грані.

Структура крилових ребер – передбачає, що для кожного ребра зберігається:

- список граней, яким воно належить;
- список ребер, з якими воно має спільні вершини;
- список вершин на його кінцях.

Переваги:

- надає відомості про зв'язність вершин, ребер та граней у явному вигляді;
- розв'язано проблему невизначеності кількості ребер у граней;
- список ребер для кожної грані може бути отриманий аналізом будь-якого ребра грані та його сусідніх ребер.

Декомпозиційна модель – це сукупність елементарних об'єктів, що включає найпростіше тіло та метод об'єднання в сукупність. До типових декомпозиційних моделей з відповідними структурами даних відносяться наступні.

Воксельне представлення – це тривимірний аналог растрового представлення плоскої фігури (voxel-volume pixel). Поділ на воксели здійснюється сіткою площин, розташованих на рівній відстані перпендикулярно осям x , y , z . Вихідний куб представляється у вигляді 3D-масиву, кожному елементу якого привласнюється значення 0 або 1, в залежності від розташування елемента в тілі.

Переваги воксельного представлення:

- дозволяє описувати об'ємні тіла довільної форми;

- дозволяє легко розрахувати параметри об'ємного тіла, а також отримати результат бульових операцій;
- містить інформацію про опис тіла та простору навколо нього.

Недоліки воксельного представлення:

- різке зростання об'єму пам'яті, необхідного для збереження воксельного представлення, зі зменшенням розміру воксела;
- є наближеним описом вихідного тіла, що зумовлює його використання лише в якості зовнішнього представлення.

Представлення октантного дерева використовує наступну схему поділу простору: вихідний куб (кореневий октант) ділиться на 8-м маленьких кубів та аналізується їх положення у просторі по відношенню до тіла, що моделюється. Якщо октант знаходиться повністю усередині тіла, то він вважається “чорним”, якщо зовні – “білим”, а якщо частково усередині і зовні, то “сірим”, який ділиться далі. Процедура повторюється доти, доки не буде досягнутий заданий мінімальний розмір октанта. Після цього, октанти, що зафарбовані в чорний колір, вважаються такими, що відносяться до вихідного тіла. Кількість октантів, під які доводиться відводити пам'ять, набагато менша кількості вокселів для того ж тіла, оскільки “білі”, та “чорні” октанти далі не діляться.

До недоліків такого підходу можна віднести:

- складні геометричні обчислення розташування кожного октанта;
- результуючий об'єм моделі буде меншим або більшим за дійсний в залежності від урахування чи ігнорування “сірих” октантів після закінчення процедури поділу.

Комірчасте представлення - це метод представлення об'ємного тіла у вигляді комбінації простих елементів, на форму яких не накладаються жорсткі обмеження. Практично будь-яке об'ємне тіло можна представити за допомогою невеличкого набору простих комірок. Формування сітки скінченних елементів для методу скінченних елементів є частковим випадком комірчастого представлення [24].

3.4 Розрахунок базових інженерних параметрів

Однією з переваг об'ємної моделі є можливість розрахунку об'ємних параметрів тіла безпосередньо виходячи з його математичного опису. До об'ємних параметрів об'єкта відносять наступні.

Об'єм:

$$V = \iiint_V dV$$

Центр тяжіння:

$$x_c = \frac{1}{V} \iiint_V x dV, \quad y_c = \frac{1}{V} \iiint_V y dV, \quad z_c = \frac{1}{V} \iiint_V z dV.$$

Моменти інерції:

$$I_{xx} = \iiint_V (y^2 + z^2) dV, \quad I_{yy} = \iiint_V (x^2 + z^2) dV,$$

$$I_{zz} = \iiint_V (x^2 + y^2) dV.$$

Центробіжні моменти інерції:

$$I_{xy} = \iiint_V xy dV, \quad I_{yz} = \iiint_V yz dV, \quad I_{xz} = \iiint_V xz dV.$$

Якщо у ці визначення включити щільність матеріалу, тоді вони стануть визначеннями мас-інерційних характеристик властивостей об'єкта.

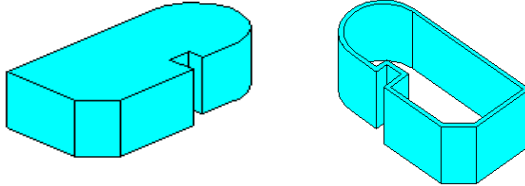
При використанні воксельного представлення або представлення октантного дерева значення об'ємного параметра для тіла в цілому може бути отримане додаванням значень для окремих вокселів або октантів за допомогою теореми про паралельну вісь.

Якщо об'єкт представлений у вигляді CSG-дерева, тоді додаються або віднімаються об'ємні інтеграли за примітивами.

Якщо використовується B-гер, тоді використовуються спеціальні методи для розрахунку об'ємного інтеграла, наприклад підхід Тиммера [24].

3.5 Практичні завдання

Завдання 1. Виконайте аналіз можливих способів побудови запропонованих моделей об'єктів в системі твердотільного моделювання за допомогою різних функцій моделювання.



Завдання 2. Побудуйте запропоновані твердотільні моделі об'єктів в системі твердотільного моделювання та розрахуйте об'ємні параметри (об'єм, центр тяжіння, моменти інерції, центробіжні моменти інерції).

3.6 Тестові контрольні запитання

1. Яка з наведених характеристик є перевагою каркасних геометричних моделей:

- а) простота та невеликий об'єм даних, що описують модель
- б) можливість представлення у просторі будь-яких складних поверхонь
- в) можливість автоматичного видалення невидимих ліній

2. Які геометричні моделі формуються з елементарних об'єктів з використанням бульових операцій:

- а) каркасні
- б) поверхневі
- в) твердотільні

3. Яка модель надає всі дані для виконання інженерних розрахунків

- а) каркасна
- б) поверхнева
- в) твердотільна

4. Яка функція моделювання створює об'ємне тіло, шляхом "натягування" поверхонь на задані перетини

- а) трансляції
- б) скінінга
- в) обертання

5. Яка з вказаних функцій Не стосується функцій створення об'ємних тіл шляхом переміщення поверхонь

- а) замітання
- б) скінінга
- в) моделювання границь

6. Яка з вказаних функцій Не стосується функцій моделювання форми

- а) округлення
- б) підняття
- в) замітання

7. Які функції називаються інакше "функції тонкого редагування"

- а) функції моделювання границь
- б) функції моделювання форми
- в) функції об'єктно-орієнтованого моделювання

8. Які функції дозволяють створювати тверде тіло за допомогою фічерів

- а) функції моделювання границь
- б) функції моделювання форми
- в) функції об'єктно-орієнтованого моделювання

9. Яка структура даних містить історію застосування бульових операцій до примітивів

- а) дерево CSG
- б) B-Rep
- в) декомпозиційна модель

10. Яка з переваг Не стосується дерева CSG

а) компактне представлення даних
б) легкість отримання відомостей про граничні поверхні, їх ребра та зв'язки між цими елементами

- в) простота реалізації параметричного моделювання

11. Яка з наведених структур Не є різновидом структури даних B-Rep

- а) структура напівребер
- б) структура крилових ребер
- в) структура октантного дерева

12. Яка з наведених структур не є різновидом декомпозиційної моделі
- а) воксельне представлення
 - б) представлення октантного дерева
 - в) комірчасте представлення
13. Метод представлення об'ємного тіла у вигляді комбінації простих елементів довільної форми – це
- а) воксельне представлення
 - б) представлення октантного дерева
 - в) комірчасте представлення
14. Оператори, які маніпулюють групами топологічних елементів – це
- а) оператори Ейлера
 - б) оператори Буля
 - в) оператори Тейлора
15. Метод обчислення границь передбачає застосування булевих операцій до структури даних
- а) CSG
 - б) B-Rep
 - в) декомпозиційної моделі

3.7 Література до розділу

Різновиди систем геометричного моделювання та їх особливості розглянуто в: [3,4,15,21,41], структури даних сучасних САПР описані в [24].

4 АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА

4.1 Інтеграція CAD та CAM - систем

З кожним роком САПР зміцнюють свої позиції в області технологічної підготовки виробництва. З появою САПР на виробничих підприємствах, залежно від рівня їх розвитку, визначилися три варіанти схеми взаємодії між конструктором і технологом (рис. 4.1).

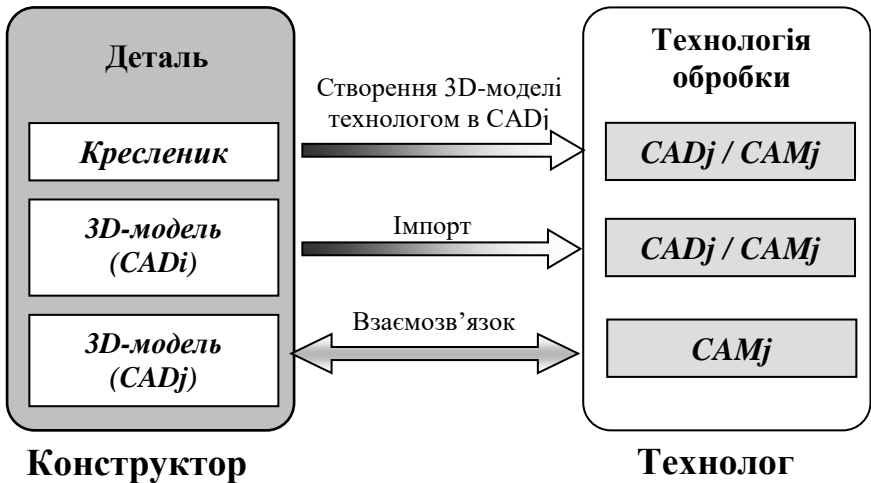


Рисунок 4.1 - Схеми взаємодії між конструктором і технологом

Перша з них відображає роботу конструктора і технолога в різних САПР і має структуру «кресленик - 3D-модель - механічна обробка». При такому підході конструктор працює тільки з двовимірними електронними моделями або креслениками. 3D-модель деталі в графічній системі створює технолог за отриманим від конструктора креслеником. Потім у цій же графічній системі технолог проектує послідовність переходів відповідно до технологічного процесу та генерує керуючу програму. Недолік такого підходу полягає в тому, що конструктор працює, зазвичай, не в параметри-

чної CAD-системі. Через це він може припускати помилки при побудові розмірних ланцюгів через відсутність прив'язок, що орієнтують ескіз. Крім того, при виявленні невідповідності спроектованої деталі технологічним вимогам, доводиться перекреслювати змінювані елементи. Для створення керуючої програми технолог витрачає час на самостійну побудову 3D-моделі. Внаслідок незурядженої роботи конструктора і технолога часто виникає невідповідність готової деталі кресленнику. Протягом багатьох років конструкторські помилки, що впливають на якість виробів, виправлялися технологами «по місцю», в ході механічної обробки і без змін в документації або розміри підганялися робітниками в процесі збирання.

Сьогодні на підприємствах частіше має місце другий варіант взаємин між конструктором і технологом «3D-модель – імпорт - механічна обробка». Конструктор і технолог зазвичай так само працюють у різних САПР. Істотною відмінністю від попередньої схеми є те, що 3D-модель будує конструктор, а технолог імпортує її у свою графічну систему, після чого проектує траєкторію руху інструмента відповідно до технологічного процесу й розробляє керуючу програму. Однак побудова 3D-моделі конструктором не є перевагою даної схеми. Не скорочується й час технологічної підготовки виробництва. Проблеми полягає в тому, що будь-яка передача інформації недосконала, а при трансляції об'єктів з однієї САПР в іншу губиться 10 - 20% даних. Тому можна лише спробувати звести цей відсоток до мінімуму. При використанні прямих інтерфейсів між двома конкретними програмами втрати мінімальні, але під час передачі приймаюча сторона адаптує дані у відповідності зі своїми можливостями й особливостями. У результаті все, що не підтримується даною системою, відкидається.

Ще одне з відомих рішень - передача даних за допомогою універсальних форматів, які повинні однаково легко сприйматися будь-якою CAD/CAM-системою. Але на практиці файл 3D-моделі, експортований з однієї системи, може некоректно читатися в іншій (наприклад, границі поверхонь, переданих через IGES, зникають, перетворюючи відмінно спроектовану деталь у набір не зв'язаних між собою поверхонь). Крім того, зазвичай універсальний формат містить внутрішні обмеження. Наприклад, IGES не підтримує твердотільні об'єкти. Це означає, що при експорті в даний формат вони

будуть розбиті на поверхні, а при імпорті «зшиті» у єдине тверде тіло. Формат Parasolid може передавати тільки твердотільні об'єкти, але не дерево побудови моделі й дані параметризації. При передачі не зберігаються площини та осі побудови, різьбові отвори, криві поверхні, гравірування. Часто зустрічається зміна габаритних розмірів. Все це ускладнює роботу технолога. У нього немає можливості повністю проаналізувати модель на технологічність, побачити простановку розмірів для вірного визначення послідовності переходів і технологічних баз через відсутність історії побудови 3D-моделі деталі. При втраті параметризації елементів форм деталі технолог не може їх відновити й внести зміни в геометрію. У цьому випадку йому доводиться повторно будувати модель деталі у своїй робочій САПР. Над рішенням завдання по усуненню недоліків трансляції моделей деталей з однієї системи в іншу працюють різні розробники САПР, але поки вони далекі від досконалого рішення. Зараз широко застосовуються непараметризовані CAD-системи, формати яких підтримуються конкретною CAM-системою. Як відзначалося вище, використання непараметризованих CAD-систем приводить до виникнення ряду конструкторських помилок, що є неприпустимим в умовах сучасної конкуренції. Хочеться відзначити, що далеко не всі параметризовані САПР дозволяють попередити конструкторські помилки.

Щоб уникнути проблем при передачі даних потрібно відмовитися від самого факту передачі даних. Тобто перейти до використання на підприємстві єдиної САПР, побудованої на комплексному рішенні від одного розробника. Всі модулі такої системи ідеально погоджені між собою, отже, проблем з передачею даних з модуля в модуль не виникає. Це відповідає третій схемі взаємозв'язку конструктора з технологом - «3D-модель - механічна обробка». Перший крок технолога при проектуванні технологічного процесу - завантаження моделі деталі, аналіз технологічності та ознайомлення з конструкторськими базами. Далі фахівець визначає тип операції. Для цього йому пропонується вибрати тип верстата, кількість осей обробки і значення корекції інструмента. Після визначення точки відліку й площини відведення здійснюється вибір стратегії обробки. Вона визначається залежно від оброблюваного елемента форми. Кожний перехід обробки технолог може візуалізувати, переглянути траєкторію руху інструмента на комп'ютерній моделі та

переконатись у правильному виконанні механічної обробки. Після цього, технолог може приступати до автоматизованого оформлення документації та регенерації керуючої програми в G-кодах.

Сучасні ефективні засоби автоматизації технологічної підготовки виробництва спрощують роботу технолога та дозволяють значно заощаджувати час [29].

4.2 Особливості організації САМ-систем

На цей час можна відзначити низку змін, що відбуваються в галузі застосування САМ-систем.

Спостерігається масовий перехід до використання багатівісових оброблювальних центрів токарної та фрезерної групи, що дозволяють максимально концентрувати обробку заготовки на одному робочому місці. Можливість повної обробки складних деталей за одну-дві операції не тільки підвищує точність отримання розмірів, але і скорочує тривалість виробничого циклу виготовлення деталей. Замість декількох верстатів можна придбати один багатівісовий центр, вартість якого правда, є значно більшою за вартість верстата традиційного компонування. Завдяки цьому, кількість автоматизованих верстатів та оснащення скоротилася на виробництві.

В галузі інструментального виробництва з'явилися фірми – виробники високопродуктивного різального інструменту, що гарантує задану геометрію ріжучої кромки та оптимальність рекомендованих режимів обробки. Значна кількість підприємств з ряду причин відмовляється від власного інструментального виробництва, орієнтуючись при цьому на типорозміри та характеристики інструмента, що пропонується на ринку.

Завдяки широкому використанню 3D-моделей, більш ефективно розв'язуються питання розрахунку керуючих програм для верстатів з ЧПУ, а також формування алгоритмів обробки окремих конструкторсько-технологічних елементів, що складають 3D-модель.

Для традиційних САМ-систем, які базуються на автоматизації технологічних переходів, послідовність дій технолога є наступною:

- в інтерактивному режимі підбираються об'єкти обробки для кожного переходу;
- обираються засоби обробки (різальний інструмент, стратегія та режими обробки);
- формується файл, що містить інформацію про траєкторію руху інструмента та технологічні команди;
- постпроцесор перетворює цю інформацію в керуючі коди конкретного верстата.

Перевагою такого підходу є універсальність інформації та можливість її використання для різних верстатів, що мають близькі технологічні можливості.

Але при використанні багатовісєвих оброблювальних центрів увагу слід приділити ретельному проектуванню операційної технології саме для цього верстата, враховуючи його специфіку. При цьому можливо використовувати представлення про деталь як сукупність об'ємних конструкторсько-технологічних елементів (КТЕ), для кожного з яких існує алгоритм обробки. Справа лишається за розробкою стандартів, які б описували структуру цих елементів та містили вимоги до точності та шорсткості поверхонь.

Відмінності САМ-систем, які б відповідали сучасним виробничим умовам, наступні:

- стандартизація даних про деталь на основі формалізації параметрів КТЕ;
- створення конфігурацій обробки, призначених для окремих робочих місць (або груп подібних робочих місць), які б враховували використовуваний різальний та допоміжний інструмент.

Подібні САМ-системи (наприклад, FeatureCAM від Delcam), організовані на основі автоматизації задач, пов'язаних з обробкою КТЕ для специфічних умов використовуваного обладнання, можуть суттєво підвищити ефективність технологічної підготовки виробництва для багатофункціональних верстатів з ЧПУ [26].

4.3 Числове програмне управління

Числове програмне управління (ЧПУ) – це використання закованої в числовому вигляді інформації при автоматичному ке-

руванні позиціонуванням обладнання. На числовому програмному управлінні базуються засоби обробки матеріалів різанням, засоби швидкого прототипування, засоби збирання та ін..

Програмою обробки деталі називається набір операторів, які можуть інтерпретуватися керуючою системою верстата і перетворюватися на сигнали, що переміщують механізми верстата.

Програма містить:

- геометричну інформацію про деталь;
- дані про переміщення різального інструменту або рух деталі;
- технологічні параметри (швидкість різання, швидкість подачі, стан системи охолодження та ін.).

Типова верстатна система з ЧПУ включає верстат і блок управління верстатом (див. рис. 4.2).

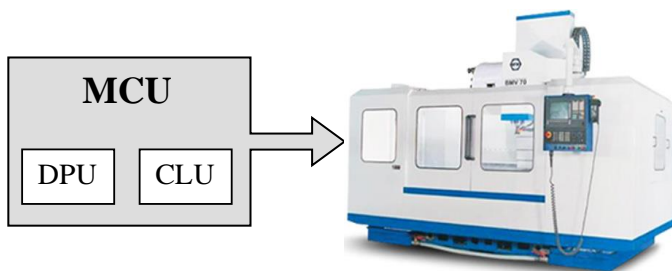


Рисунок 4.2 – Типова верстатна система з ЧПУ

Блок управління верстатом (MCU - machine control unit) зчитує програму обробки деталі та керує роботою верстата. Ці операції виконуються двома окремими модулями.

Модуль обробки даних (DPU - data processing unit) зчитує програму обробки деталі, декодує оператори, оброблює декодовану інформацію, передає в модуль CLU дані про положення за кожною з осей верстата, а також про напрямок руху, подачу і додаткові керуючі сигнали. DPU складається з пристрою введення даних, лан-

цюга читання даних і декодуючих ланцюгів, що визначають необхідний зсув по осях.

Замкнена система автоматичного регулювання (CLU - control loop unit) приймає дані від DPU, перетворює їх в керуючі сигнали, управляє приводними механізмами верстата, приймає сигнали зворотнього зв'язку, запитує від DPU чергові інструкції з програми обробки деталі. CLU складається з інтерполятора, ланцюгів контролю положення по всіх осях, ланцюгів контролю швидкостей, пристроїв контролю додаткових функцій.

Контролери ЧПУ діляться на дві основні категорії:

- *системи позиційного регулювання* – використовуються, коли траєкторія руху інструмента щодо деталі не має значення (свердлення, пробивання, нарізання різьби, встановлення компонентів на друковану плату, тощо).

- *системи контурного управління* – використовуються, коли важлива траєкторія руху інструмента відносно деталі, при цьому потрібне одночасне управління по декількох осях, причому з незалежними швидкостями (токарні, фрезерні, шліфувальні, зварювальні операції, тощо).

Існують наступні типи систем ЧПУ.

ЧПУ типу NC (numerical control) – це верстати першого і другого покоління, які зчитують програми з перфострічки, оброблюють програми по одній, не дозволяючи зберігати їх в MCU.

ЧПУ типу CNC (computer numerical control) – це верстати третього покоління, які мають блок пам'яті MCU, вимагають одnorазового завантаження програми, дозволяють обмінюватися даними між блоками інтегрованих систем.

ЧПУ типу DNC (direct/distributed numerical control) – це система виробництва, що базується на технології взаємодії центрального комп'ютера з верстатами.

Пряме (direct) числове управління – характеризується наступними особливостями:

- сильна взаємодія центрального комп'ютера з верстатами;
- центральний комп'ютер отримує дані з власного пристрою зберігання або із зовнішнього джерела;
- блоки команд пересилаються від центрального комп'ютера до верстатів.

Розподілене (distributed) управління характеризується наступними особливостями:

- центральний комп'ютер повністю завантажує на верстати типу CNC програми обробки, які там і можуть зберігатися;
- комп'ютери-сателіти збільшують швидкодію системи, дозволяють працювати з великими файлами, об'єднувати в мережу більше верстатів, надають звіти про роботу верстатів центральному комп'ютеру [24].

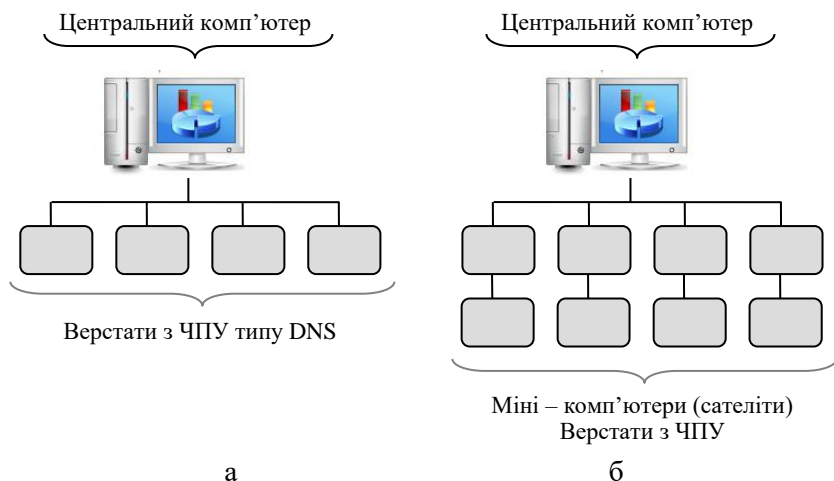


Рисунок 4.3 – Схема прямого (а) і розподіленого (б) числового управління

4.4 Ручне складання програм обробки деталей

Програма обробки деталі містить відомості про геометричну форму деталі та про траєкторію переміщення різального інструмента відносно заготовки. Для коректного опису цієї інформації важливо правильно задати систему координат. Три основні осі переміщення називаються X , Y , Z і утворюють праву систему координат ($+Z$ відповідає віддаленню інструмента від заготовки). Додаткові осі позначаються традиційно U , V , W ; можуть існувати також осі

обертання A, B, C рівнобіжні осям X, Y, Z . Верстати класифікуються у відповідності з кількістю координат, необхідних для завдання положення та орієнтації різального інструмента.

Контролер зчитує інструкції у вигляді послідовності блоків, що містять команди. Блоком називається рядок слів програми обробки. Кожна команда позначається літерою, за якою слідує певне число. Розглянемо найбільш поширені ідентифікатори (коди) команд.

Послідовний номер (N) – використовується для позначення блоків програми.

Попередні команди (G) – готують МСU до певної операції, зазвичай пов'язаної з переміщенням різального інструмента.

Координати (x, y, z, A, B) – передають дані про положення різального інструменту і його орієнтацію. При цьому додаткові слова використовуються, коли кількість степенів свободи перевищує три.

Подача (F) – задає швидкість подачі різального інструмента.

Швидкість (S) – задає швидкість обертання різального інструмента.

Вибір інструмента (T) – для верстатів з пристроєм автоматичної зміни різального інструмента задає інструмент, що використовується.

Інші команди (M) – код використовується для визначення конкретного режиму роботи.

Команди об'єднуються в блоки, які можуть мати один з декількох форматів:

– *фіксований послідовний формат* – всі блоки однакової довжини з однаковою кількістю символів;

– *формат поблочної адресації* – усуває надмірність інформації в послідовних блоках за допомогою кодів змін;

– *табульований послідовний формат* – допускає зміну довжини блоків, передбачає використання символів табуляції (ТАВ), та кінця блоку (ЕОВ);

– *формат пословної адресації* – найбільш популярний формат, в якому кожне слово починається з букви, що позначає його тип, за яким слідує вміст слова:

Проблеми даного підходу:

– існуючі контролери відповідають різним стандартам, тому один і той же код може по різному інтерпретуватись;

- трудомісткість і значні часові витрати на розробку програм обробки;

- оскільки програма описує траєкторію руху інструменту, а не геометрію деталі, потрібні додаткові арифметичні та тригонометричні розрахунки;

- необхідно додавати додаткові точки для з'єднання розрахункових траєкторій.

Спростити процедуру ручної розробки програми дозволяють спеціальні функції сучасних контролерів:

- функція компенсації радіусу різального інструмента дозволяє програмувати безпосередньо геометрію деталі, а не траєкторію переміщення центра різального інструмента;

- функція додавання сегментів кривих або їх подовження у тих випадках, коли ділянки траєкторій, побудовані з урахуванням відступів, не перетинаються;

- використання фіксованих циклів, що містять повторювані типові операції;

- підтримка послідовностей команд, визначених користувачем (макросів) [24].

4.5 Розробка програм на мові АРТ

Однією з популярних мов високого рівня для програмування верстатів з ЧПУ є АРТ (*Automatically Programmed Tool*).

Програма на АРТ складається з операторів, які поєднуються у п'ять груп:

- такі, що ідентифікують – задають назву деталі й ім'я конкретного постпроцесора;

- геометричні – визначають істотні для операцій машинної обробки геометричні особливості деталі;

- оператори переміщень – управляють рухом різального інструменту відносно геометрії деталі;

- оператори постпроцесора – задають параметри обробки;

- додаткові оператори – управляють допоміжними функціями верстата.

АРТ передбачає також засоби для виконання арифметичних обчислень, організації циклів і виклику підпрограм (макросів).

Таким чином, при використанні мов високого рівня, замість незручних для запам'ятовування кодів, використовуються зрозумілі команди та зручні математичні символи.

Для реалізації даного підходу необхідно вирішити наступні задачі:

- програміст визначає геометрію деталі в термінах базових геометричних елементів, загальну траєкторію руху різального інструмента, а також технологічні параметри;

- програміст складає програму обробки (кодує вихідні дані мовою програмування й одержує вихідний код);

- вихідний код компілюється у машинно-незалежний список елементарних переміщень інструмента, а також допоміжних відомостей про керування верстатом. Цей список називається файлом координат різця (CL-Cutter Location Data File);

- CL-файл обробляється постпроцесором, у результаті чого виходять команди, призначені для керування конкретним верстатом. Одержуваний файл – MCD (Machine Control Data).

Основним недоліком описаного підходу є трудомісткість кодування геометрії деталі та траєкторії руху інструмента на мові програмування [24].

4.6 Генерація програми обробки на базі даних CAD-систем

В сучасних інтегрованих CAD/CAM – системах реалізовано можливість генерації програми обробки з використанням побудованої CAD - моделі. При цьому, складання програми здійснюється в такій послідовності.

Етап 1. Виділення елементів геометрії деталі, особливо важливих при машинній обробці; у разі необхідності - редагування або розширення геометрії деталі.

Етап 2. Визначення геометрії різального інструменту (завичай шляхом вибору з бібліотеки).

Етап 3. Визначення потрібної послідовності операцій обробки; планування необхідної траєкторії руху різального інструменту з відповідними параметрами обробки.

Етап 4. Обчислення координат точок на траєкторії з урахуванням обраного різального інструмента та геометрії деталі.

Етап 5. Перевірка траєкторії за допомогою анімації, корегування програми.

Етап 6. Формування CL-файлу, що далі обробляється постпроцесором, у результаті чого виходить файл у машинному коді, що передається контролеру верстата.

Сучасне програмне забезпечення САМ-систем дозволяє програмісту виконати імітацію процесу обробки, візуально перевірити траєкторії руху різального інструменту та проконтролювати, що:

- різальний інструмент не знімає з заготовки більше, ніж потрібно матеріалу;
- різальний інструмент не зіштовхується із затисками й кріпленнями;
- різальний інструмент проходить в глибокі пази й не зачіпає жодних ребер;
- обрані траєкторії є ефективними.

Існує декілька способів моделювання процесу обробки:

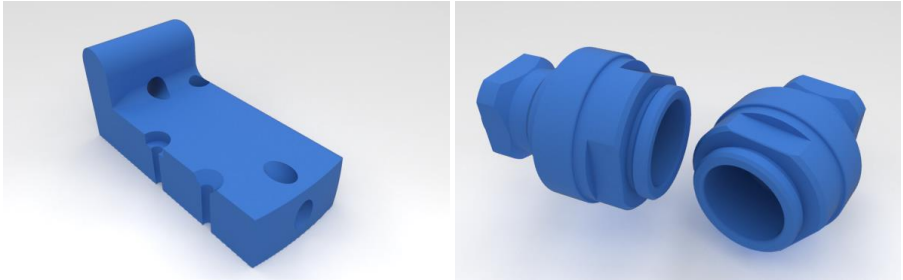
- відображення траєкторії різального інструменту разом з геометричною моделлю деталі - надає уявлення про рух інструменту, але не про зміну заготовки в процесі обробки;
- відображення об'ємної моделі деталі, що трансформується під впливом різання - дозволяє порівняти отриману деталь із заданою, але вимагає значних обчислень.

Для підвищення ефективності моделювання другим способом використовують різні методи апроксимації (метод Андерсена, підхід Чаппеля) [24].

4.7 Практичні завдання

Завдання 1. Розробити програму обробки прямокутної пластики на верстаті з контурним регулюванням з використанням всіх вивчених підходів. Вхідні дані: довжина 120 мм, ширина 40 мм, товщина заготовки 10 мм, нижня грань характеризується рівнянням: $z = 0$. Параметри контролера, інструмента, швидкості, подачі задайте самостійно.

Завдання 2. Для запропонованих САМ-моделей деталей виконайте розробку програм обробки різними відповідними методами (точіння, фрезерування, свердління) в середовищі САМ-системи.



4.8 Тестові контрольні запитання

1. Який варіант взаємин між конструктором і технологом сьогодні частіше має місце на підприємствах:
 - а) «3D-модель – імпорт - механічна обробка»
 - б) «кресленик - 3D-модель - механічна обробка».
 - в) «3D-модель - механічна обробка»
2. Традиційні САМ-системи базуються на:
 - а) автоматизації технологічних переходів
 - б) автоматизації обробки КТЕ
 - в) автоматизації оформлення технологічної документації
3. Система виробництва, яка включає центральний комп'ютер, що керує одночасно декількома верстатами, називається:
 - а) NC
 - б) CNC
 - в) DNC
4. Програма обробки деталі на верстаті з ЧПУ описує:
 - а) траєкторію руху різального інструмента
 - б) геометрію деталі
 - в) геометрію заготовки
5. Використовується, коли траєкторія руху інструмента відносно деталі має важливе значення:
 - а) система позиційного регулювання
 - б) система контурного управління
 - в) будь-яка система

6. Який формат блоків команд є найбільш популярним для використання в сучасних контролерах CNC:
- фіксований послідовний
 - блочної адресації
 - табульований послідовний
 - послівної адресації
7. Яка з характеристик **Не** стосується ручного методу розробки програмного забезпечення для ЧПУ:
- зручні для запам'ятовування коду (ідентифікатори) команд
 - необхідність в додаткових розрахунках
 - трудомісткість та тривалість розробки програм
8. В якому з варіантів правильно наведено загальну форму геометричних операторів АРТ:
- символ=геометрія/опис
 - геометрія=символ/опис
 - опис=геометрія/символ
9. З яких операторів мови АРТ здебільшого складається програма обробки для верста з ЧПУ:
- геометричні
 - переміщень
 - постпроцесора
10. В якій послідовності формують файли при автоматизованому складанні програм для верстатів з ЧПУ:
- source file/ CL-file/ mcd-file
 - source- file/ mcd-file / CL-file
 - mcd-file / source- file/ CL-file
11. Машинно-незалежний список елементарних переміщень інструмента та допоміжних відомостей про управління верстатом:
- source file
 - mcd-file
 - CL-file
12. Містить команди, що призначені для управління конкретним верстатом з ЧПУ:
- source file
 - mcd-file
 - CL-file
13. Який метод розробки програмного забезпечення для ЧПУ передбачає використання бази даних САД-системи:

- а) ручний
- б) автоматизований
- в) комп'ютеризований

14. Яке з тверджень про наслідки збільшення кількості точок на траєкторії руху різального інструмента є неправильним:

- а) точніше форма
- б) більше довжина програми
- в) більше швидкість передачі програми

4.9 Література до розділу

Інтеграція CAD та CAM-систем описана в [29,30], особливості організації сучасних CAM-систем в [2,26], основні поняття та визначення по верстатах з ЧПУ наведено в [24,31,52], підходи до складання програм обробки висвітлено в [24,31].

5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНЖЕНЕРНОГО АНАЛІЗУ ТА РОЗРАХУНКІВ

5.1 Основні тенденції розвитку САЕ-систем

Аналіз динаміки розвитку САЕ-систем дозволяє виділити наступні основні тенденції та актуальні напрями:

- багатодисциплінарність;
- підвищення швидкості та ефективності;
- підвищення доступності важких технологій.

Будь-яка з представлених на сьогоднішньому ринку САЕ-систем при своїй появі була спеціалізованою та орієнтованою на проблематику тільки однієї області. Однак, в процесі розвитку програмних продуктів стала очевидною необхідність організації зв'язку між різнорідними типами аналізу. Практично реалізувати таку можливість можна двома шляхами, а саме:

- багатодисциплінарністю в рамках одного пакету;
- інтеграцією різнорідних пакетів.

Обидва напрями, які є взаємодоповнюючими, активно підтримуються в даний час усіма відомими виробниками програмного забезпечення. Але, через певні труднощі при розробці власним коштом багатьох різнорідних рішень, практично всі відомі розробники програмного забезпечення в першу чергу прагнуть створити прямі інтерфейси до відомого ПЗ в суміжних областях.

Загальні вимоги, які пред'являються до будь-якого програмного продукту на сучасному ринку, можуть бути переформульовані стосовно САЕ-систем наступним чином: мінімізація часових витрат при максимальній кількості прийнятих інженерних рішень і максимальній всебічності та глибині аналізу.

Як відомо, процес рішення будь-якої задачі складається з трьох етапів:

- постановка задачі і підготовка вхідних даних (створення моделі, додавання початкових і граничних умов та навантажень, тобто препроцесінг);
- розв'язок задачі;
- перегляд і обробка результатів розрахунку (постпроцесінг).

Відомо, що при вирішенні практичних завдань часові витрати в процентному відношенні складають:

- препроцесінг - 40%,
- розв'язок задачі - 20%;
- постпроцесінг - 40%.

Перший і третій етапи, а саме пре-і постпроцесінг (близько 80% сумарного часу), в більшості випадків здійснюються засобами єдиного графічного інтерфейсу. Отже, визначальним параметром є інтенсивність користувальницької роботи з графічною оболонкою програми, а для скорочення загального часу необхідно підвищувати:

- ефективність робочого оточення;
- ефективність вирішувачів (solver);
- спектр можливостей.

Найбільш очевидним і необхідним є розвиток інструментарію графічного інтерфейсу. Однак, згідно з проведеними дослідженнями, просте додавання нових, нехай навіть дуже ефективних сервісних функцій, починаючи з деякої їх критичної кількості, не призводить до інтенсифікації роботи користувача. Розробники ПЗ постають перед необхідністю подальшого розвитку сервісних засобів і підвищення мобільності доступу до них, що втрачається через надмірне ускладнення структури графічної оболонки.

Таким чином, перший рівень автоматизації, що полягає у наданні користувачеві безлічі інструментів для виконання окремих операцій (додавання твердих тіл, розбиття на скінченні елементи, завдання навантажень і т.і.), виявляється недостатнім. Одним із знайдених ефективних рішень, яке в першу чергу було випробувано на простому ПЗ, а тепер переходить у важкі розрахункові комплекси, є технологія Wizards. Wizards-технологія переводить автоматизацію робіт на наступний рівень - автоматизацію не окремих операцій, а логічно структурованих певних стандартних послідовностей дій. При цьому користувач діє в жорстких рамках, необхідних для виконання операцій, причому можливість помилки виключається, оскільки система не дозволяє перейти до подальшого етапу без визначення всіх необхідних параметрів на попередньому. На даний момент більшість розробників важкого ПЗ ефективно впроваджують Wizards.

Швидкість рішення задачі визначається можливостями реалізованого вирішувача алгоритму. Головна вимога до вирішувачів - це їх здатність швидко і стійко вирішувати задачі великої розмірності. В даний час звичайним є рішення систем рівнянь, що містять декілька сотень тисяч невідомих на персональному комп'ютері. Тому, мабуть, найважливіший напрям сучасних розробок - паралелізація обчислень шляхом декомпозиції розрахункових завдань на мережевих кластерах (тобто системах, що складаються з об'єднаних в мережу декількох однакових або різнорідних комп'ютерів). Сучасний стан ринку паралельних алгоритмів характеризується такими рисами:

- відсутністю серед виробників багатопроцесорних комплексів явного лідера;
- відсутністю єдиних стандартів і чіткого пріоритету у розвитку (на даний момент існує безліч різних комп'ютерних архітектур);
- проблемами паралелізації програмних кодів (широке коло завдань вимагає розробки принципово нових алгоритмів, орієнтованих безпосередньо на паралельні обчислення).

Переважною тенденцією для програмних засобів з обчислювальної механіки твердого та рідкого тіла є все більше включення нелінійних алгоритмів і більш багатий інструментарій з моделювання нестационарних, динамічних процесів. Достатньо ознайомитися з позитивними змінами в універсальних розрахункових комплексах за останній час, щоб зрозуміти, що практично всі вони включають нелінійні моделі матеріалів, методів вирішення і т.і. Оскільки жодне явище реального світу не є лінійним, багатство нелінійного інструментарію означає повноту і точність опису фізики реальних подій.

Доступність важких технологій є комплексною характеристикою, що дозволяє знизити вартість програмного забезпечення, необхідних для його роботи апаратних платформ і вимог до освітнього рівня користувачів.

Як і на ринку CAD/CAM, в області CAE на швидко зростаючий і перспективний сектор ринку середніх систем почали активно проникати виробники важких пакетів, пропонуючи свої більш дешеві і спрощені версії. При цьому, на відміну від ринку CAD/CAM-систем середнього рівня, де проявляються одночасно два процеси -

прагнення середніх по всіх позиціях максимально наблизитися до тяжких пакетів і створення «молодших братів» великих пакетів, для CAE діє переважно остання тенденція.

Виробники важких CAE-пакетів пішли по шляху інтеграції розрахункових модулів в середовище CAD з виключенням достатньо широкого кола можливостей CAE за рахунок максимальної інтеграції з CAD-системою. При цьому основною ідеєю таких модулів є максимальне спрощення роботи, що дозволяє тим, хто не має глибоких знань в області обчислювальної механіки, проводити розрахунок виробу, не виходячи із знайомого середовища. Автоматизація в даному випадку відіграє роль захисту від помилок недосвідченого користувача. Функції контролю та захисту побудовані на певних правилах і нормах, вироблених у вузькому колі розрахувачів і закладених в модулі у вигляді програмних рекомендацій і обмежень. За останні роки практично всі розробники випустили подібні продукти.

З ростом продуктивності комп'ютерної техніки, системи автоматизації інженерного аналізу, які є стимулятором її розвитку, все ближче підходять до практично повністю автоматизованих комплексів, що моделюють події в масштабі реального часу та не розчленовують комплексні проблеми на чисто міцнісні, теплові, газодинамічні і т.і., з візуалізацією результатів розрахунку на рівні професійних програм анімації [19].

5.2 Огляд відомих FEA-пакетів

Метод скінченних елементів (MCE) являє собою ефективний чисельний метод розв'язування інженерних і фізичних задач. Область його застосування простирається від аналізу напружень в конструкціях літаків або автомобілів до розрахунку таких складних систем, як атомна електростанція. За його допомогою розглядається рух рідини по трубах, крізь греблі, в пористих середовищах, досліджується течія стиснутого газу, вирішуються завдання електростатики і змащування, аналізуються коливання систем.

Пакети скінченно-елементного аналізу грають найбільш відповідальну роль серед усього різноманіття CAD/CAM/CAE-програм. Коло розв'язуваних ними завдань охоплює майже всі сфе-

ри інженерних розрахунків: міцність, коливання, стійкість, динаміка, акустика, гідродинаміка, аеродинаміка і т.д.

Представити повний список спеціалізацій скінченно-елементних програм, як і повний список всіх пакетів *програм скінченно-елементного аналізу (Finite Element Analysis - FEA)*, фактично нереально. Однак провести короткий огляд найбільш поширених FEA-елементних програм не тільки можливо, але і необхідно. У користувачів (або потенційних користувачів) FEA-пакетів часто складається думка про перевагу одного пакету над іншим, сформоване в більшій мірі відсутністю інформації про конкуруючі програмні продукти. Велику роль в цьому відіграє та обставина, що в більшості технічних ВНЗ, офіційно використовують тільки один із пакетів, навіть і не розглядаються можливості інших. Виникають необґрунтовані міфи про переваги і галузі застосування цих систем.

Безперечно, лідером на ринку FEA-програм є пакет ANSYS. Про це говорить і кількість легальних користувачів (понад мільйон), і заявлені великі можливості, і компанії, що використовують даний пакет, а також чимала ціна (зазвичай асоціюють з високою якістю) та найвищі вимоги до обладнання.

Більш детальний опис пакета ANSYS можна знайти на офіційному сайті компанії ANSYS або на сайті українського розповсюджувача (інженерної компанії ТЕХНОПОЛІС, м. Київ) - <http://www.tpolis.com>. Реальною перевагою цієї системи є найбільш повна документація і система допомоги, що дозволяє, маючи добрі базові (наприклад, по механіці) знання, використовувати програму без звернення в службу підтримки користувачів.

Зрівнятися з ANSYS (включаючи всі його модифікації в інших пакетах) за кількістю установок або легальних користувачів може тільки група скінченно-елементних програм з торговою маркою NASTRAN. Цю марку мають такі найпоширеніші пакети: MSC/NASTRAN і UAI/NASTRAN. Менш поширені NE/NASTRAN і ME/NASTRAN. Незважаючи на значно нижчу ціну, реальні можливості цих пакетів ні в чому не поступаються пакету ANSYS, а іноді і перевершують у розвитку і можливостях. Поступаються системи ANSYS пакети NASTRAN, мабуть, тільки обмеженою кількістю підтримуваних комп'ютерних платформ і операційних систем.

Два інших пакета, що не одержали належного поширення, але мають своїх користувачів - це Algor (французька назва Aldan) - розробка компанії Algor і пакет COSMOS/M - розробка компанії Structural Research and Analysis Corp. Свого часу COSMOS/M був витіснений пакетом UAI/NASTRAN, а Algor - пакетом DesignSpace (полегшений варіант пакету ANSYS).

Реальні незалежні тести всіх розглянутих програм можна знайти в мережі Інтернет, проте особливого розходження як у швидкості, так і в точності розрахунків ви не виявите. Одне з виключень - дуже повільний генератор сіток Algor. За іншими параметрами відмінність всіх програм коливається в діапазоні 10%. Відсутність значного розходження у швидкодії та точності FEA-програм пояснюється використанням стандартних і широко відомих алгоритмів розв'язання задач методом скінченних елементів. Математичний апарат, використовуваний в цих пакетах, також однаковий і широко відомий. Очікувати принципового прориву того чи іншого пакету не доводиться.

Існують також freeware-програми скінченно-елементного аналізу.

DANFE - програма для аналізу зусиль, деформацій, напружень і зміщень в конструкціях методом скінченних елементів. Програма надається як відкомпільована (готова до роботи на персональному комп'ютері), так і у вигляді текстів, готових до компіляції на будь-якому комп'ютерній системі, що має Fortran-компілятор. Програма існує і розвивається більше 40 років, розробляється в університеті Манчестера, Великобританія (University of Manchester UK). Програму можна завантажити безкоштовно, доступні також документація та приклади.

За багатьма параметрами ця програма перевершує комерційні. Безперечними перевагами є: доступний вихідний текст, підтримка багатопроекторності, наявність елементів із змінною в часі геометрією (ефекти самонапруження, плинності, релаксації без зовнішніх впливів), солідний період (більше, ніж ANSYS) апробації, авторитетний для всього світу виробник.

Інша програма - Mefisto, розробник - лабораторія чисельного аналізу університету П'єра і Марії Кюрі (Париж, Франція). Існують версії для платформ: DEC, IBM, SUN, PC. Працює під UNIX-

системами за наявності бібліотеки X11 (для Linux і FreeBSD - стандартно поставляється бібліотека).

Приємною особливістю безкоштовних програм є допомога розробників при проблемах у використанні, неприємною - відсутність реакції на прості питання, описані в документації. У комерційних продуктах, навпаки, служба підтримки з задоволенням процитує вам керівництво користувача, але промовчить у відповідь на складне питання! Інший важливий момент: купуючи комерційну скінченно-елементну програму, ви купуєте чорний ящик, що там - невідомо, ви можете сподіватися тільки на сумлінність розробника. У безкоштовних програмах, навпаки, ви можете не тільки перевірити весь текст програми, але і змінити деякі фрагменти.

Знання основ методу скінченних елементів і сучасних програмних засобів, що дозволяють на його основі вирішувати різноманітні завдання, у наш час для інженера є абсолютно необхідним [35].

5.3 Використання пакету Mathcad для інженерних розрахунків

Mathcad є світовим стандартом для інженерних розрахунків, який використовують більше 1,5 млн. фахівців у всьому світі.

Унікальний візуальний формат Mathcad і інтерфейс, що інтегрує стандартні математичні символи, текст і графіку на одному аркуші - робить Mathcad ідеально відповідним для фіксації знань, повторного використання розрахунків та інженерного співробітництва.

Mathcad є програмним забезпеченням для інженерних розрахунків, яке управляє інноваціями і пропонує значні переваги для персональної продуктивності і продуктивності процесів розробки виробів та інженерних проектів.

На відміну від самостійно розроблених розрахункових інструментів та розрахунків за допомогою електронних таблиць, Mathcad дозволяє інженерам одночасно проектувати й документувати інженерні розрахунки, завдяки всеосяжній математичній функціональності в поєднанні з динамічними обчисленнями.

Новітня версія Mathcad Prime 2.0 містить нові потужні функції для обчислень і розширені можливості для швидкого вивчення,

прискорення роботи з інтерфейсом і документування розрахунків. Крім того, Mathcad Prime 2.0 інтегрується з іншими, кращими в своєму класі, інженерними продуктами PTC, такими як Creo® та Windchill®, для забезпечення підвищеної продуктивності, удосконалення ефективності процесів та кращої взаємодії між користувачами і командами розробників.

Mathcad Prime 2.0 містить наступні поліпшення:

- зв'язок з Excel: безшовна та якісна реінтеграція Mathcad і Excel дозволяє користувачам отримувати доступ і використовувати дані з існуючих електронних таблиць, виключає потребу в конвертації даних для використання в Mathcad;

- символні обчислення: автоматизація процесу явного виводу для маніпулювання складними рівняннями, що призводить до зниження кількості помилок і підвищує ефективність;

- 3D зображення (графіки): дозволяє інженерам легко маніпулювати, аналізувати і візуалізувати складні тривимірні дані для кращого розуміння і документування;

- області, згортаються: дозволяє користувачам краще керувати вмістом і мати більший контроль над документом, згортаючи (приховуючи з погляду) подробиці, які не є суттєвими в даний момент, підвищуючи тим самим продуктивність праці і зручність співпраці;

- удосконалення обчислень, включаючи більш високу продуктивність, підтримку 64bit, оптимізацію розв'язувача та багато точність.

В новій версії пакету скорочено час обчислень, знято обмеження на розмір набору даних, що дозволяє виконати складніші і об'ємніші розрахунки на етапі опрацювання концепції. Більша кількість варіантів може бути оцінена з більшою вірогідністю, що призведе до скорочення помилок і проблем, які виникають наприкінці робочого проєкту.

5.4 Практичні завдання

Завдання 1. Виконайте дослідження функціональних можливостей програм скінченно-елементного аналізу, що вільно розпо-

всюджуються. Протестуйте роботу декількох програм, зробіть висновки.

Завдання 2. Ознайомтесь з можливостями програмування в середовищі MathCAD. Реалізуйте будь-яку інженерну методику розрахунку параметрів проєктованого об'єкта.

5.5 Тестові контрольні запитання

1. Необхідно розв'язати задачу методом скінченних елементів. Яка послідовність дій є вірною?

а) дискретизація, алгебраїзація, розв'язок системи алгебраїчних рівнянь

б) розв'язок системи алгебраїчних рівнянь, алгебраїзація, дискретизація

в) алгебраїзація, дискретизація, розв'язок системи алгебраїчних рівнянь

2. При автоматичній побудові сітки скінченних елементів, який з методів не стосується методів створення вузлів:

а) Лі

б) Кавендиша

в) Шимади

3. Який з методів автоматичної побудови сітки скінченних елементів передбачає побудування діаграми Вороного:

а) триангуляція Делоне

б) метод Лі

в) метод Кавендиша

г) метод Шимади

4. Який з методів не стосується ґраткових методів автоматичної побудови сітки скінченних елементів:

а) Такера

б) Кікучі

в) Джана та Лі

г) Метод Шимади

5. Який з методів автоматичної побудови сітки скінченних елементів був запропонований Ворденвебером:

а) топологічне розбиття

б) геометричне розбиття

в) метод елементів, що відображаються

г) метод ґраток

6. Який з методів автоматичної побудови сітки скінченних елементів передбачає заповнення внутрішньої області об'єкта "бульбашками":

а) Кавендиша

б) Шимади

в) Лі

7. При автоматичній побудові сітки скінченних елементів, який з методів Не стосується методів з'єднання вузлів:

а) Кавендиша

б) Делоне

в) Лі

8. Ширина смуги матриці коефіцієнтів результуючої системи рівнянь в методі скінченних елементів не залежить від:

а) кількості ступенів свободи

б) локальної нумерації вузлів

в) максимальної різниці між номерами

9. Яка з наведених назв функцій форми в МСЕ Не існує

а) координатна

б) базисна

в) пробна

10. В МСЕ зазвичай в якості апроксимуючої функції використовують поліноми степеня не вище:

а) третього

б) другого

в) четвертого

11. Алгебраїзація задачі в МСЕ полягає в:

а) заміні диференціального оператора різницеvim аналогом

б) побудові сітки в заданій області

в) заміні шуканої функції поліномом

12. Етап МСЕ "Об'єднання скінченних елементів в ансамбль"

Не передбачає виконання:

а) заміни локальних номерів вузлів глобальними

б) заміни глобальних номерів вузлів локальними

в) побудови системи алгебраїчних рівнянь

13. Локальна нумерація вузлів в МСЕ виконується:

а) за годинниковою стрілкою

- б) проти годинникової стрілки
- в) зліва направо

5.6 Література до розділу

Метод скінченних елементів розглядається в [1,24,31], короткий огляд відомих FEA-пакетів наведено в [12,19,35,44], основи роботи з програмою MathCAD висвітлено в [18,28,43].

6 ПРОЄКТНИЙ ПРАКТИКУМ. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПУ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ В СЕРЕДОВИЩАХ CREO ТА ALTIUM DESIGNER

6.1 Особливості організації процесу автоматизованого проектування електронних засобів

Процес *автоматизованого проектування* електронних засобів (ЕЗ), виходячи з ступеню однорідності задач та методів їх розв'язку в процесі проектування, підрозділяється на наступні етапи (рис.6.1):

- системотехнічне проектування, під час якого обираються та призначаються цілі проектування, формується структура майбутнього виробу, визначаються його основні техніко-економічні характеристики;

- функціональне (схемотехнічне) проектування, під час якого обирається функціонально-логічна база, розроблюються загальні принципові електричні схеми ЕЗ та їх складових частин, оптимізуються їх параметри;

- технічне (конструкторське) проектування, під час якого розв'язуються задачі синтезу та аналізу конструкцій виробу, визначається компоновка та розташування елементів, розроблюється топологія електричних з'єднань;

- проектування технологічних процесів, яке передбачає визначення складу технологічного обладнання для виготовлення виробів, підготовку необхідних організаційно-технічних заходів, що пов'язані з забезпеченням функціонування технологічних ліній та розробкою правил підготовки проекту виробу для його виготовлення в одиничному, дрібносерійному або крупносерійному варіантах.

Системи автоматизованого проектування, які застосовуються в теперішній час, дозволяють істотно поглибити аналіз процесів, що протікають в схемах і конструкціях електронних засобів, скоротити терміни проектування і обсяг експериментальних робіт.



Рисунок 6.1 – Загальна схема алгоритму наскрізного процесу автоматизованого проектування ЕЗ.

За допомогою ПК можливо здійснити весь цикл проектування, що складається з наступних етапів.

Етап 1. Синтез структури та принципової схеми пристрою.

Етап 2. Аналіз характеристик пристрою в різних режимах з урахуванням розкиду параметрів компонентів та наявності дестабілізуючих факторів; параметрична оптимізація.

Етап 3. Синтез топології, в тому числі розташування елементів на друкованій платі (ДП) або кристалі та розведення з'єднань.

Етап 4. Верифікація топології.

Етап 5. Випуск конструкторської документації.

З усіх етапів створення нового ЕЗ найбільш складним, відповідальним та трудомістким є етап розробки технічного проекту, що пов'язаний з конструюванням апаратури, виготовленням дослідних зразків та випробуваннями їх на відповідність технічним умовам.

Процес автоматизованого проектування базується на математичному моделюванні, що має багато переваг у порівнянні з натурним макетуванням.

На етапі *схемотехнічного проектування* моделювання забезпечує перевірку правильності роботи синтезованих схем шляхом розрахунку їх математичних моделей, що виконується швидше, ніж за допомогою макетування кожної синтезованої схеми; дозволяє проаналізувати вихідні параметри і характеристики схеми в граничних і аварійних режимах; провести аналіз впливу на схему зовнішніх умов без натурних кліматичних і інших випробувань, аналіз залежностей вихідних параметрів схеми від внутрішніх параметрів напівпровідникових приладів, що не реалізуються на макеті. У задачах оптимізації електронного пристрою, тобто визначення найкращих значень вихідних параметрів там, де можливості макета обмежені діапазонами зміни регулюючих елементів, моделювання дозволяє змінювати будь-які керовані параметри з метою максимального поліпшення заданого вихідного параметра.

Конструкторське проектування – це один з найважливіших аспектів проектування ЕЗ. Вхідними даними для конструкторського проектування є результати структурного, функціонального та схемотехнічного проектування (структурні, функціональні і принципіві схеми ЕЗ). В свою чергу, результати конструкторського проектування (конструкторська документація), є основою технологічного проектування, тобто використовуються для розробки технологічних процесів виготовлення елементів, вузлів і блоків.

На кожному рівні конструкторського проектування послідовно вирішуються задачі компоновки елементів конструкції в вузлі даного ієрархічного рівня, їх розташування по конкретним установчим місцям і трасування з'єднань між елементами. Ця група задач відноситься до комутаційно-монтажного проектування і в найбільшій мірі відображається у автоматизованих системах конструкторського проектування.

Інша важлива група задач конструкторського проектування – задачі аналізу розроблених варіантів конструкції: теплових та механічних режимів; завадостійкості пристроїв. Зазвичай ці види аналізу здійснюються за допомогою окремих прикладних програм, які не об'єднані в комплекси програм аналізу конструкції і не мають гармонічного зв'язку з програмами комутаційно-монтажного проектування.

Задача оцінки теплових режимів конструкції є дуже складною через труднощі отримання адекватної математичної моделі теплових процесів. З метою розрахунку теплових режимів використовуються програми для автоматизованого аналізу і забезпечення теплових характеристик в конструкціях ЕЗ. Теплове моделювання конструкції дозволяє розраховувати температурні допуски функціональних параметрів, виконувати параметричну оптимізацію ЕЗ з урахуванням температурних режимів, здійснювати модельні випробування ЕЗ при впливі зовнішніх теплових потоків або ударів, проводити статистичний аналіз температурних полів і електронної схеми (з урахуванням розкиду теплових параметрів матеріалів, елементів) і т.і.

Важливою задачею конструкторського проектування, яка пов'язана безпосередньо з етапом комутаційно-монтажного проектування, є задача аналізу завадостійкості елементів та вузлів мікроелектронної апаратури. Основними причинами появи завод, що пов'язані з конструктивними особливостями реалізації міжсхемних з'єднань, є спотворення та затримки сигналів при проходженні по електричним “довгим” колам, а також перехресні наведення в колах.

Проблема завадостійкості міжелементних з'єднань непрямо розв'язується на етапі розташування і на етапі трасування введенням відповідних критеріїв оптимізації та врахуванням ряду обмежень. Основна проблема при отриманні моделей для врахування завадостійкості пов'язана з необхідністю оперативного визначення паразитних параметрів та виділення найбільш небезпечних кіл за результатами комутаційно-монтажного проектування. Але, на цей час розроблено методи та програми, що з успіхом вирішують цю задачу.

Задача аналізу механічних характеристик конструкції полягає в визначенні процесів, що відбуваються в конструкції при ста-

тичних, динамічних, вібраційних та інших механічних навантажень. На відміну від задач аналізу теплових режимів і заводстійкості ця задача практично не пов'язана з результатами комутаційно-монтажного проектування та не знайшла відображення в існуючих автоматизованих системах конструкторського проектування.

Автономне застосування існуючих програм на етапах схемотехнічного і конструкторського проектування ЕЗ призводить до того, що загальне зниження витрат на розробку і термінів проектування є незначним, оскільки експериментальні дослідження характеристик ЕЗ дослідної партії розкривають недоліки проведеного моделювання фізичних процесів і призводять до необхідності внесення змін в схему та конструкцію ЕЗ, тобто до збільшення термінів проектування і витрат на доробку виробів. Як свідчать дослідження, однією з основних причин цього є недостатньо повне врахування взаємного впливу електричних, теплових, механічних та конструктивних параметрів і характеристик ЕЗ на ранніх етапах проектування, до виготовлення дослідного зразка.

Основними недоліками схемотехнічних розрахунків, що проводяться, є грубий облік впливу зовнішніх чинників, визначальним з яких є температура, а також неврахування конкретного конструктивного виконання ЕЗ. Недоліками теплових розрахунків є використання як початкової інформації усереднених значень потужностей джерел тепловиділення, неврахування їх залежності від режиму роботи ЕЗ.

Прагнення вирішити проблеми, що виникають, тільки за рахунок схемотехнічних заходів призводить до значного ускладнення електричної схеми пристроїв, зниження їх надійності, погіршення енергетичних показників, а тільки за рахунок зміни конструкції - до погіршення масогабаритних показників ЕЗ.

Таким чином, розробка високо надійних сучасних ЕЗ є неможливою без об'єктивного урахування взаємного впливу теплових, електричних, механічних і конструктивних параметрів виробу на ранніх етапах проектування, до виготовлення дослідних зразків. Це важливо, оскільки характеристики теплових режимів (температурні поля, коефіцієнти теплового навантаження) є функціями потужностей тепловиділення, які, в свою чергу, визначаються струмами, які протікають через елементи, і падіннями на них напруги. Разом з тим, більшість електричних характеристик ЕЗ є термоза-

лежні. З іншого боку, від вибраного конструктивного рішення залежить ступінь взаємного впливу елементів, як джерел температурного поля і джерел паразитних електромагнітних впливів, що зрештою може істотно впливати на функціональні параметри елементів, фрагментів і електричної схеми ЕЗ загалом.

Враховуючи все наведене вище, можна відмітити наступні вимоги до сучасного процесу автоматизованого проектування ЕЗ:

- етапи схемотехнічного і конструкторського проектування повинні виконуватися в тісному взаємозв'язку, оскільки рішення, що приймаються на етапі схемотехнічного проектування мають враховувати особливості подальшого конструктивного виконання ЕЗ і його вплив на функціонування ЕЗ.

- успішне вирішення задач, пов'язаних з проектуванням аналогових ЕЗ, з точки зору забезпечення заданих в ТЗ вимог на номінальні значення вихідних характеристик ЕЗ, їх стабільності і необхідних показників надійності, є можливим тільки на основі застосування *системного підходу до процесу проектування*.

6.2 Структура та функціональні можливості системи Creo

Компанія PTC пропонує для підприємств, які працюють в галузі дискретного виробництва, передові програмні рішення та послуги, що дозволяють їм відповідати сучасним вимогам процесу глобалізації, зменшити час виводу на ринок нових продуктів і збільшити продуктивність праці в процесі розробки інноваційних виробів. Замовниками PTC є провідні виробничі компанії в аерокосмічній і оборонній, автомобільній і електронній галузях, а також в індустріях промислового і медичного обладнання.

PTC має 9 основних лінійок розробленого програмного забезпечення: CREO, Pro/ENGINEER, Windchill, Arbortext, Mathcad, ProductView, CoCreate, InSight і Relex.

Система Creo 1.0 складається з чотирьох глобальних застосунків, кожен з яких включає в себе набір служб («apps»).

AnyRole Apps™: *легкість у використанні*. Застосунок дозволяє вибирати інструменти та інтерфейс САПР в залежності від функціоналу та ролі співробітників, даючи можливість кожному користувачеві отримувати доступ до властивого саме для його роботи

рішення. Такий підхід веде до зростання індивідуальної ефективності кожного співробітника.

AnyMode Modeling™: широка функціональність. Застосунок пропонує ринку мультिवаріантну платформу для проектування. Користувач може сам робити вибір між 2D-моделюванням, прямим 3D-моделюванням або параметричним 3D-моделюванням. Завдяки даній моделі даних користувачі систем прямого і параметричного моделювання можуть працювати над одним файлом. Кресленики, створені за допомогою цього застосунка, будуть доступні в будь-якому з модулів, який би варіант проектування не обрав користувач. Більш того, Creo's AnyMode Modeling надає можливість користувачам плавно переключатися з одного виду проектування на інший без втрати часу і даних, що особливо актуально для великих груп розробників.

AnyData Adoption™: технологічна відкритість. Застосунок дозволяє використовувати дані, створені в інших САПР, що значно знижує витрати компаній. Creo дозволяє відкривати файли, створені в SolidWorks, Autodesk Inventor та AutoCAD. PTC також надає інтерфейси для створення сторонніми розробниками add-on модулів для доступу до даних інших САПР (NX, CATIA). Крім того Creo підтримує двонаправлений обмін даними в різних форматах. Наприклад, Creo Parametric і Creo Direct здатні відкривати і зберігати файли у форматах IGES, STEP, Parasolid, ACIS, і DXF. Застосунок надає інтерактивну візуалізацію даних, незалежно від розміру файлу, в якому вони зберігаються, що в свою чергу дозволяє переглядати ці дані або здійснювати швидку навігацію по великій моделі. Види повністю редаговані, що дає можливість керувати складаними одиницями, створювати нові конструктивні елементи (Creo Parametric) або модифікувати геометрію безпосередньо (Creo Direct).

AnyBOM Assembly™: управління створенням складаних одиниць. Застосунок спрощує управління великими конфігуруючими складнями завдяки використанню ядра Windchill – рішення для управління інженерними даними та проектами.

Основний набір застосунків (рис. 6.2), які увійшли до складу Creo, розроблений, щоб оптимізувати розробку виробів, виробництво та процеси обслуговування.

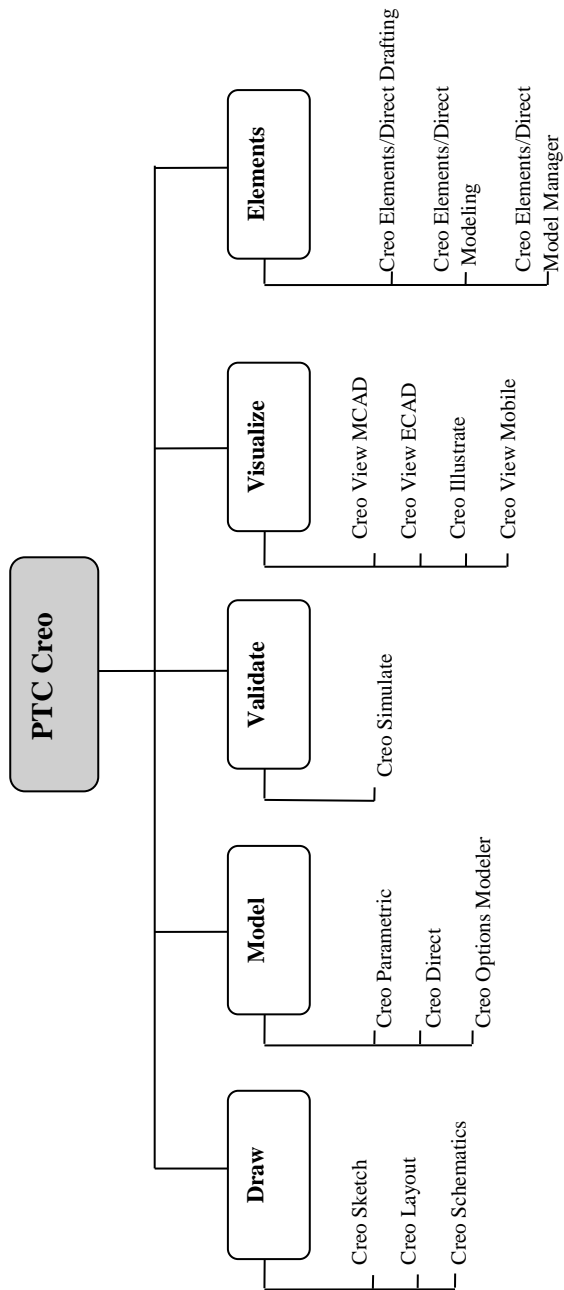


Рисунок 6.2 – Основний набір застосунків Creo.

Creo Layout – для роботи з ранніми концепціями в 2D з можливістю продовження проєкту в 3D.

Creo Sketch – креслярський застосунок для швидкого створення проєкту в 2D.

Creo Direct – застосунок для швидкого створення тривимірної геометрії і редагування за допомогою прямого моделювання. Безшовно взаємодіє з Creo Parametric, надаючи можливість користувачеві перемикатися між режимами моделювання.

Creo Parametric – застосунок для 3D параметричного моделювання. Зберігаючи всі інструменти популярної САПР Pro/ENGINEER, яка увійшла до складу Creo, застосунок отримав нові переваги.

Creo Simulate – аналітична програма для структурного і теплового розрахунку (дозволяє проводити структурні і термальні симуляції).

Creo Schematics – служба для створення маршрутних схем 2D, наприклад кабельних і трубопровідних систем.

Creo Illustrate – застосунок для створення технічних ілюстрацій в 3D, допоможе графічно представити в 3D складну сервісну інформацію.

Creo View MCAD – полегшений застосунок для перегляду, коментування та розмітки геометрії MCAD. За допомогою програми Creo View MCAD користувачі можуть переглядати геометричні дані, як в точному, так і в полегшеному поданні (прискореному завантаженні великих моделей).

Creo View ECAD – полегшений застосунок для роботи з геометрією ECAD.

Що стосується сумісності з існуючими продуктами, то Creo Parametric дозволяє читати будь-які дані, створені в Pro/ENGINEER. Користувачі Creo Direct можуть перенести твердотільні моделі, складанні одиниці, інформацію про виробництво виробів і двовимірні кресленики, створені в CoCreate. Це досягається за рахунок того, що існуючі популярні у всьому світу продукти PTC також перетерпіли ребрендинг та увійшли до складу нової системи Creo:

- Pro/ENGINEER® тепер Creo Elements/Pro™;
- CoCreate® тепер Creo Elements/Direct™;

- ProductView® тепер Creo Elements/View™.

Підтримка цих програмних продуктів здійснюється в звичайному режимі, незважаючи на зміну назви.

6.2.1 Creo Layout

Часто для того, щоб скоротити час та вартість розробки продукту, команді розробників постійно необхідно оптимізувати свої концепції проєктування. Адже використання лише 2D чи 3D концепцій при створенні продукту менш ефективніше ніж їх взаємодія.

Для певних типів конструкцій 2D-кресленик моделі є більш ефективними, оскільки:

- швидко забезпечують «рівень критичної інформації»;
- дозволяють легко вносити великі, непередбачені зміни,

оскільки немає необхідності враховувати структуру та створені залежності;

- 3D зазвичай вимагає попереднього опрацювання структури та зв'язків:

- якщо концепція істотно зміниться або буде скасована, втрати будуть марними;

- непередбачені зміни можуть бути трудомісткими.

3D-представлення моделі стає більш ефективним при певному рівні складності. Тому розробники Creo Layout вирішили за рахунок синхронізації 2D і 3D використати усі їх переваги. Creo Layout є автономним 2D CAD застосунком, який вирішує проблему переходу від 2D до 3D відображення моделі, підвищує ефективність розробки, об'єднує переваги двох процесів розробки в єдиний процес.

Creo Layout дає можливість імпортувати дані з Creo Parametric, ескізи чи перетини з інших 2D-систем, DXF, IGES, DWG, DRW, і. т. д. для прискорення концепції проєктування.

6.2.2 Creo Sketch

Creo Sketch - інструмент для виконання 2D-ескізів. Creo Sketch позиціонується як частина нової лінійки застосунків Creo для розробки продуктів, які замінюють і розширюють колишні продуктивні лінійки Pro/Engineer і CoCreate. Ідея полягає у створенні базового інструменту для ескізування в ході розробки продукції,

для тих, хто потребує просто накидати кресленик, який буде потім переданий у подальшу розробку з використанням інших застосунків PTC Creo.

Creo Sketch дозволяє не-CAD експертам робити внесок у процес проєктування. Використання 2D-ескізу для створення 3D-моделі деталі прискорює її проєктування.

Можливості Creo Sketch:

- набір інструментів: олівець, пензлі, розмиття, клон / штамп, і т. д;
- ретушування;
- створення шарів і керування ними;
- створення кривих ліній;
- використання рисунків в застосунках Creo;
- відкриття та збереження файлів в графічних форматах TIF, BMP, JPG, PNG, і т.п.

6.2.3 Creo Direct

Автономний застосунок Creo Direct дозволяє користувачам при розробці продукту створювати та редагувати 3D CAD-дані за допомогою прямого підходу до моделювання. Призначений для концептуальної розробки, розробки деталей допоміжного виробництва та спрощує геометрію деталей для аналізу. Організує 3D CAD-моделювання в масштабах всього підприємства: дозволяє задіяти велике коло робітників в процесі розробки, забезпечує користувачів вибором метода моделювання та повністю сумісний з Creo Parametric.

Основні переваги Creo Direct:

- простота у використанні і навчанні. Прямий підхід до моделювання дозволяє новим чи не професіональним користувачам швидко навчитись створювати та редагувати 3D-моделі;
- швидке, більш гнучке та складальне моделювання збільшує індивідуальну ефективність та продуктивність робітника;
- дозволяє легко вносити зміни на пізнішій стадії проєктування;
- підвищує ефективність роботи в multi-CAD середовищі, завдяки легкому включенню та редагуванню даних з інших САПР;
- дозволяє декільком користувачам отримувати доступ та ви-

користати 3D CAD-дані;

- оптимізація робочих процесів CAE дає можливість аналітикам редагувати 3D проєктні дані до аналізу, проводячи конструктивні зміни ще на моделі.

Дозволяє обмінюватися даними і забезпечує зворотній зв'язок з постачальниками та споживачами, ще на 3D-моделі.

6.2.4 Creo Parametric

Creo Parametric (раніше Pro/ENGINEER) – потужний засіб забезпечення найвищої якості і точних цифрових моделей. Creo Parametric є основним інструментом у системі розробки виробів РТС, який дозволяє детально визначити форму, функції та придатність продуктів. Підключення до Інтернету дає змогу групам мати доступ до необхідних ресурсів, інформації і можливостям – від концептуальної розробки до виготовлення продуктів. Надійні цифрові моделі Creo Parametric є повністю асоціативними. Виконані будь де, зміни продукту призводять до повсюдного оновлення кінцевих результатів.

Creo Parametric вміщує повний набір рішень CAD/CAM/CAE на єдиній інтегрованій платформі. Інтегровані рішення CAD/CAM/CAE Creo Parametric є загально визнаним стандартом і дають користувачеві все необхідне для скорочення часу і підвищення якості проєктування. Необмежена масштабованість Creo Parametric дозволяє по мірі зростання потреб збільшувати кількість користувачів і завдяки підключенню нових модулів розширювати функціональні можливості системи.

Оскільки продукт Creo Parametric є невід'ємною частиною Системи Розробки Виробів (Product Development System) РТС, користувальницькі засоби автоматизованого 3D-проєктування можуть бути успішно інтегровані з кращими в галузі рішеннями РТС. До них відносяться Windchill для управління інформацією і процесами, Creo View (раніше ProductView™) для створення складних моделей і інтерактивної візуалізації, Mathcad Prime для інженерних розрахунків і Arbortext для динамічної публікації документів.

6.2.5 Creo Simulate

Creo Simulate дозволяє інженерам-конструкторам самостійно

оцінювати, досліджувати й оптимізувати структурну поведінку розроблювальних ними конструкцій, що знаходяться під впливом реальних статичних і динамічних навантажень. Точне уявлення геометрії і унікальна адаптивна методика розрахунку дозволяють легко отримувати швидкі і точні рішення, які допомагають підвищити якість виробів, скорочуючи при цьому час і витрати на розробку, а також витрати на виготовлення та випробування дослідних зразків.

Creo Simulate також має спеціалізовані засоби автоматичної генерації повністю асоціативних скінченно-елементних сіток для проведення подальшого розрахунку в системах типу NASTRAN®, і може використовуватися спільно з іншими продуктами і засобами управління даними, розробленими компанією PTC. Працюючи безпосередньо з моделлю Creo Parametric, Creo Simulate повністю виключає проблеми, що є неминучі при передачі даних між різними програмами і, одночасно, надає розробникові потужні можливості параметричної оптимізації конструкції. Можливості проведення багатозадачного аналізу дозволяють проводити одночасну оптимізацію за міцнісними, тепловим і кінематичними характеристиками.

6.2.6 Creo Schematics

Creo Schematics – застосунок, призначений для більш легкого і швидкого створення складних схем з'єднань, що є невід'ємною частиною загального процесу розробки виробів. Дозволяє створювати різноманітні типи схем, включаючи функціональні схеми, блок-схеми, електричні принципові схеми, схеми розміщення обладнання і процесів, схеми гідравлічних і пневматичних пристроїв, а також схеми опалення, вентиляції та кондиціонування. Creo Schematics – незалежний застосунок, але оскільки він інтегрований з Creo Parametric, то дозволяє використовувати створені схеми для розводки кабелів і трубопроводів у Creo Piping and Cabling Extension.

6.2.7 Creo Illustrate

Creo Illustrate – застосунок для створення технічних ілюстрацій в 3D. Creo Illustrate надає спеціалізоване функціональне середовище по створенню інформаційно-насичених технічних 3D-ілюстрацій, використовуваних для виразного і точного візуального

опису складних виробів і процедур обслуговування, що відрізняються чіткою графічною наочністю, забезпечуючи таким чином легкість сприйняття користувачами сервісної інформації. Пропонована функціональність дозволяє технічним ілюстраторам, авторам документації та сервісним планувальникам використовувати конструкційні та інженерні дані будь-якого 3D-формату для застосування їх в процедурах обслуговування, навчальних матеріалах, ілюстрованих каталогах частин і деталей і на всіх типах носіїв інформації. Creo Illustrate дозволяє створювати інтерактивні ілюстровані каталоги деталей, керівництва операторів і сервісні книжки, експлуатаційні інструкції та навчальні посібники.

Основні можливості Creo Illustrate:

- інтеграція з Windchill PDMLink 10.0;
- використання безлічі форматів CAD;
- структура сервісної специфікації (sBOM) для ілюстрованих списків деталей;
- створення 3D-анімацій;
- ілюстрування динамічної побудови перетинів і розрізів;
- покрокова демонстрація процедур;
- генерація специфікацій і позиційних виносков;
- застосування 3D-ілюстрацій у форматах 2D.

6.2.8 Creo View MCAD

Creo View MCAD – полегшений застосунок для перегляду, коментування та розмітки геометрії MCAD. Creo View MCAD дозволяє швидко та легко візуалізувати об'єкти і отримувати цінну конструкторську інформацію, візуально спільно працювати з технічною інформацією всередині та зовні компанії.

Creo View MCAD підтримує 3D-дані з усіх основних інструментів САПР, а також кресленики, зображення та документи з різних джерел, без необхідності використання застосунку, в якому вони були розроблені.

Завдяки компактному, і в той же час точному формату 3D зображення, до будь-якої складної графічної інформації можна легко отримати доступ, що в свою чергу дозволяє зменшити кількість доопрацювань і прискорити процес прийняття рішень.

Пов'язані з MCAD розширення також дозволяють:

- проводити електронне маркування виробничої інформації по виробу, дають можливість затвердити, відхилити або задати питання щодо конкретних елементів конструкції;

- автоматично створювати PDF-файли для безпечного рецензування документів, вводити анотації і водяні знаки, не змінюючи сам документ;

- проводити аналіз конструкцій для перевірки наявності накладень компонентів виробу, контактів і зазорів;

- створювати інтерактивну анімацію, засновану на конструкції виробу для його вивчення з функціональної точки зору.

Оскільки CreoView ECAD і CreoView MCAD використовують одне й те ж середовище, користувачі обох застосунків можуть виконувати унікальні функції, такі як перехресне вивчення ECAD/MCAD представлень. Це дозволяє кожному розробнику брати участь у спільній роботі – в режимі реального часу чи за допомогою поміток.

6.2.9 Creo View ECAD

Creo View ECAD – полегшений застосунок для роботи з геометрією ECAD. Реалізує взаємодію в частині візуальної інформації електронних проектів. Дозволяє працівникам компанії всередині компанії і за її межами переглядати і запитувати інформацію щодо електронного проекту.

Застосунки Creo View ECAD дають можливість легко і швидко переглянути, як окремі PCB проекти, так і PCB проекти спільно із загальним проектом продукту. Creo View ECAD підтримує дані PCB проектів всіх основних виробників EDA інструментів (САПР електроніки або ECAD – Electronic design automation), будь то кресленики, зображення і документи з різних джерел. При цьому абсолютно немає необхідності використання «рідних» EDA інструментів.

У зв'язку з тим, що продукти Creo View ECAD і Creo View MCAD використовують спільну платформу, користувачі обох застосунків отримують унікальні можливості. Наприклад, взаємозв'язок при вивченні ECAD/MCAD об'єктів або проектів. Будь-який учасник може приймати участь в процесах інжинірингу, проекту-

вання, виготовлення, тестування і збирання, як в режимі реального часу, так і шляхом видачі своїх зауважень.

Застосунки, що доповнюють ECAD, дозволяють також:

- швидко виявити відмінності в 2-х версіях схеми ДП, РСВ проекту або виробничого проекту ДП;
- здійснювати методичний «прохід» через зміни ECAD проєктів або між ECAD і MCAD проєктами.

6.2.10 Модулі Creo Parametric

Нижче перелічені більшість модулів Creo Parametric в залежності від їх сфери застосування:

Проектування і конструювання:

- Creo Advanced Assembly Extension – управління складними складнями.

Промисловий дизайн та реінжиніринг:

- Creo Interactive Surface Design Extension – інтерактивне моделювання стильових поверхонь і поверхонь вільної форми;

- Creo Advanced Rendering Extension – вдосконалений рендерінг;

- Creo Reverse Engineering Extension – реверсивний інжиніринг.

Проектування електричних систем:

- Creo Schematics – створення електричних діаграм, принципів схем та креслеників.

Проектування механічних систем:

- Creo Expert Framework Extension – розробка конструкцій із стандартного і спеціального профілю;

- Creo Piping and Cabling Extension – автоматизація розводки трубопроводів, розводки кабелів в 3D, провідників і джгутів.

Інструмент і оснащення:

- Creo Tool Design Extension – проектування технологічного оснащення;

- Creo Expert Moldbase Extension – розробка пакетів та компонентів прес-форм;

- Creo Complete Mold Design Extension – комплексне проектування технологічного оснащення;

- Creo Progressive Die Extension – проектування послідовного штампування.

Механічна обробка:

- Creo Prismatic і Multi-surface Milling Extension – моделювання 3-х координатної фрезерної обробки (з позиціонуванням по 4-й – 5-й координатам);

- Creo Machining Extension – моделювання механічної обробки;

- Creo Complete Machining Extension – моделювання складної механічної обробки (токарної, фрезерної, дротяної електроерозійної);

- Creo NC Sheetmetal Extension – моделювання та оптимізації розкрою металічного листа.

Контроль і верифікація:

- Creo Computer-Aided Verification Extension – програмування роботи координатно-вимірювальних машин та обробки даних вимірювань.

Інженерний аналіз та оптимізація:

- Creo Plastic Advisor Extension – аналіз процесу заповнення прес-форми при литті пластмас;

- Creo Mechanism Dynamics Extension – динамічне моделювання і аналіз руху механізму;

- Creo Simulate – структурний та тепловий аналіз та оптимізація;

- Creo Advanced Simulation Extension – розуміння продукту та поліпшення його якості;

- Creo Fatigue Advisor Extension – аналіз втомлювальної міцності конструкції;

- Creo Tolerance Analysis Extension – аналіз геометричних відхилень і полів допусків;

- Creo Manikin Extension – аналіз ергономічних характеристик конструкції;

- Creo Manikin Analysis Extension – аналіз взаємодії людини з продуктом і середовищем.

Оптимізаційне моделювання:

- Creo Behavioral Modeling Extension – оптимізаційне моделювання.

Обмін даними:

- Interfaces for Creo Parametric – інтерфейси обміну даними з ПЗ третьої сторони.

Прикладні розробки:

- Creo Toolkit – бібліотеки для прикладних розробок в сервовищі Creo Parametric.

Спільна робота:

- Creo ECAD-MCAD Collaboration Extension – дозволяє скористатися електромеханічне проектування за допомогою співробітництва;

- Creo Rights Management Extension – захист інтелектуальної власності розробки;

- Creo Spark Analysis Extension – дозволяє автоматизувати процес аналізу зазору і шляхи витоку для 3D електромеханічної конструкції;

- Creo Distributed Computing Extension – розподільні розрахунки, що існують багато років, але так і не використовувалися багатьма інженерами.

Таким чином, РТС Creo™ являє собою набір масштабованих застосунків для створення інноваційних виробів. Засноване на унікальній архітектурі, рішення Creo відповідає потребам всієї команди розробників виробів на підприємстві – від конструкторів до маркетингологів. Таким чином, користувачі програмних рішень РТС можуть створювати і виготовляти свою продукцію швидше і ефективніше.

6.3 Структура та функціональні можливості системи ALTIUM DESIGNER

Altium Designer - комплексна система автоматизованого проектування електронних засобів, розроблена австралійською компанією Altium. Раніше ця ж фірма розробляла САПР P-CAD, який набув надзвичайну популярність серед розробників друкованих плат. У 2008 році фірма Altium заявила про припинення постачання програмних пакетів P-CAD, і запропонувала розробникам використовувати програму Altium Designer, яка з'явилася в 2000 році і спочатку мала назву Protel. У 2006 був проведений ребрендинг програмного продукту і він отримав назву Altium Designer.

Altium Designer дозволяє реалізовувати проекти електронних засобів на рівні схеми або програмного коду з наступною передачею інформації проектувальнику ПЛІС або друкованої плати. Відмітною особливістю програми є проектна структура і наскрізна цілісність ведення розробки на різних рівнях проектування. Іншими словами зміни в розробці на рівні плати можуть миттєво бути передані на рівень ПЛІС або схеми і так само назад. В якості пріоритетного напрямку розробників даної програми варто відзначити інтеграцію ECAD і MCAD систем. Тепер розробка друкованої плати можлива в тривимірному вигляді з двонаправленою передачею інформації в механічні САПР (Solid Works, Pro/ENGINEER та ін..)

Altium Designer дозволяє розробляти принципові схеми, проектувати друковані плати, проектувати ПЛІС, розробляти вбудоване ПЗ та багато іншого (рис. 6.3).

Робота над всіма частинами проекту ведеться в єдиній керуючій оболонці, що дозволяє розробнику контролювати цілісність проекту на всіх етапах проектування. Таким чином, зміни, внесені на будь-якому етапі розробки, автоматично передаються на всі пов'язані стадії проекту. На додаток до потужних засобів розробки, Altium Designer має широкі можливості імпорту та експорту сторонніх систем проектування і підтримує практично всі стандартні формати вихідних файлів (Gerber, ODB ++, DXF і т. д.). Повністю підтримуються всі напрацювання у вигляді схем, плат і бібліотек, розроблені в останніх версіях P-CAD.

6.3.1 Програмна платформа Design Explorer

Пакет складається з двох продуктів, що базуються на єдиній інтегрованій платформі Design Explorer (DXP), можливість роботи з тим чи іншим з них залежить від типу придбаної ліцензії:

- *Altium Designer Custom Board Front-End Design* - проектування ПЛІС, схемотехнічне проектування та моделювання.

- *Altium Designer Custom Board Implementation* - проектування друкованих плат і ПЛІС.

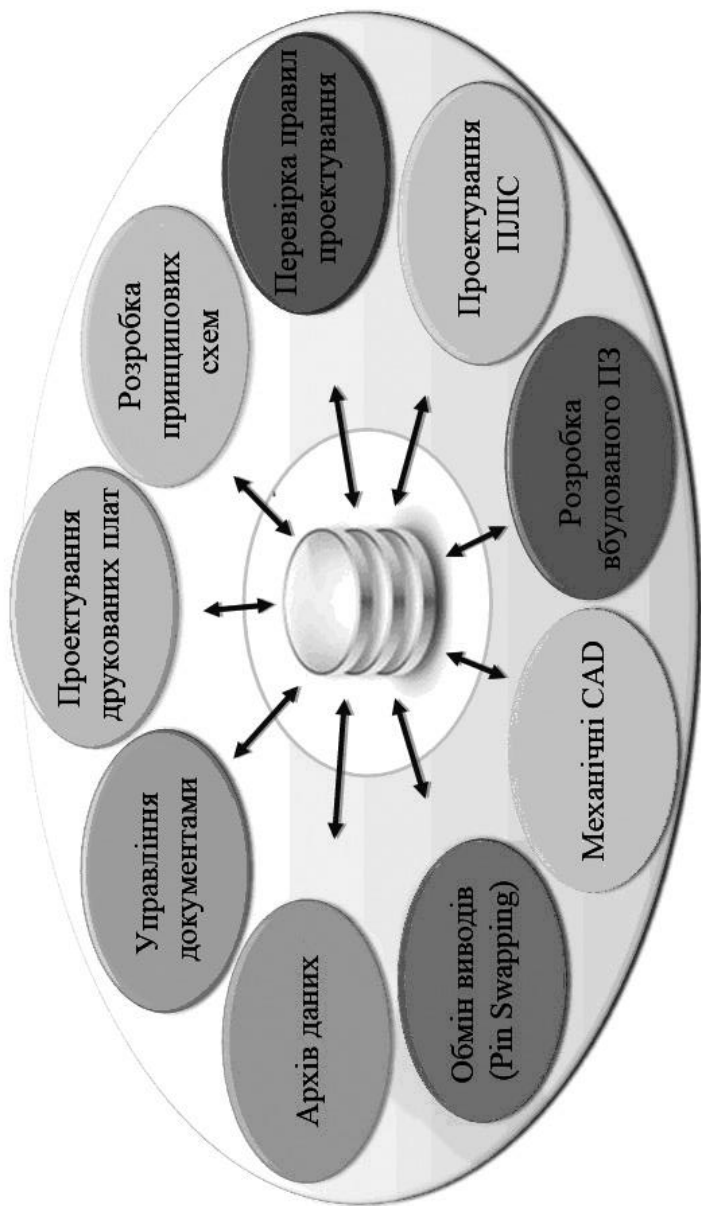


Рисунок 6.3 – Концепція Altium Designer

Програмна платформа **DXP** поєднує різні модулі для реалізації всіх функцій наскрізного автоматизованого проектування:

редактор схем;

- редактор бібліотек моделей електронних компонентів;
- програма моделювання різноманітних схем ЕП;
- текстовий редактор списку з'єднань і описів на мові VHDL;
- редактор друкованих плат, автотрасувальник;
- інтерфейси імпорту та експорту;
- САМ-засоби та ін..

Важливі особливості DXP-платформи:

- середовище DXP являє собою 64-розрядний клієнт-серверний застосунок, призначений для роботи під управлінням сучасних версій ОС Windows;

- робота з файлом проекту Altium Designer, який являє собою спеціальний службовий файл, що містить посилання на окремі документи і визначає права доступу до них в рамках DXP;

- широкі можливості по створенню документів і підключенню до проекту або додаванню існуючих документів, а також виключенню з проекту;

- запуск DXP здійснюється самостійно або шляхом вибору в папці будь-якого документа, що відноситься до проекту Altium Designer;

- 3 рівня налаштування: системи, редактора (з єдиного меню) і документа;

- склад команд головного і спливаючих меню (крім команд меню DXP, яке відноситься до всієї платформи) змінюється в залежності від виду поточного проекту та активності відповідного редактора;

- панелі і вікна робочої області можуть бути специфічно налаштовані користувачем;

- кількість підключених до роботи з системою Altium Designer моніторів обмежується тільки можливостями відеокарті ПК;

- дублювання майже всіх пунктів меню DXP «гарячими» клавішами дозволяє значно прискорити роботу;

- окремі документи проекту можуть зберігатися на одному (сервері) або декількох ПК в рамках локальної обчислювальної мережі;

- допускається множинний доступ до одних і тих же файлів і використання одного документа в різних проєктах;
- реалізований функціонал для спільної роботи розробників як одного підрозділу, так і різних підрозділів підприємства;
- зберігання «історії» (до 8 версій) проєкту забезпечує контроль, порівняння і відновлення даних проєкту, а також збереження цілісності проєкту при непередбачених збоях;
- можливість переглядати та редагувати в редакторах схем і друкованих плат варіанти реалізації проєкту, які відрізняються, наприклад, компонованням елементів, для подальшого формування даних про плату та передачі її у виробництво.

До складу програмного комплексу Altium Designer входить весь необхідний інструментарій для розробки, редагування і відладження проєктів на базі електричних схем і ПЛІС.

6.3.2 Редактори системи Altium Designer

Однією з найважливіших частин системи Altium Designer є програма введення проєктів, яку не можна ототожнювати зі звичайним редактором принципів схем. Насправді, редактор схем є лише складовою цієї програми поряд з редактором бібліотек символів, текстовим редактором списків з'єднань і описів на мові VHDL, програмою змішаного аналогово-цифрового моделювання, синтезу логіки для ПЛІС та ін..

На відміну від системи P-CAD, введення проєкту в якому обмежується лише введенням схем (нехай навіть на багатьох аркушах), система Altium Designer насамперед призначена для побудови проєкту виробу зверху вниз: апарат - блок - субблок - модуль - осередок - плата - компонент (ПЛІС) . Проєкт Altium Designer являє собою спеціальний службовий файл, що містить посилання на окремі документи і забезпечує доступ до них в рамках середовища проєктування Design Explorer.

У редакторі принципів схем застосовується декілька видів ієрархії, причому один з них раніше застосовувався тільки в "важких" САПР для побудови багатоканальних проєктів. Подібні функції дають можливість користувачам позбутися від необхідності копіювати підлеглі аркуші за числом однакових каналів. Досить намалювати схему каналу один раз і правильно зв'язати її з аркушем,

що стоїть вище. При моделюванні або передачі проєкту в редактор друкованих плат система автоматично розмножить описані канали, привласнить компонентам унікальні позиційні позначення і додасть необхідні зв'язки. Багатоканальна структура проєкту збережеться і в редакторі друкованих плат: всі компоненти певного каналу будуть автоматично прив'язані до так званої "кімнати" розміщення (Room), що полегшить їх подальше розміщення і трасування зв'язків, завдяки унікальній функції Copy Room Format.

Редактор схем системи Altium Designer працює як в дюймовій, так і метричній системах виміру. Це повністю знімає обмеження, пов'язані з використанням метричної сітки в більш ранніх версіях системи Protel для оформлення схем згідно з вимогами ЄСКД.

Редактор символів елементів є не автономним, як в P-CAD, застосунком, а складовою частиною редактора схем. Цим забезпечується його простота в роботі, а також можливість "на льоту" редагувати наявні бібліотеки. Система Altium Designer має дуже зручну функцію, що дозволяє витягувати інформацію про компоненти з проєкту і формувати на її основі власні бібліотеки. Ця функція особливо корисна при роботі з проєктами, отриманими від інших розробників, які використовують власні бібліотеки компонентів.

Бібліотеки програми містять понад 90 тисяч готових компонентів, у багатьох з яких є моделі посадочних місць, SPICE і IBIS-моделі, а також тривимірні моделі. Будь-яку з перерахованих вище моделей можна створити внутрішніми засобами програми.

Редактор друкованих плат Altium Designer містить потужні засоби інтерактивного розміщення компонентів і трасування провідників, які спільно з інтуїтивною і повністю візуалізованою системою установки правил проєктування максимально спрощують процес розробки електроніки. Інструменти трасування враховують всі вимоги, що пред'являються сучасними технологіями розробок, наприклад, при трасуванні диференціальних пар або високочастотних ділянок плат.

Редактор друкованих плат однаково добре працює як з метричною, так і з дюймовою системою вимірювань, причому закладена точність на два порядки вище, ніж в системі P-CAD. Перемикання системи одиниць може бути виконане в будь-який момент роботи над проєктом за допомогою гарячої клавіші Q. Більш того, Altium Designer має ряд спеціальних функцій, що спрощують робо-

ту з компонентами, які мають різний крок між выводами, в тому числі і в різних системах одиниць. В інших системах проектування, як правило, проблеми починаються, якщо на одній платі використовуються топологічні посадочні місця з метричним і дюймовим кроком выводів. Редактор друкованих плат системи Altium Designer (Protel) повністю позбавлений цього недоліку, оскільки має так звану електричну сітку Electrical Grid, що задає деяку околицю навколо електричного об'єкта (кінця провідника, контактної площинки, перехідного отвору), потрапляючи в яку покажчик миші притягається точно до його центру незалежно від установок сітки Snap Grid. Це істотно спрощує роботу з різнорідними компонентами.

Всього в редакторі друкованих плат системи Altium Designer передбачено три типи шарів: електричні, механічні та спеціальні. Всього на платі може бути до 32 сигнальних шарів і до 16 внутрішніх шарів живлення і заземлення. Їх настроювання здійснюється в діалоговому вікні Layer Stack Manager. Для розміщення різної допоміжної інформації (розміри, таблиці, службові мітки і написи) використовуються механічні шари, яких може бути не більше 16. Їх вміст може бути виведено в Gerber файли разом з інформацією з електричних шарів. Спеціальна функція призначення пар механічних шарів дозволяє розмішувати на них контури компонентів, що використовуються при генерації видів різних сторін плати для складального кресленника. Спеціальні шари використовуються для розміщення службової інформації, наприклад, написів, різних масок, меж областей трасування і т.д.

Як і в редакторі схем, в редакторі плат є декілька режимів і підрежимів промальовування провідників, але тут їх більше, оскільки є можливість промальовування дуг. Є режими малювання: під кутом 45 градусів, під кутом 45 градусів з дугою, ортогонального, ортогонального з дугою і під довільним кутом.

Процес роботи в редакторі друкованих плат системи Altium Designer регламентується не стільки сіткою, скільки набором правил проектування, які чітко обумовлюють усі аспекти розміщення провідників і компонентів. Всі автоматичні операції (Авторозміщення, Автотрасування) виконуються в строгій відповідності до цих правил. Виконувати вручну операції (наприклад, інтерактивне трасування або переміщення провідників) контролюються постійно, тому будь яка невірна дія миттєво відображається як порушен-

ня. Такий підхід дає можливість розробнику максимально сконцентруватися на проекті.

Всі правила проектування, що враховуються в редакторі друкованих плат, згруповані в 10 категорій. Представлені в одній категорії правила відрізняються за типом, причому немає жодних обмежень на використання файлів одного типу до різних областей дії, наприклад, всієї плати, "кімнат" (Room), класів ланцюгів або окремих ланцюгів. Пріоритет правил визначається їх положенням у списку, яке визначається вручну при їх створенні. Така система задає чіткі логічні критерії управління для автоматичного або напівавтоматичного проектування плат.

Система Altium Designer має потужні *засоби автоматичного та інтерактивного розміщення компонентів*. Тут є дві вбудовані програми авторозміщення компонентів Cluster Placer і Statistical Placer, що істотно відрізняє її від P-CAD, в якому таких засобів немає взагалі. Програма Cluster Placer рекомендується для роботи з платами з кількістю компонентів не більше 100 і добре керується набором відповідних правил проектування, що регламентують зазори між компонентами, дозволені шари, орієнтацію, висоту і групування. Друга програма автоматичного розміщення Statistical Placer призначена для обробки плат з великою кількістю компонентів (понад сто). Вона працює за принципово іншим алгоритмом і не враховує жодні з вище перерахованих правил проектування. Головним критерієм правильного розміщення компонентів тут вважається рівномірний розподіл компонентів на платі при оптимальній щільності зв'язків.

Але в загальному випадку обидві програми можуть рекомендуватися тільки як допоміжний інструмент при інтерактивному розміщенні, коли частина компонентів попередньо розміщується вручну і блокується. Традиційно вважається, що автоматичне розміщення за допомогою більшості програм виконується некоректно. Однак у більшості випадків в цьому винні самі користувачі, які приділяють недостатню увагу підготовчому етапу. Чим гірше користувач описує критерії, які повинні використовуватися в роботі програми розміщення, тим гіршим буде отриманий результат.

Однак головне призначення будь-якого редактора друкованих плат - це трасування провідників на сигнальних шарах плати, що з'єднують виводи компонентів згідно зі списком з'єднань. Система

Altium Designer пропонує користувачеві достатній набір інструментів, що дозволяють виконувати трасування друкованих плат, як в автоматичному, так і напівавтоматичному (інтерактивному) режимах. Altium Designer дозволяє прокладати сегменти провідників безпосередньо з центрів електричних об'єктів (контактних площинок, перехідних отворів) або кінців існуючих провідників без прив'язки до сітки Snap Grid, чим знімає будь-які обмеження та незручності, пов'язані з використанням топологічних посадочних місць, створених в різних системах вимірювання.

До складу програми входить *автоматичний трасувальник Situs*, в якому використовуються найбільш прогресивні алгоритми трасування друкованих провідників. Він є модифікованою версією використаного в пакеті Protel модуля ShapeBased Router. У програмі Situs вперше застосований топологічний алгоритм, чим було кинуту виклик найближчому конкурентові - програмі SPECSTRA компанії Cadence.

Система Altium Designer надає користувачеві широкий набір засобів генерації різних звітів, від звичайних повідомлень, що містять статистичну інформацію, до складних таблиць і переліків використовуваних матеріалів (BOM - Bill of Material), звітів про ієрархічну структуру проєкту (Report Project Hierarchy) і файлів перехресних посилань (Component Cross Reference). Крім того, в складних проєктах, що містять кілька РСВ документів, звіти можуть бути сформовані як для окремих плат, так і для проєкту цілком.

Принциповою відмінністю останньої версії Altium Designer є підтримка двонаправленої роботи з механічними деталями та моделями компонентів в форматі STEP, які можуть бути імпортовані/експортовані з механічних САПР.

У разі відсутності в системі потрібних функцій користувачеві пропонується спеціальний набір Software Development Kit, який дозволяє створювати власні допоміжні модулі, які потім будуть інтегровані в єдину систему. Завдяки наявності цього модуля повністю знімаються будь-які обмеження на подальший розвиток пакету Altium Designer як компанією-розробником, так і самими користувачами.

Altium Designer - сучасний програмно-апаратний комплекс, що надає якісно нову технологію проєктування електронних пристроїв на базі друкованих плат і програмованих логічних інтегра-

льних схем (ПЛІС). Це рішення дозволяє вести проєктні роботи в наскрізному узгодженому середовищі і тестувати проєктовану систему ще на етапі моделювання.

6.4 Проєктування контрольно-вимірювального приладу в середовищах CREO та ALTIUM DESIGNER

6.4.1 Аналіз особливостей конструкції

Умовно конструкцію проєктованого приладу можна представити у вигляді ієрархічної схеми, наведеної на рис. 6.4. Вона містить 3 рівні деталізації: виріб, складанні одиниці, деталі. Зовнішній вигляд приладу наведено на рис. 6.5. Рознесений вигляд, що ілюструє складові частини проєкту наведено на рис. 6.6.

Виріб складається з основи корпусу, передньої та задньої панелей, а також внутрішнього складня з встановленими платами і компонентами. Передня панель складається з основи та встановлених на ній мікротумблеров, світлодіодів, клем і вставки плавкої (рис. 6.7).

Кожен мікротумблер включає в себе підставку, на яку кріпиться корпус, дві гайки, шайбу і три заклепки. Світлодіод, в свою чергу включає гніздо, на яке кріпиться індикатор. Клема має підставу, на якому закріплені дві гайки і шайба. Вставка плавка являє собою вставку, яку тримає утримувач, вона закривається кришкою і кріпиться за допомогою гайки. Тобто це невеличкі складанні одиниці (рис.6.8).

Задня панель складається з основи, на яку кріпляться розніми і com-port. Кожен рознім має затиск, кришку і гвинт (рис. 6.9).

Основа корпусу складається з профілю бічного, на який встановлюються верхня і нижня кришки і монтажні куточки для кріплення внутрішнього складня. Верхня кришка являє собою складень з основи, чотирьох гвинтів, сухарів і шайб пружинних. Нижня кришка включає в себе основу, ніжки, заклепки, гвинти, шайби пружинні і сухарі. Внутрішній складень складається з двох малих плат, двох великих плат, двох діодів, які закріплені на металевій основі. Кожна з малих плат складається з основи з закріпленими на ній резисторами (рис. 6.10).

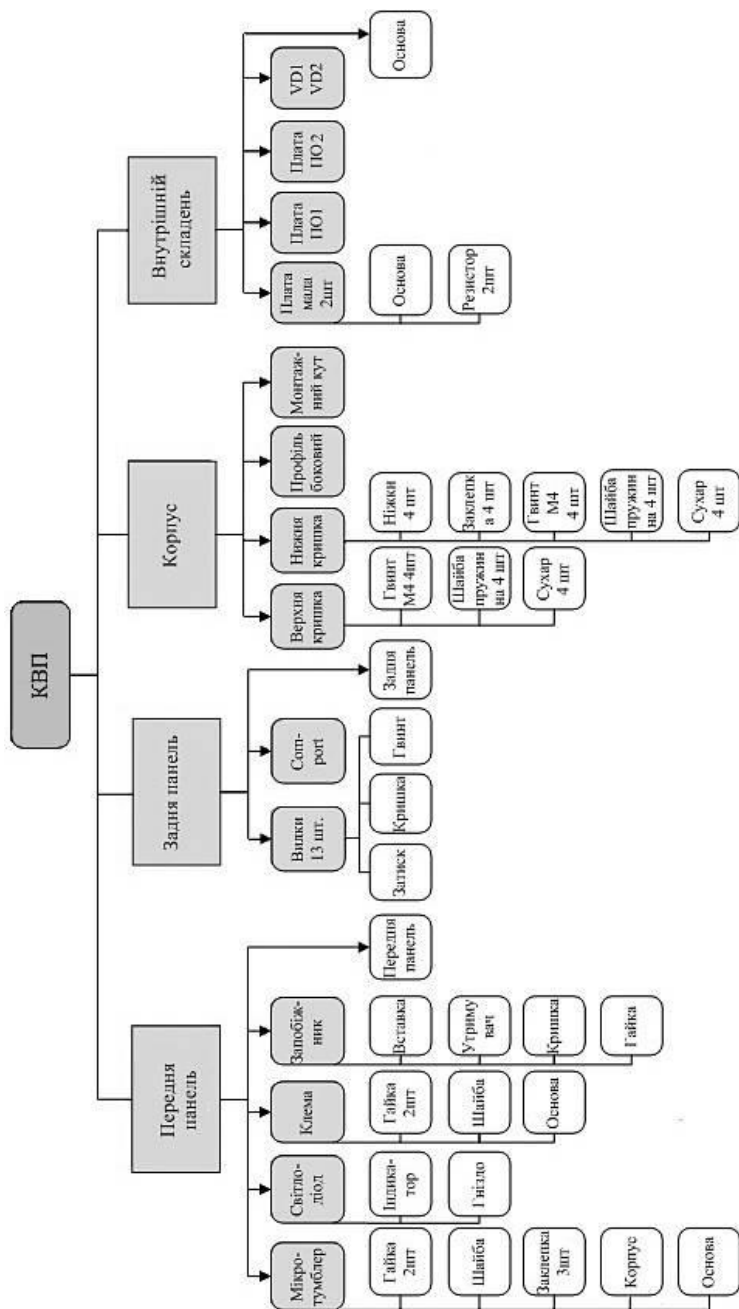


Рисунок 6.4 - Ієрархічна структура конструкції приладу

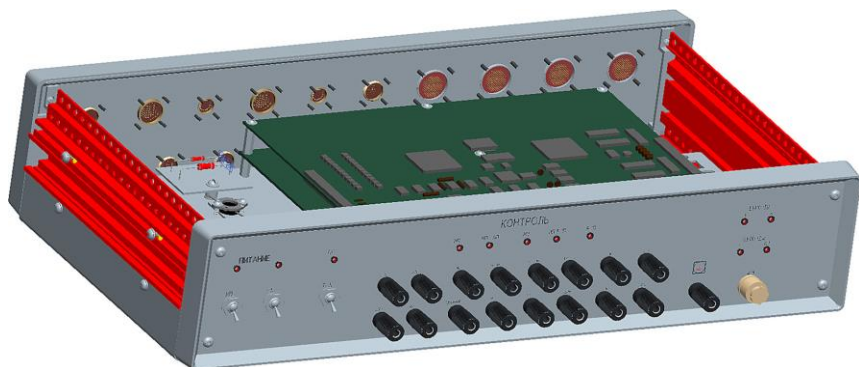


Рисунок 6.5 – Створена в системі Creo 1.0 модель контрольно-вимірювального приладу.

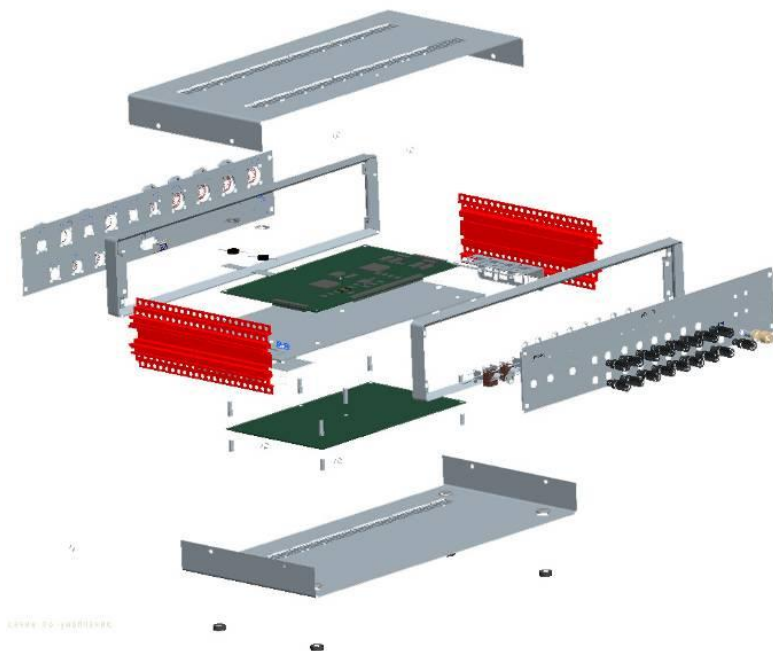


Рисунок 6.6 – Рознесений вигляд складня приладу



Рисунок 6.7 – Передня панель приладу

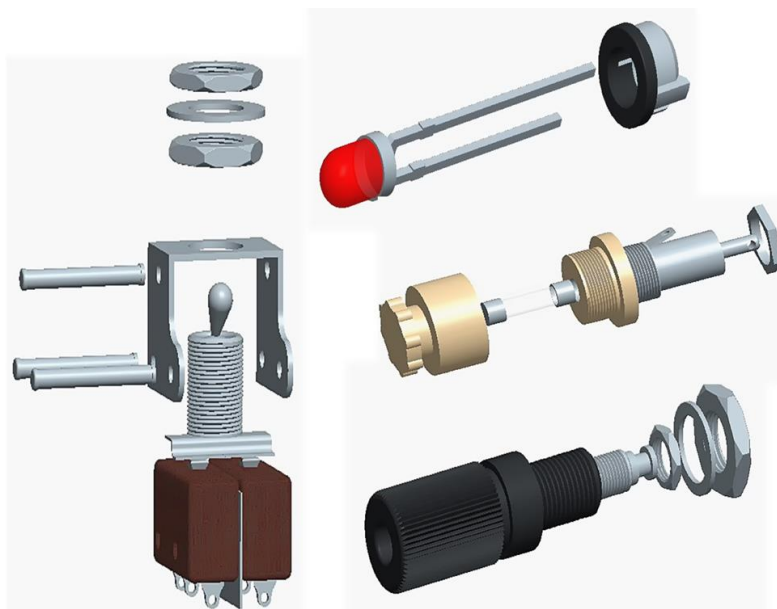


Рисунок 6.8 – Складанні одиниці

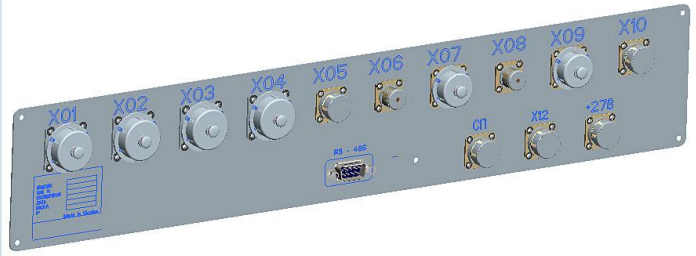
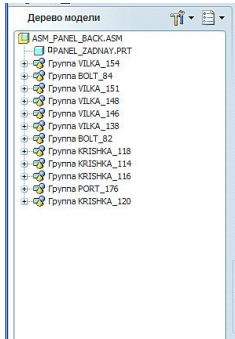


Рисунок 6.9 – Задня панель

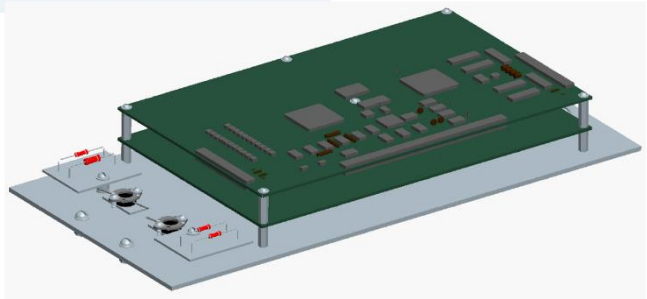
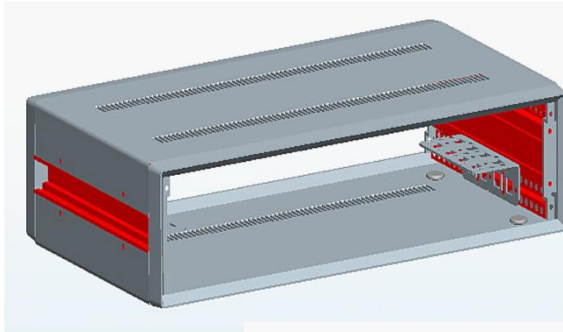


Рисунок 6.10 – Основа корпусу та внутрішній складень.

6.4.2 Приклад побудови 3D-моделей складових частин запобіжника

Для того, щоб на прикладі побачити принцип побудови твердотільних об'єктів, побудуємо моделі складових частин запобіжника, показано на рис. 6.11.

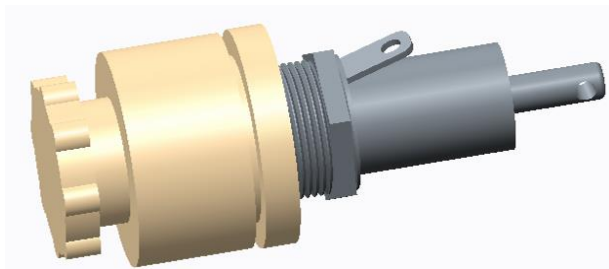




Рисунок 6.11 – Модель запобіжника

Оскільки даний запобіжник складається з вставки плавкої і утримувача вставки плавкої, а утримувач вставки плавкої в свою чергу з основи і кришки, то процес побудови його моделі буде розбитий на три відповідних етапи. Кресленики цих деталей було взято з наступних Інтернет джерел: для вставки плавкої – www.chipdip.ru/product/vp1-1-2a.aspx; для утримувача вставки плавкої ДВП4-1 – www.elmicom.ru/dvp_4_1.shtml.

Запустивши програму Creo Parametric, створимо нову деталь (**File (Файл) → New (Створити)**) з іменем `fusible_link.par`. Для цього задамо у вікні створення нової моделі (рис. 6.12) наступні параметри:

- **Type (Тип):** Part (Деталь);
- **Sub-type (Підтип):** Solid (Тверде тіло);
- **Name (Ім'я):** `fusible_link`.

Після натиснення на кнопку **ОК**, з'явиться вікно для завдання шаблону. У якості шаблону оберемо раніше створений нами шаблон збережений на дискові, вказавши його місце знаходження, використавши для цього кнопку **Browse...(Перегляд...)** і знову натиснемо на **ОК** (рис. 6.13).

Обравши інструмент **Revolve (Обертати)**  з групи інструментів **Shapes (Форми)**, перейдемо до створення ескізу **Sketch (Ескіз)**  на фронтальній площині (рис. 6.14).

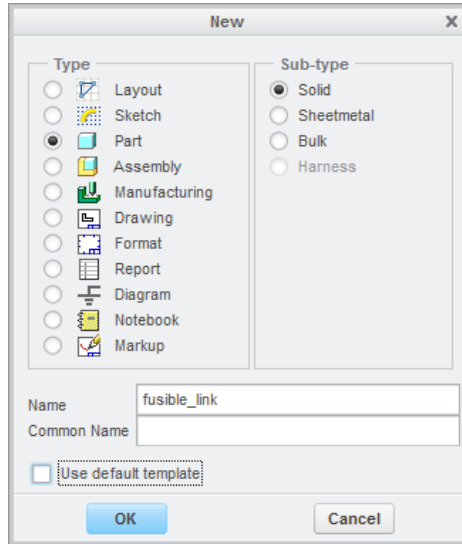


Рисунок 6.12 – Створення нової деталі

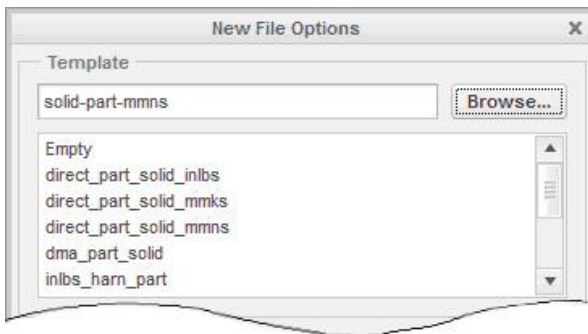





Рисунок 6.13 – Завдання шаблону


Для переходу на відображення фронтальної площини паралельно екрану, скористаємося списком видів **Named Views (Іменовані види)** групи інструментів **Orientation (Орієнтація)** вкладки **View (Вид)**.

В ескізі поставимо дві осьові лінії **Centerline (Осьова лінія)**  горизонтальну (для обертання) та вертикальну (для дзеркального відображення).

Далі, використовуючи інструмент **Line Chain (Ланцюг ліній)** , накреслимо наступну частину ескізу (див. рис. 6.15) з відповідними розмірами.

Виділимо всі накреслені нами лінії, вибираючи їх кліком лівої клавіші миші, утримуючи при цьому клавішу клавіатури **Ctrl**. Оберемо інструмент **Mirror (Дзеркальне відображення)** , та вкажемо дві будь-які точки вертикальної осьової лінії.

Підтвердимо відображення, натиснувши на кнопку **Ok** у невеликому вікні верхнього правого кута. Видалимо вертикальну вісь, виділивши її та натиснувши на клавішу клавіатури **Delete**. Таким чином, отримали наступний ескіз (рис. 6.16).

Завершивши побудову ескізу **OK** , вкажемо кут обертання 360 градусів і підтвердимо виконання обертання ескізу. В результаті отримаємо наступну модель вставки плавкої (запобіжника) (рис. 6.17).

Отримана модель схожа за формою на реальну, проте не відображає дійсного кольорового забарвлення, яке могло б свідчити про використані матеріали під час виготовлення та додало б реалістичності зображенню.

Для кращої візуалізації, скористаємося можливістю заливки поверхонь деталі будь-яким кольором з випадаючого списку **Appearance Gallery (Галерея образів)**, розташованого в групі інструментів **Model Display (Відображення моделі)** вкладки **View (Вид)**. Будемо використовувати два наступних кольори: стиль **ptc-glass** колір скла (рис. 6.18 а) та стиль **pts-std-aluminium** колір алюмінію (рис. 6.18 б). Зафарбуємо ними відповідні площини запобіжника.

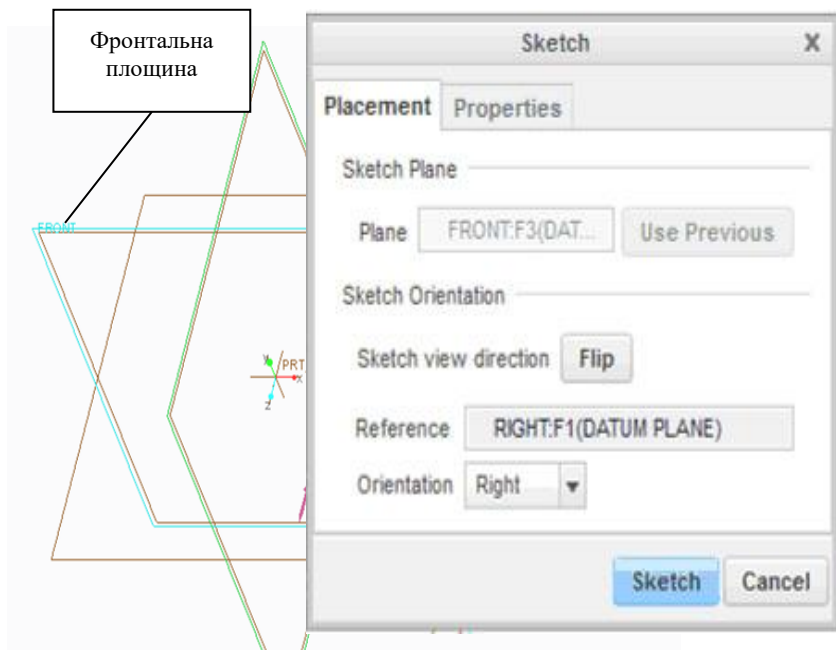


Рисунок 6.14 – Вибір площини ескізу

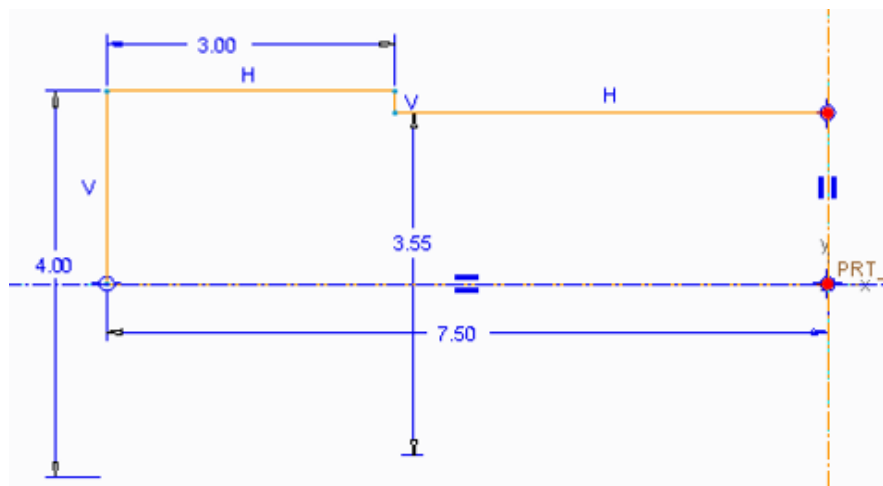


Рисунок 6.15– Половина ескізу

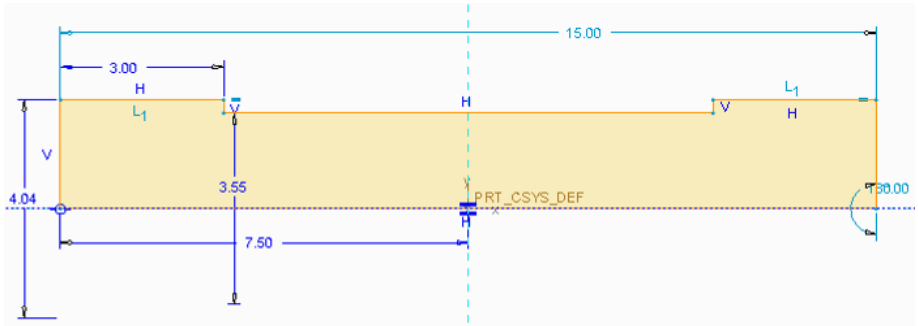


Рисунок 6.16– Ескіз для обертання



Рисунок 6.17 – Модель вставки плавкої ВП1-1В2

Для виконання заливки слід вибирати потрібний колір та вказувати курсором пензлика на потрібну поверхню об'єкта утримуючи клавішу **Ctrl** щоб виділити декілька поверхонь. По завершенню виділення площин натиснути на кнопку **Ok**, для виконання заливки. (рис. 6.19)

Збережемо створену модель вставки плавкої за допомогою команди **File (Файл) → Save As (Зберегти як)**, вказавши каталог для збереження на диску.

Приступимо до побудови утримувача вставки плавкої. Для цього запустивши застосунок **Geo Parametric 1.0**, виберемо в меню **File (Файл)** операцію **New (Створити)** та у вікні, що з'явилося аналогічним чином, як і при створенні попередньої деталі вставки плавкої ВП1-1В-2, задамо наступні параметри:

- **Type (Тип):** Part (Деталь);
- **Sub-type (Підтип):** Solid (Тверде тіло);
- **Name (Ім'я):** base_holder.

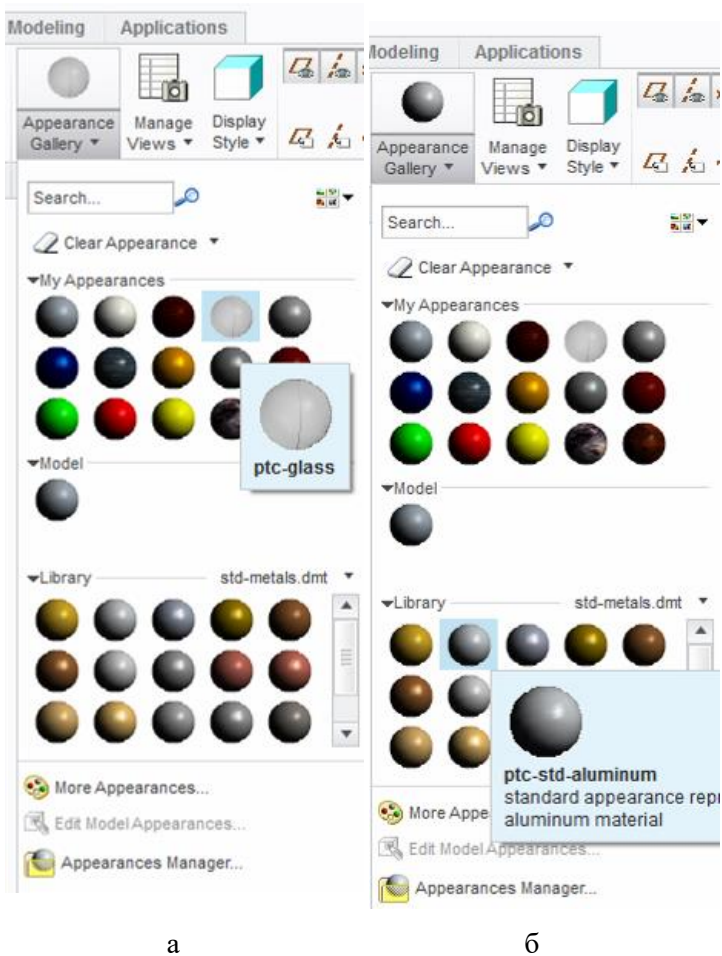


Рисунок 6.18– Вибір кольору для заливки

Знявши галочку з **Use Default Template (Використовувати шаблон за замовчуванням)**, натиснемо на кнопку **Ок**, та у новому відкритому вікні задамо шаблон `solid-part-mmns.ptr`, як і при створенні попередньої деталі. Для підтвердження вибраного шаблону знов натиснемо на **ОК**.

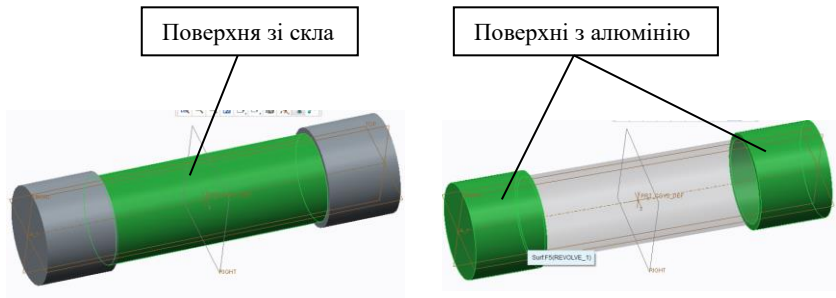







Рисунок 6.19 – Варіанти заливки

Для побудови основної частини основи утримувача скористаємося операцією обертання. Виберемо з групи інструментів **Shapes (Форми)** вкладки головного меню **Model (Модель)** операцію **Revolve (Обертати)** . Перейдемо до побудови ескізу, виділивши на робочій області площину **FRONT** та натиснувши на кнопку **Sketch View (Вид ескізу)**  з панелі команд в графічному вікні.

Побудуємо ескіз для обертання. Спочатку намалюємо вісь обертання, навколо якої і буде обертатися ескіз. Використаємо для цього інструмент **Centerline (Осьова лінія)**  з групи інструментів **Datum (Опорний елемент)**. Розмістимо її горизонтально у нашому вікні ескізу, задавши дві відповідні точки. Для побудови самого кресленника ескізу скористаємося двома інструментами: для побудови ліній **Line Chain (Ланцюг ліній)**  та округлень **Circular (Кругле)**  з групи інструментів **Sketching (Створення ескізу)**. Виберемо інструмент **Line Chain (Ланцюг ліній)** і наведемо курсор миші зліва на осьову лінію так, щоб біля курсору з'явився знак прив'язки (зелений кружечок), зробимо клік лівою клавішею миші. Продовжимо побудову ламаної лінії, проводячи курсор миші по вертикалі або горизонталі, і клікаючи ліву клавішу миші для фіксації точки відрізка. При побудові останнього відрізка потрібно прив'язати останню точку до початкової (навести на поча-



Побудувавши ескіз, перейдемо до наступного кроку, натиснувши кнопку . Задамо потрібні нам значення у вікні параметрів обертання, в даному випадку вони такі ж за замовчуванням (рис. 6.21).



Рисунок 6.21 – Діалогова панель параметрів операції обертання

Для підтвердження виконання операції обертання натиснемо на піктограму . В результаті буде побудовано наступне тіло обертання (див. рис. 6.22).

Оскільки основа має кріплення, поставимо точку прив'язки **Point (Точка)**  з групи інструментів **Datum (Опорний елемент)** на фронтальній площині як показано на рисунку 6.23. Для зручності можна обрати стиль відображення **No Hidden (Без прихованих)** зі списку стилів **Display Style (Стиль відображення)** групи інструментів **Model Display (Відображення моделі)** вкладки **View (Вид)** або з панелі команд графічного вікна. По завершенні побудови точки прив'язки знов перейдемо до стилю відображення моделі **Shading (Затінення)**.

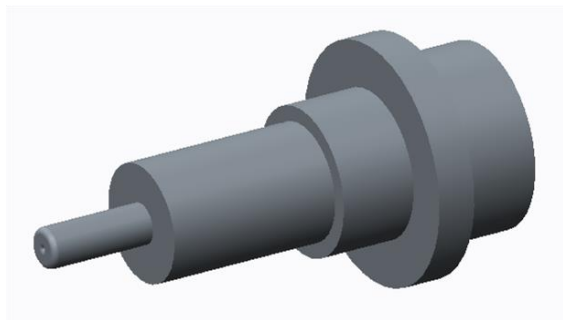


Рисунок 6.22 – Результат операції обертання

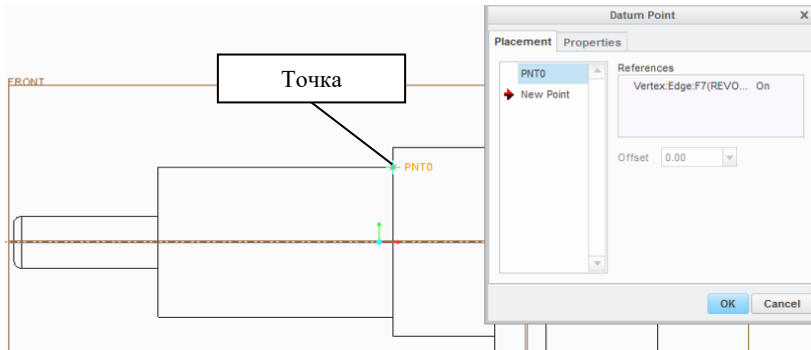






Рисунок 6.23 – Побудова точки для прив'язки

Далі, вибравши операцію **Extrude (Витягнути)**  з групи інструментів **Shapes (Форми)**, перейдемо до побудови ескізу, обравши фронтальну площину та натиснувши на **Sketch View (Вибір ескізу)** .

Для побудови ескізу (див. рис. 6.24) використаємо інструмент **Line Chain (Ланцюг ліній)**. Для прив'язки до точки, під час креслення першої точки наведіть курсор миші на неї і утримуючи клавішу **Alt** зробіть клік лівою клавішею миші. Після цього точка прив'язки буде відображатися блакитним кольором і при наведенні на неї курсором миші під час побудови відрізка, точка відрізка автоматично розміщується на ній. Нам залишається лише прив'язати її кліком лівої клавіші миші, та продовжувати побудову ламаної.

Завершивши побудову ескізу **ОК** , задамо бік витягування – витягування в обидва боки, і довжину витягування – 3мм, після чого підтвердимо введені дані, натиснувши на кнопку  (рис. 6.25). Попередній перегляд показаний на рисунку 6.26.

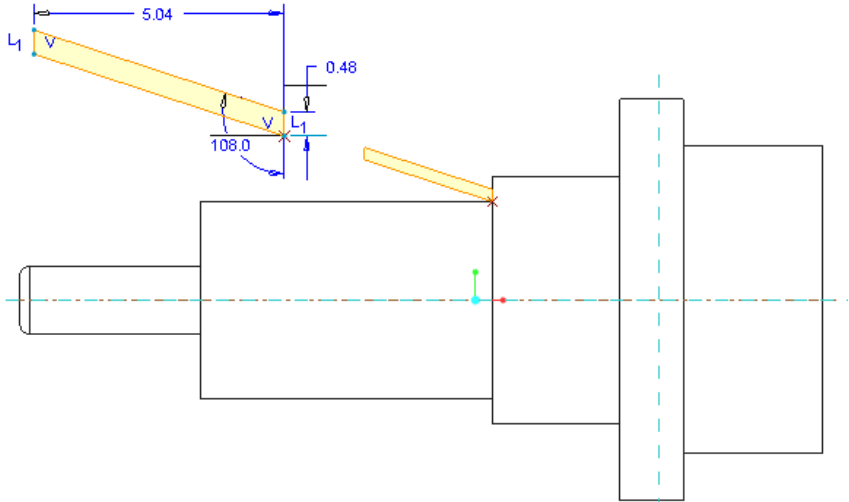


Рисунок 6.24 – Ескіз для кріплення



Рисунок 6.25 – Панель параметрів операції витягування

Заокруглимо зовнішні кути, що не прикріплені до краю отриманого кріплення, використовуючи інструмент **Round (Скруглення)** з групи інструментів **Shapes (Форми)**. Для цього виділимо потрібні ребра для округлення як показано на рисунку (див. рис. 6.27) і задамо радіус округлення 1мм. По завершенню даної операції отримаємо наступний результат (див. рис.6.28).

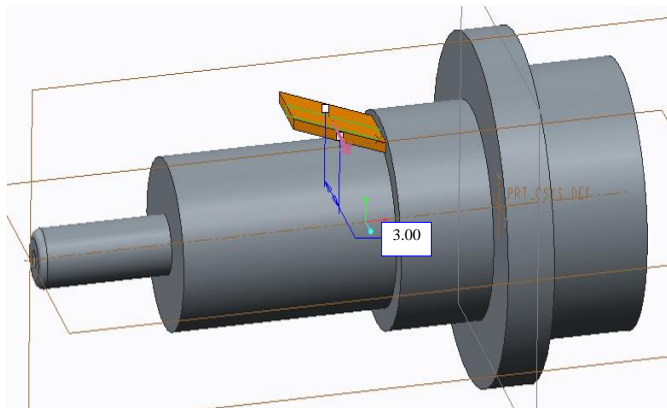


Рисунок 6.26 – Попередній перегляд операції витягування

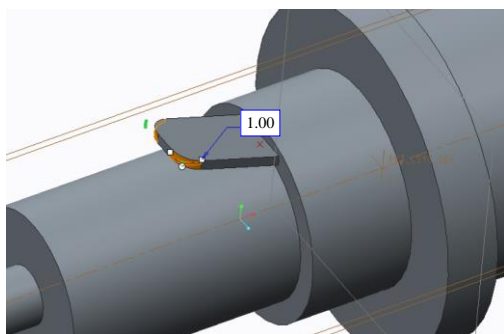


Рисунок 6.27 – Вибір ребер для округлення

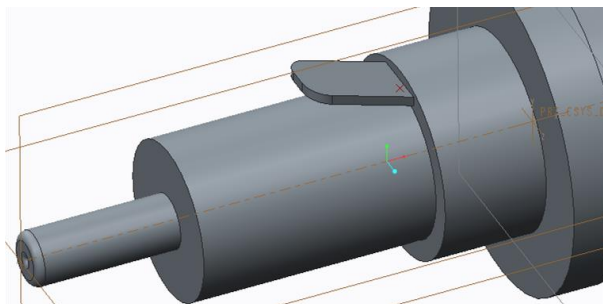



Рисунок 6.28 – Результат операції округлення

Виріжемо отвір на отриманому кріпленні, використовуючи для цього інструмент **Hole (Отвір)**  з групи інструментів **Engineering (Проектування)**. При побудові вирізу, спочатку задамо діаметр отвору – 1,5 мм, його тип і довжину – 0,5 мм. Потім визначимо площину, на якій буде знаходитися отвір. Далі необхідно задати розташування центру отвору щодо країв кріплення, перемістивши зелені квадратні точки прив'язок до відповідних країв, і ввести відстань від центру отвору до цих країв 1.5мм. (див. рис. 6.29).

Підтвердивши виріз отвору отримаємо результат (рис. 6.30).

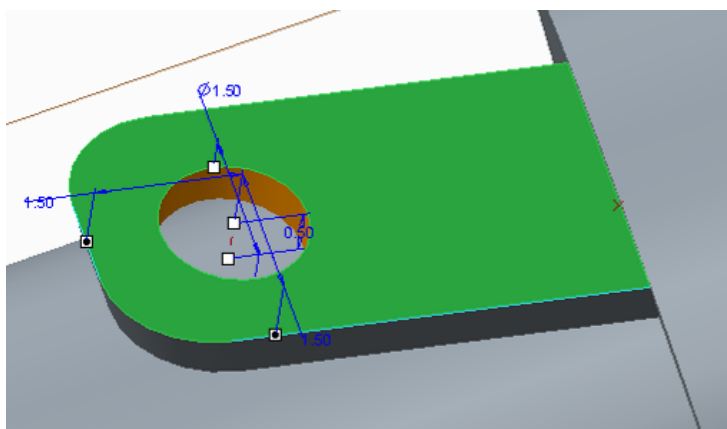


Рисунок 6.29 – Побудова отвору

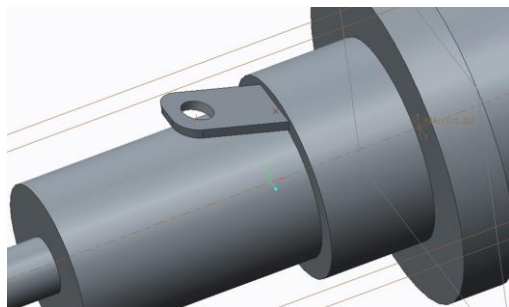



Рисунок 6.30 – Побудований отвір в кріпленні

Зробимо ще один отвір діаметром 1,5мм, використавши для цього той же інструмент **Hole (Отвір)** . Після виклику даної операції в робочій області (графічному вікні) головного вікна клінемо лівою клавішею миші на площину деталі, паралельну фронтальній, визначивши таким чином площину розміщення отвору (рис. 6.31).

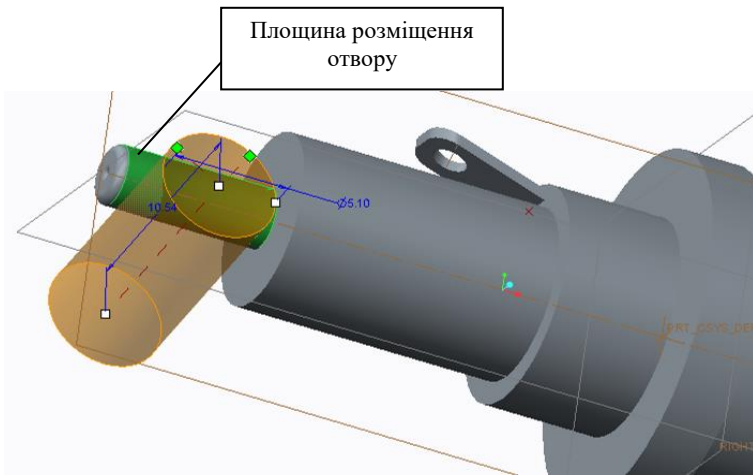


Рисунок 6.31 – Вибір площини для отвору

Далі необхідно задати площину, відносно якої будемо повертати наш отвір на певний кут. Для цього на панелі параметрів операції побудови отвору викличемо додаткове випадаюче меню **Placement (Розміщення)**, у якому в списку **Offset References (Прив'язки переміщення)** оберемо поле **Click here to a... (Натисніть тут...)**, і утримуючи клавішу Ctrl оберемо курсором миші позначення фронтальної площини (FRONT) клікнувши лівою клавішею миші на ньому. Тепер необхідно вказати бокову поверхню деталі для переміщення отвору на певну відстань відносно неї. Тобто, утримуючи клавішу Ctrl, оберемо бокову площину, навівши на неї курсор миші та клікнувши лівою клавішею миші (рис. 6.32).

Залишилося лише завдати наступні параметри:

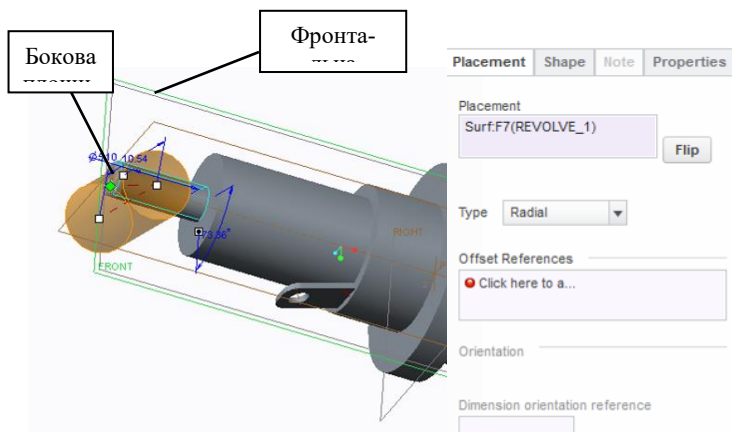


Рисунок 6.32 – Встановлення прив'язок для розміщення отвору


- 1) В меню **Placement (Розміщення)** (див. рис. 6.33):
 - кут повороту отвору відносно фронтальної площини **Angle** – 90 градусів;
 - переміщення отвору по осі **Axial** – 1,6мм.
- 2) В панелі параметрів операції побудови отвору (рис. 6.34):
 - діаметр отвору – 1.5мм;
 - глибину отвору – наскрізь.



Рисунок 6.33 – Параметри меню Placement (Розміщення)



Рисунок 6.34 – Вибір площини відносно якої буде повертатись отвір

Завершимо побудову отвору, натиснувши на піктограму кнопки . В результаті отримаємо наступну деталь (рис. 6.35).

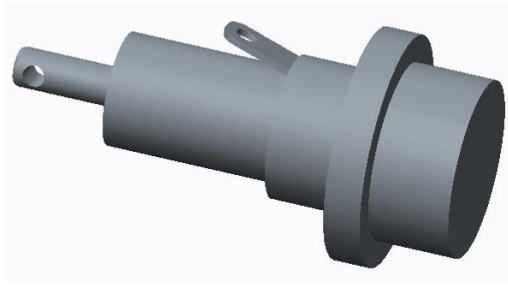




Рисунок 6.35 – Результат вирізу отвору

Побудуємо останній отвір для розміщення вставки плавкої аналогічно першому, використовуючи інструмент **Hole (Отвір)** . На цей раз задамо поверхню деталі, де ми хочемо вирізати отвір, вкажемо розташування отвору щодо решти площин, переносячи точки прив'язок на відповідні площини, і вводячи відстані розміщення центру отвору від перетину обраних площин (в нашому випадку нулі), тобто отвір повинен розміщуватись у центрі (див. рис. 6.36).

Пізніше вкажемо діаметр і довжину вирізу отвору (рис. 6.37). Нижче на рис. 6.38 зображено побудований отвір.

Оскільки в побудованому отворі повинен бути розміщений запобіжник (вставка плавка), і до основи для забезпечення контакту запобіжника із зовнішнім пристроєм пригвинчуватися кришка, а сам утримувач буде вкручений в зовнішній пристрій, нам необхідно побудувати відповідні вирізи різьблень. Для цього будемо використовувати інструмент **Helical Sweep (Протягування по спіралі)**  з групи інструментів **Shapes (Форми)**, який вибирається зі списку **Sweep (Протягнути)**.

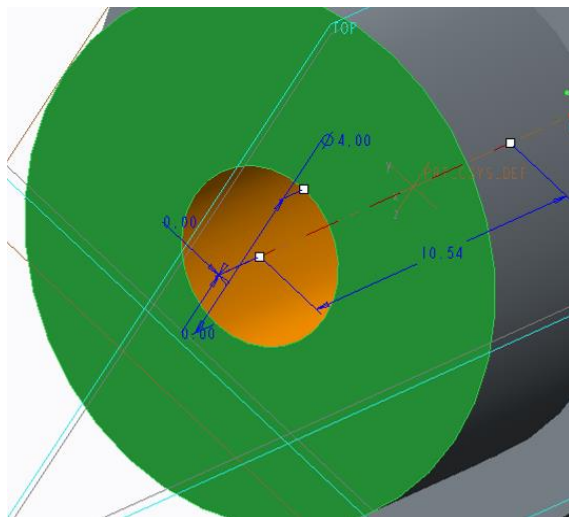


Рисунок 6.36 – Результат прив'язки отвору до деталі

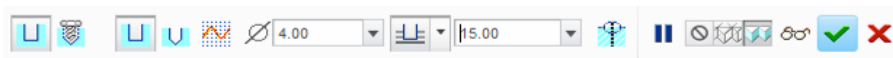


Рисунок 6.37 – Вікно вводу параметрів отвору

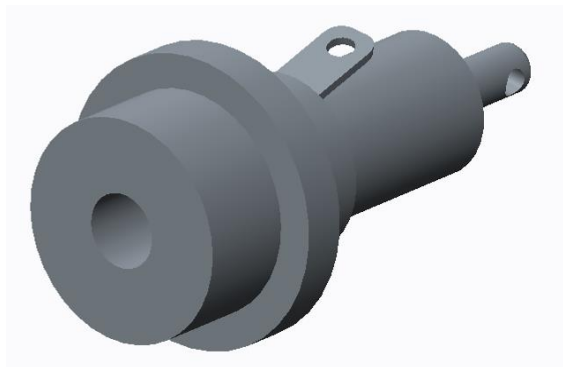


Рисунок 6.38 – Отвір для розміщення запобіжника

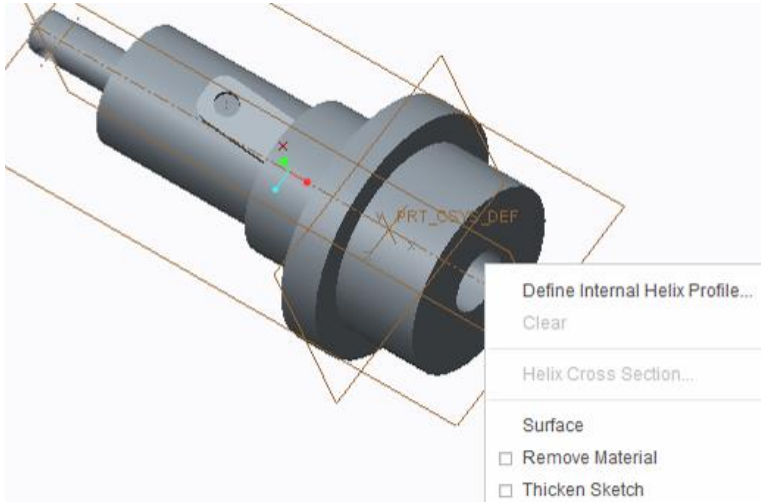






Рисунок 6.39 – Контекстне меню операції Helical Sweep

Виберемо інструмент **Helical Sweep (Протягування по спіралі)** і натиснемо на праву клавішу миші, утримуючи її до тих пір, поки не з'явиться наступне контекстне меню, зображене на малюнку (рис. 6.39). В даному меню вкажемо опцію **Define Interval Helix Profile...(Визначається внутрішній профіль спіралі...)** і визначимо його, вказавши площину **TOP**, прив'язану до площини **FRONT** (рис. 6.40). Використовуючи інструмент **Sketch View (Вибір ескізу)** , перейдемо до побудови ескізу для спіралі. Для початку, використовуючи інструмент встановлення прив'язки **References (Прив'язка)**  з групи інструментів **Setup (Установки)**, вкажемо край деталі, до якого будемо протягувати спіраль (рис. 6.41).

Побудуємо центральну вертикальну вісь і лінію, що вказує напрям протягування спіралі за допомогою відповідних інструментів **Centerline (Осьова лінія)**  і **Line Chain (Ланцюг ліній)**  (рис. 6.42).

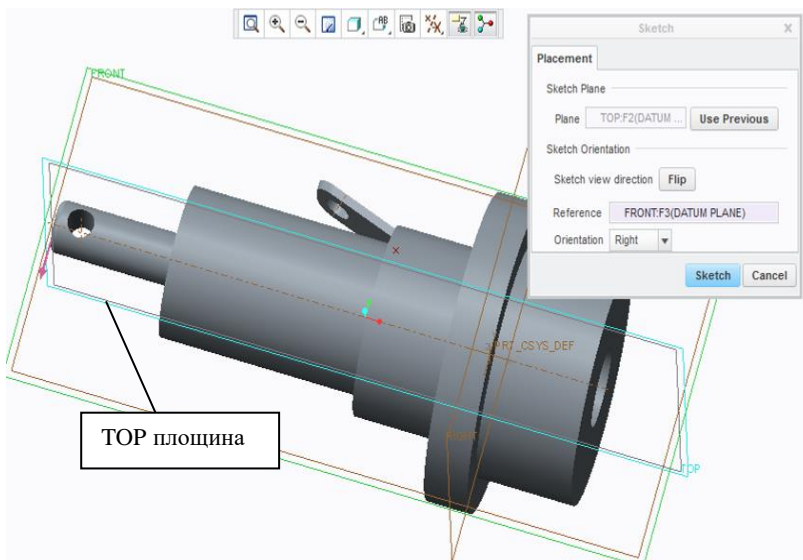


Рисунок 6.40 – Визначення площини для побудови вирізу спіралі

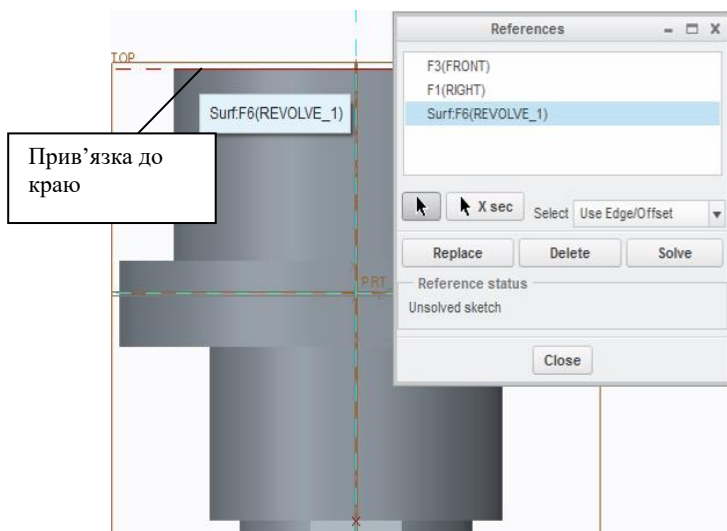


Рисунок 6.41 – Проставлення прив'язки

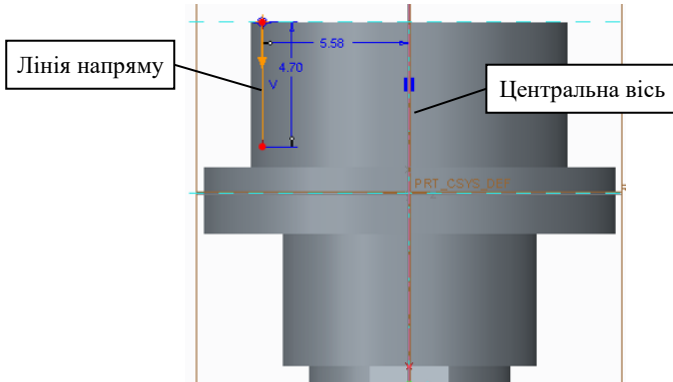




Рисунок 6.42 – Побудова лінії напрямку протягування по спіралі

Далі, використовуючи інструмент **Normal (Нормаль)**  з групи інструментів **Dimension (Розмір)** утримуючи клавішу **Alt**, послідовно виберемо побудовану пряму, центральну вісь і знову пряму, після чого проведемо курсор миші до появи лінії в протилежну сторону і виберемо її (рис. 6.43). Завершивши процес побудови ліній (завершення ескізу ) , які вказують напрямок протягування по спіралі, вкажемо в якості осі обертання вертикальну центральну вісь, вибравши її.

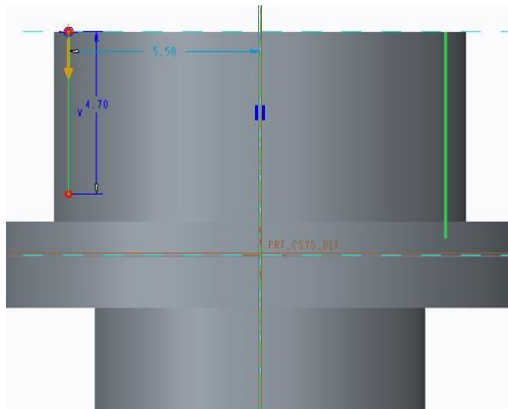


Рисунок 6.43 – Побудова нормалі






Вкажемо крок для спіралі 0,5 мм, і режим видалення матеріалу  у вікні редагування параметрів спіралі (рис. 6.44). За замовчуванням будемо використовувати правосторонню спіраль .



Рисунок 6.44– Панель параметрів для операції протягування по спіралі

Перейдемо до побудови самого кресленика для вирізу, вибравши у вікні параметрів іконку **Create or edit sweep section** (Створити або редагувати перетин протягування) . Використовуючи інструмент **Line Chain** (Ланцюг ліній) , побудуємо трикутник, прив'язавши одну його вершину до перетину раніше побудованих осьових ліній. Після цього, заокруглимо один кут, використовуючи інструмент **Circular** (Кругле) . Проставимо розміри таким чином, щоб побудований ескіз (перетин) було розташовано приблизно так, як показано на рисунку (рис. 6.45).

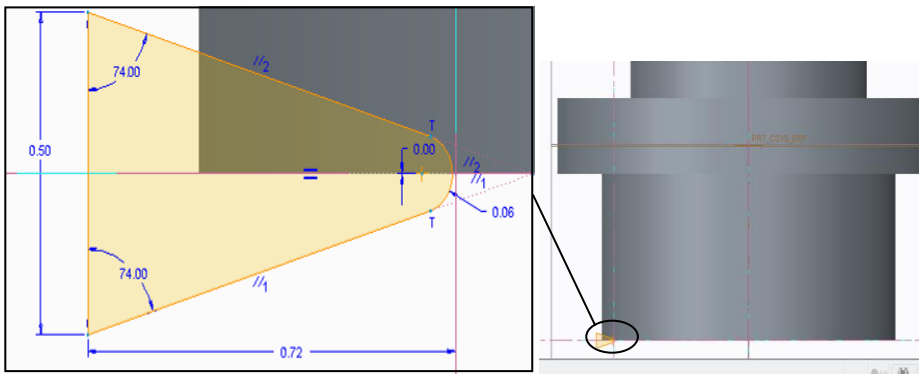




Рисунок 6.45 – Побудова ескізу

Завершивши побудову ескізу натиснувши , і завершимо побудову вирізу по спіралі  (рис. 6.46).

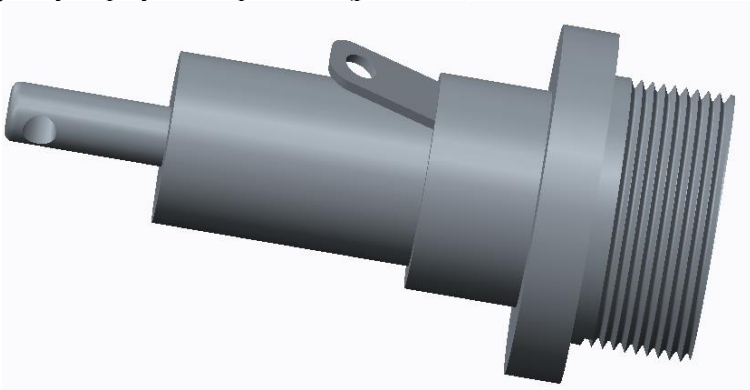





Рисунок 6.46 – Побудований виріз спіралі в різьбі

Примітка: Якщо побудувати виріз різьби не вдалося, іконка  недоступна, то використовуючи інструмент для переходу на редагування перетину  з вікна (рис. 6.44) спробуйте зменшити довжину горизонтального відрізка, побудованого раніше перетину (рис. 6.45).

Другий виріз різьблення побудуємо аналогічним чином за допомогою операції **Helical Sweep (Протягування по спіралі)**. Вибравши дану операцію, перейдемо на опцію **Define Interval Helix Profile...**(Визначається внутрішній профіль спіралі...) в контекстному меню і вкажемо площину **TOP**, прив'язану до площини **FRONT**. Далі, використовуючи інструмент **References (Прив'язка)** , вкажемо лінію прив'язки вирізу (рис. 6.47).

Побудуємо лінію напряму протягування по спіралі і вертикальну центральну вісь обертання (рис. 6.48) і так само як у попередньому прикладі побудови різьби будуємо нормаль (рис. 6.43).

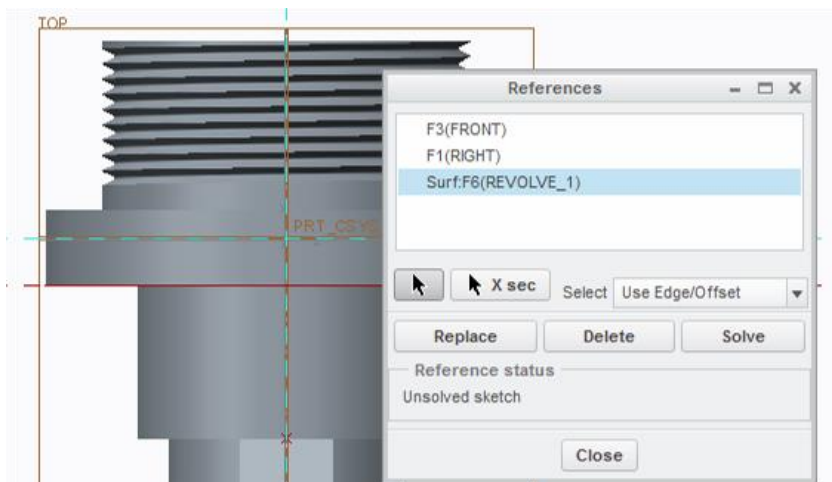


Рисунок 6.47 – Проставлення прив'язки

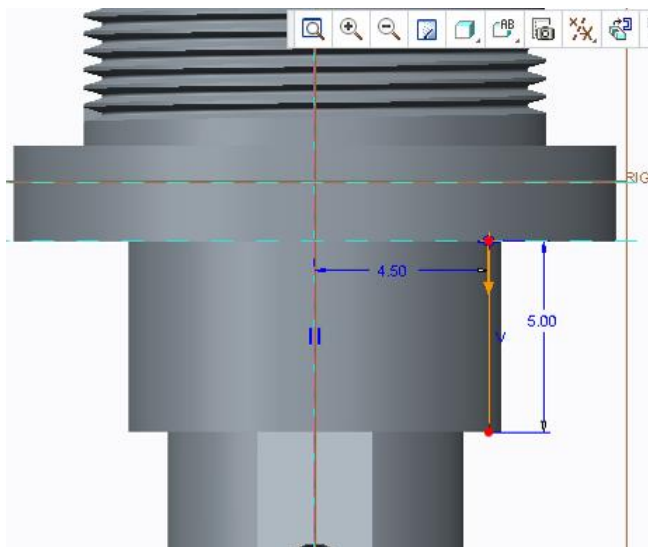





Рисунок 6.48 – Побудова лінії напрямку протягування по спіралі

Далі, перейшовши знову в ескіз **Create or edit sweep section** (Створити або редагувати перетин протягування) , намалюємо наступний ескіз вирізу (рис. 6.49). Після завершення побудови ескізу , і вказавши ті ж параметри, що і при побудові попереднього протягування по спіралі (див. рис. 6.44), завершимо операцію протягування .

Результуючу модель основи утримувача (рис. 6.50) збережемо, використовуючи команду **File**→**Save** (Файл→Зберегти).

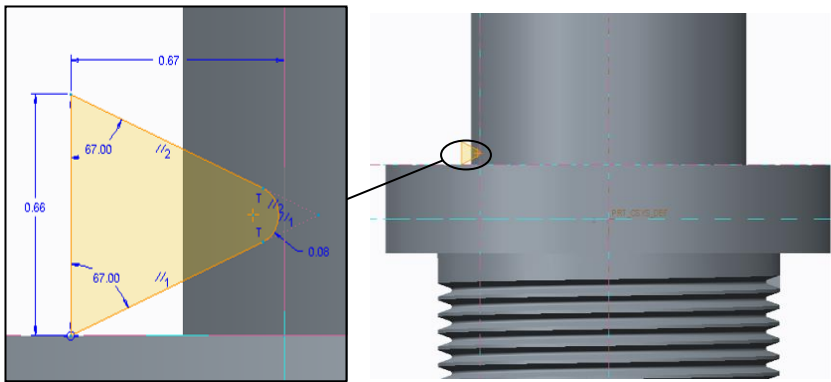


Рисунок 6.49 – Побудований ескіз

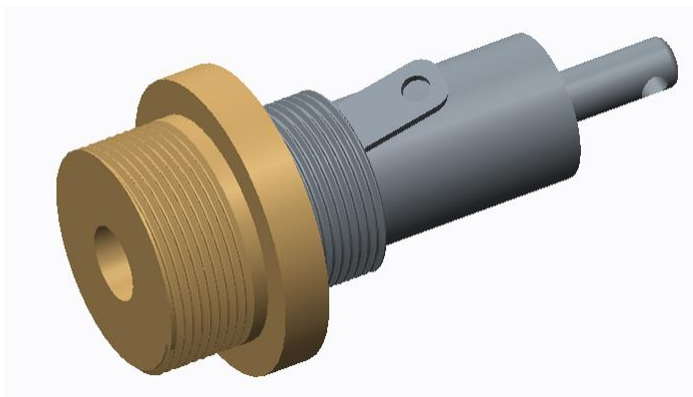


Рисунок 6.50 – Основа утримувача вставки плавкої

Знаходячись в застосунку Creo Parametric системи Creo 1.0, розпочнемо побудову моделі кришки для основи утримувача вставки плавкої, створивши нову твердотільну деталь, використовуючи для цього команду **File (Файл)** → **New (Створити)** та задавши наступні параметри:

- **Type (Тип):** Part (Деталь);
- **Sub-type (Підтип):** Solid (Тверде тіло);
- **Name (Ім'я):** lid_holder.

Під час створення зніmemo галочку з **Use Default Template (Використовувати шаблон за замовчуванням)**, натиснемо на кнопку **ОК**, та у новому відкритому вікні задамо той же шаблон solid-part-mmns.ptr, обравши його з каталогу на диску. Натиснемо на кнопку **ОК** для підтвердження параметрів.





Побудуємо циліндр за допомогою операції **Extrude (Витягнути)**  з групи інструментів **Shapes (Форми)** вкладки **Model (Модель)**. Вибравши дану операцію, перейдемо до побудови ескізу обравши площину **RIGHT** та відобразивши її паралельно екрану **Sketch View (Вибір ескізу)** . Накреслимо окружність, діаметром 15.4, за допомогою інструменту **Center and Point (Центр та точка)**  з групи інструментів **Sketch (Ескіз)**. Завершивши побудову ескізу , задамо довжину витягування циліндра 13,5 мм і напрям витягування вгору (рис. 6.51).



Рисунок 6.51 – Завдання параметрів для витягування окружності

Підтвердивши вказані параметри кліком по кнопці з піктограмою , отримаємо наступний циліндр (рис. 6.52).

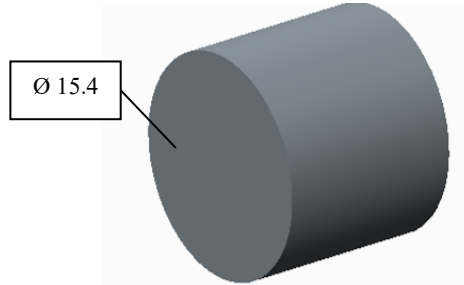




Рисунок 6.52 – Побудований циліндр

Для побудови вирізу з даного циліндра іншого меншого циліндра скористаємося можливістю інструменту **Extrude (Витягнути)**  витягування з видаленням матеріалу. Перейдемо на площину **RIGHT** для побудови ескізу. Побудуємо окружність діаметром 12 мм за допомогою того ж інструменту **Center and Point (Центр та точка)** .






Після підтвердження ескізу  задамо довжину витягування 3,5 мм і тип витягування з видаленням матеріалу  (рис. 6.53).



Рисунок 6.53 – Параметри для витягування з видаленням матеріалу

Попередній перегляд даної операції витягування і її результат показаний на рисунку 6.54.

Для реалізації вирізу непотрібної частини деталі на площині **TOP** поставимо точку прив'язки **Point (Точка)**  до деталі (рис. 6.55), до якої буде прив'язаний майбутній ескіз.

Використовуючи інструмент **Revolve (Обертати)**  виріжемо з деталі зайву частину матеріалу. Для цього перейдемо на площину **TOP** для побудови ескізу, обравши дану площину курсором миші і застосувавши інструмент **View Sketch (Вибір ескізу)** .

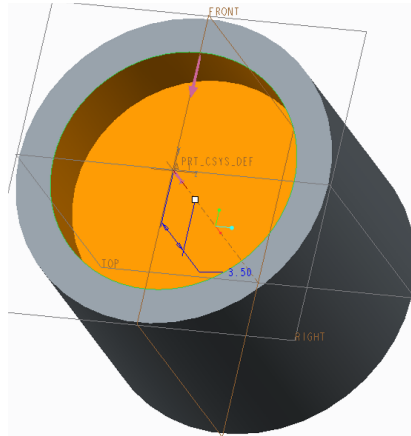


Рисунок 6.54 – Витягування з видаленням матеріалу

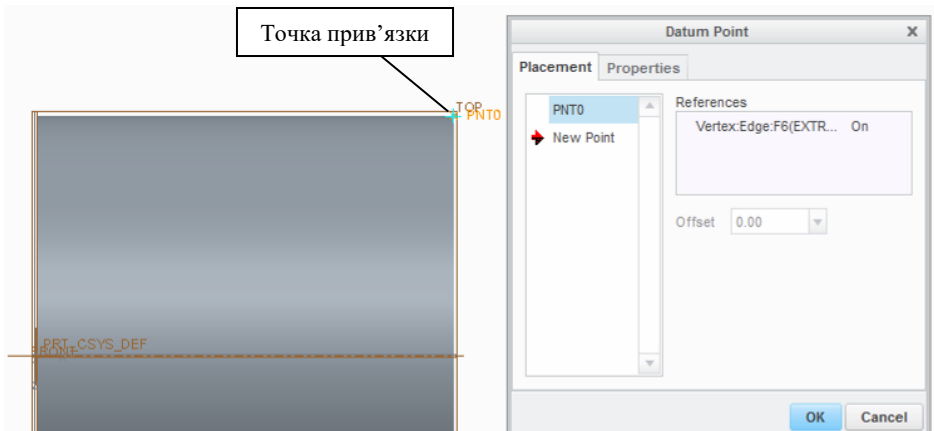





Рисунок 6.55 – Встановлення прив'язки

Побудуємо ескіз за допомогою інструмента **Line Chain (Ланцюг ліній)**  (рис. 6.56). Першу точку ламаної лінії необхідно прив'язати до раніше побудованої точки прив'язки. Для цього, вибравши інструмент **Line Chain**, наведемо курсором миші на дану точку прив'язки та утримуючи на клавіатурі клавішу **Alt**, зробимо клік лівою клавішею миші. Прив'язка буде відображатися блакит-

ним кольором і при наведенні на неї курсором миші автоматично розміщує точку відрізка на точці прив'язки, нам лише залишається зробити клік лівою клавішею миші, аби прив'язати її.

Завершивши побудову ескізу , задамо кут обертання на 360 градусів та вкажемо параметр видалення матеріалу  (рис. 6.57).

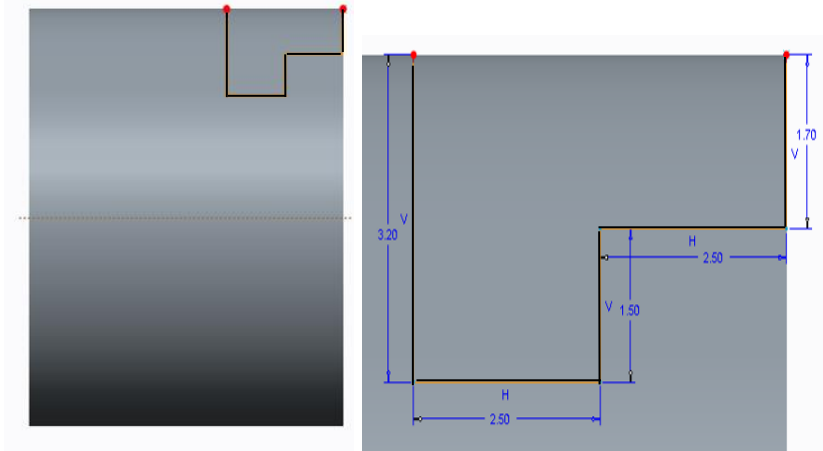


Рисунок 6.56 – Ескіз для вирізу з обертанням

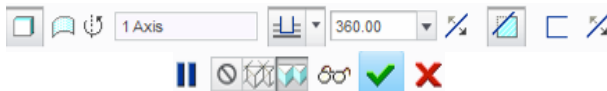



Рисунок 6.57 – Параметри для обертання з виділенням матеріалу

Результат вирізу непотрібної частини деталі за допомогою операції обертання показана на рис. 6.58.

Щоб побудувати виступи на верхній поверхні деталі, котра паралельна площині **RIGHT**, видавимо ескіз одного з них, і використовуючи масив, розмножимо його. Для початку побудуємо вісь **Axis (Вісь)**  з групи інструментів **Datum (Опорний елемент)**, навколо якої буде будуватися круговий масив (рис. 6.59).

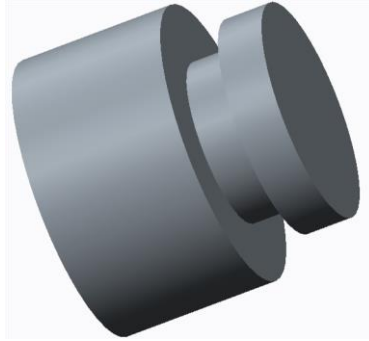


Рисунок 6.58 – Результат обертання з видаленням матеріалу

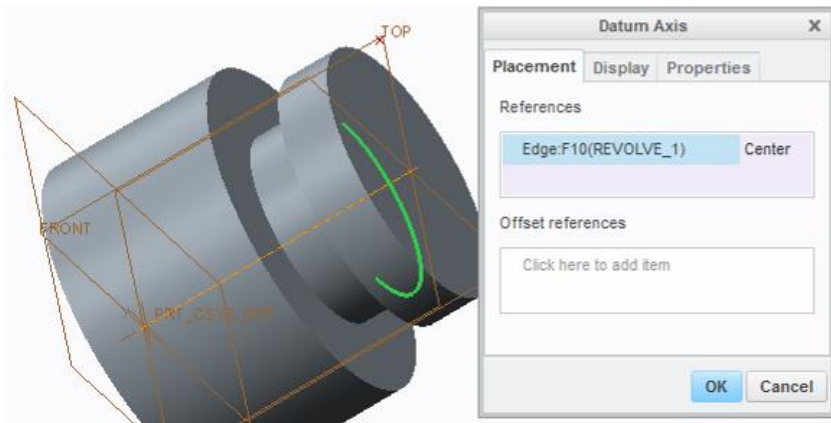





Рисунок 6.59 – Побудова опорної вісі

Зробимо витягування  ескізу, використовуючи для цього побудований на поверхні деталі ескіз (рис. 6.60). При побудові ескізу слід використовувати інструмент **Line Chain** (Ланцюг ліній)  і **3-Point/Tangent End** (3-точки / дотична до краю) .

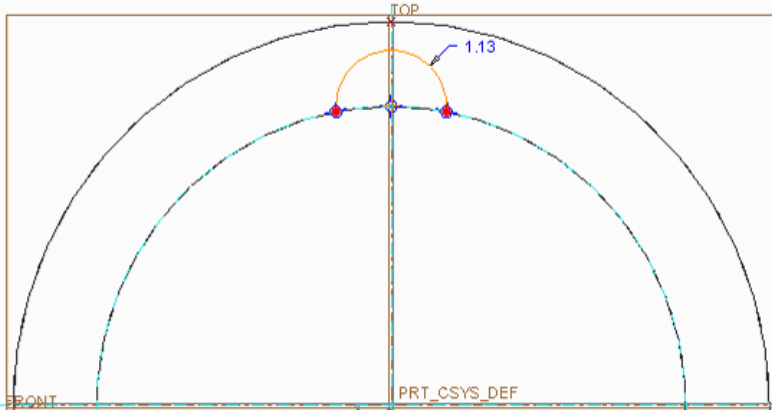



Рисунок 6.60 – Ескіз для виступів

Для зручності побудови перейдемо до не зафарбованого стилю відображення, **No Hidden (Без прихованих ліній)**, обравши його з випадаючого **списку відображення (Display Style)** на групі інструментів **Model Display (Відображення моделі)** вкладки **View (Вид)**. Побудову дуги будемо проводити таким чином, щоб дві її точки прив'язались до лінії кола верхньої площини. Для цього, обравши інструмент **3-Point/Tangent End**, наведемо курсором миші на необхідне нам місце знаходження точки на даній лінії і, утримуючи клавішу **Alt**, зробимо один клік лівою клавішею миші. Після виконання даних дій під час наведення курсору миші на дану лінію кола, буде відображатись точка для прив'язки. Поставимо дві точки на цій лінії (кліками лівої клавіші миші) для побудови дуги, і ще одну вище для завдання висоти дуги. Задамо радіус дуги 1.13 мм.

Завершивши побудову ескізу , перейдемо до стилю відображення **Shading (Затінення)**. Задамо параметри витягування: довжину – 2,5мм і тип без видалення матеріалу (рис. 6.61).

Нижче на рисунку 6.62 зображено результуючий виступ.



Рисунок 6.61 – Завдання параметрів витягування для виступу

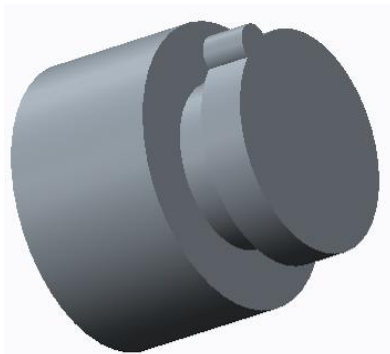


Рисунок 6.62 – Побудований виступ

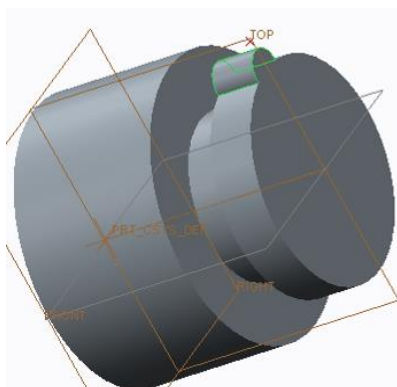


Рисунок 6.63 – Вибір виступу

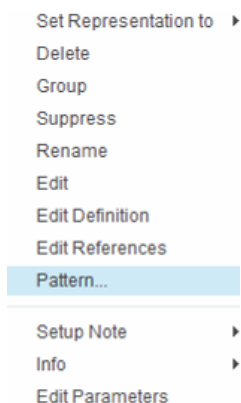


Рисунок 6.64– Контекстне меню

Для збільшення кількості виступів, виділимо побудований виступ (рис. 6.63) і в дереві моделі виділивши останню операцію витягування, викличемо контекстне меню кліком правої кнопки миші, де оберемо інструмент **Pattern..(Масив...)** (рис. 6.64).

Далі вкажемо вид масиву **Axis (Круговий)**, кількість дубльованих об'єктів – 8, відстань між ними – 48 градусів і опорну вісь, навколо якої відбуватиметься обертання (рис. 6.65, 6.66).

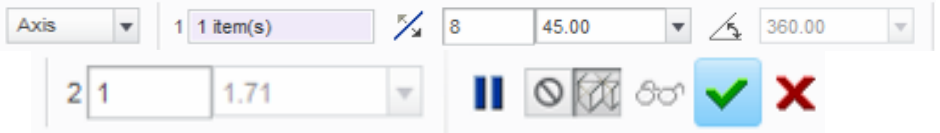



Рисунок 6.65 – Панель параметрів для масиву

Завершивши завдання параметрів, підтвердимо їх, натиснувши на піктограму  на панелі. В результаті отримуємо деталь з восьми виступами на її верхній поверхні (див. рис. 6.67).

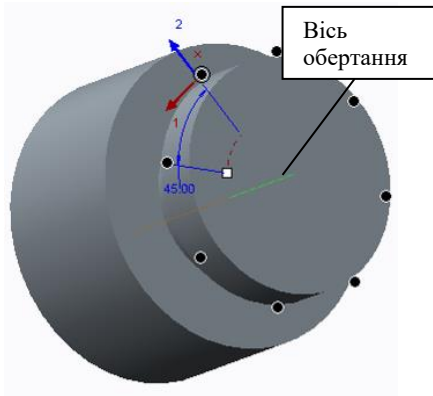


Рисунок 6.66 – Вибір вісі для побудови масиву обертання

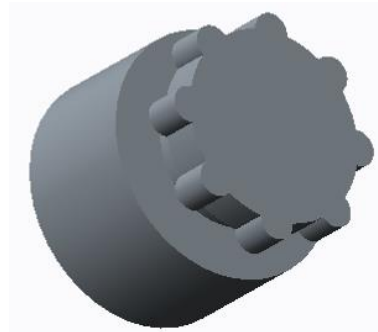


Рисунок 6.67 – Результат застосування масиву

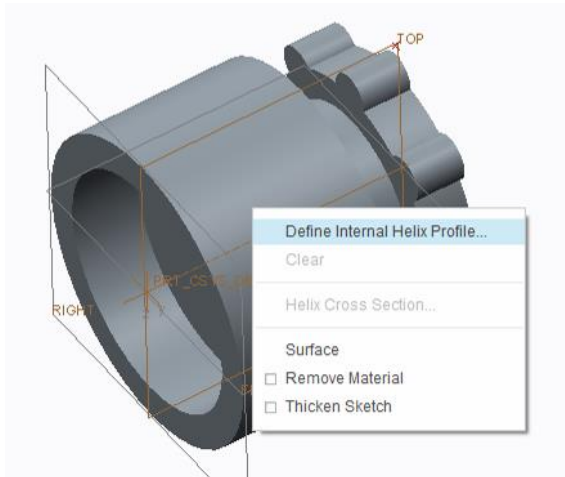


Рисунок 6.68 – Вибір опції Define Interval Helix Profile...

Побудуємо виріз різьблення, використовуючи інструмент **Helical Sweep (Протягування по спіралі)**. Вибравши цей інструмент, в контекстному меню (рис. 6.68) перейдемо на опцію **Define Internal Helix Profile... (Визначається внутрішній профіль спіралі...)** та вкажемо площину **FRONT**, прив'язану до площини **TOP** (рис. 6.69).

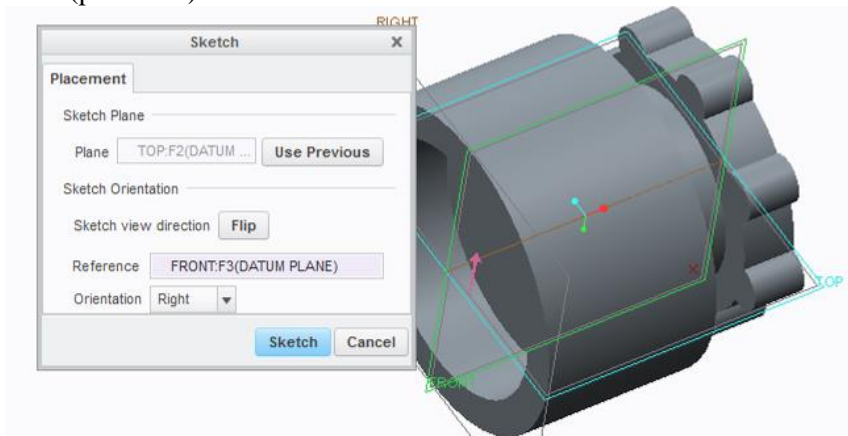


Рисунок 6.69 – Вибір площини ескізу

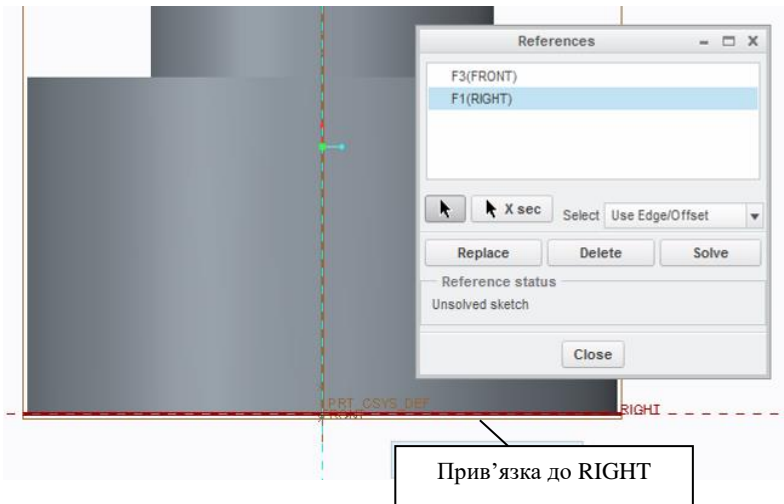





Рисунок 6.70 – Встановлення прив'язки

Далі, використовуючи інструмент **References (Прив'язка)** , вкажемо, до якої частини деталі буде прив'язуватись вирізьби (рис. 6.70).

Побудуємо лінію напряму протягування по спіралі і вертикальну центральну вісь обертання (рис. 6.71). Побудову будемо проводити при відображенні моделі у стилі **Wireframe (Каркас)**. Далі, використовуючи інструмент **Normal (Нормаль)** , утримуючи клавішу **Alt**, як і у попередніх прикладах побудови різьби будуємо нормаль, по черзі виберемо пряму, центральну вісь і знов пряму, після чого проведемо курсором миші в протилежну сторону до появи лінії і виберемо її.

Завершивши побудову ескізу , вкажемо в якості вісі обертання вертикальну центральну вісь.

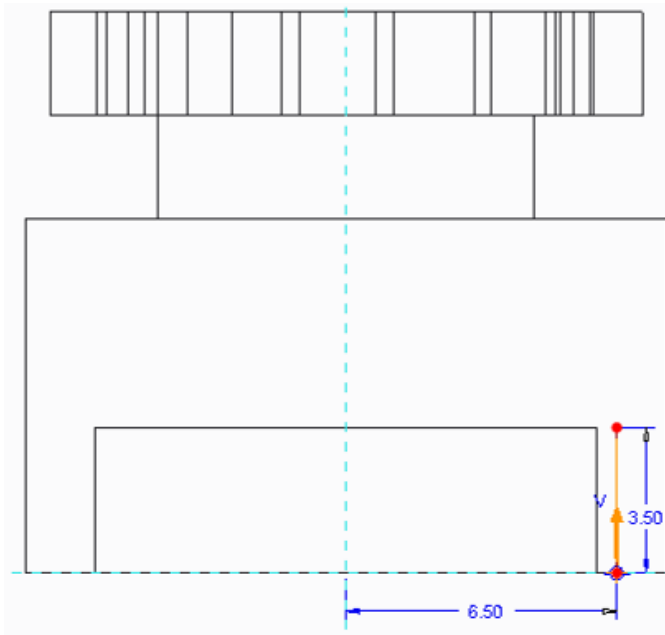






Рисунок 6.71 – Побудова лінії напрямку протягування по спіралі

Завершимо побудову ескізу , обравши центральну вісь, вкажемо наступні параметри: крок для спіралі – 0.5мм, напрям протягування спіралі – праворуч , та виріз матеріалу  (рис. 6.72). Перейдемо знову в ескіз, натиснувши на піктограму операції **Create or edit sweep section (Створити або редагувати перетин протягування)** , і намалюємо ескіз для протягування по спіралі (рис. 6.73).

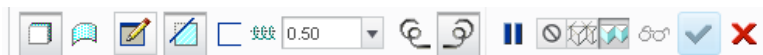


Рисунок 6.72 – Параметри при протягуванні по спіралі

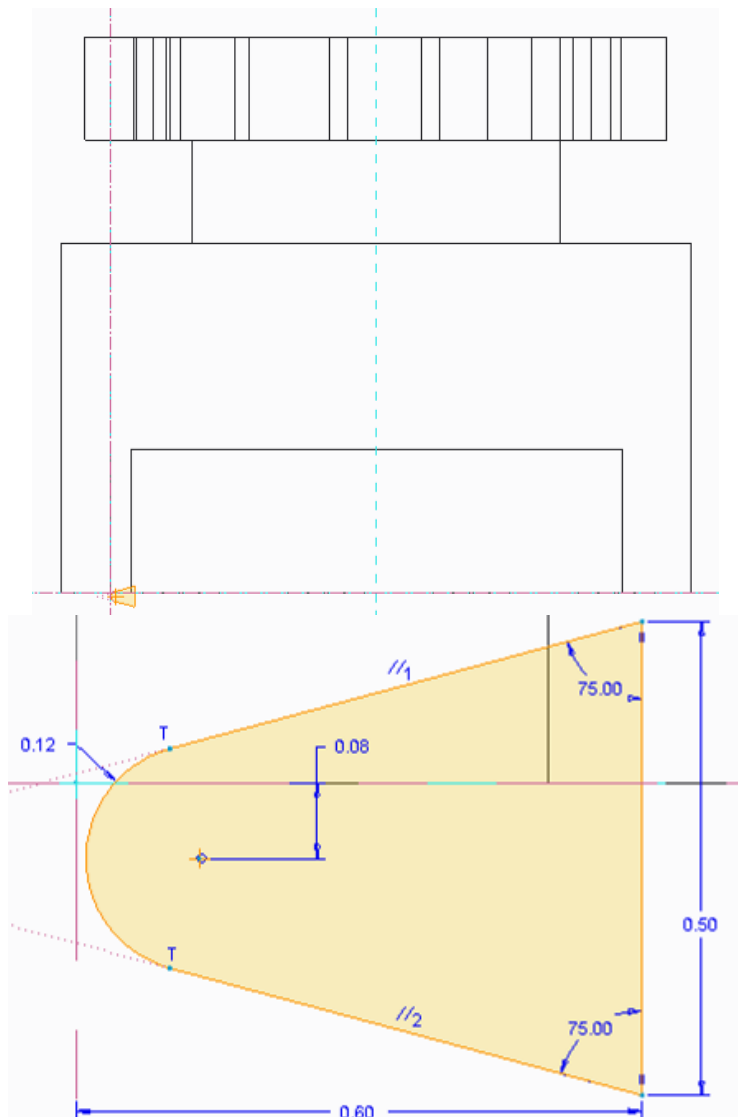


Рисунок 6.73 – Побудова ескізу для протягування

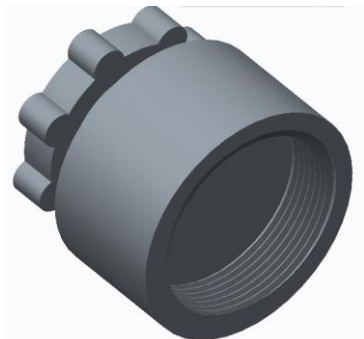



Рисунок 6.74 – Результат операції протягування по спіралі

Завершивши операцію протягування по спіралі , отримаємо наступну модель кришки для утримувача (див. рис. 6.74).

Збережемо отриману модель кришки утримувача, використовуючи команду **File**→**Save (Файл**→**Зберегти)**.


6.4.3 Приклад побудови плоского кресленника

Розглянемо приклад побудови 2D кресленника раніше розробленої 3D моделі кришки утримувача вставки плавкої (рис. 6.74).

Спочатку створимо файл кресленника, обравши команди **File (Файл)** → **New (Створити)**, та у відкритому вікні **New (Новий)** (рис. 6.75) задамо:

- тип файлу **Drawing (Кресленник)**;
- назву файлу в поле **Name (Назва)**: drawing_lid_holder.drw;

У вікні **New Drawing** підключимо модель даної кришки утримувача, та обравши шаблон **Empty (Пустий)** вкажемо стандартний альбомний розмір листа А3 (420 x 297мм.), підтвердимо обрані параметри натиском на **ОК** (рис. 6.76). В результаті буде створено файл для кресленника з одним порожнім аркушем.

Примітка: У випадку, якщо при створенні файлу кресленника не була обрана 3D модель, або необхідно додати ще одну модель іншої деталі, то це можна зробити й після створення файлу. Для цього необхідно обрати команду **Drawing Models (Моделі кресленника)**  з групи інструментів **Model Views (Види моделі)** вкладки **Layout (Компоновка)**,

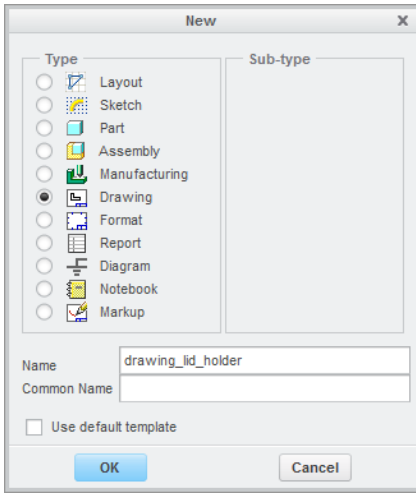


Рисунок 6.75 – Створення файлу кресленника

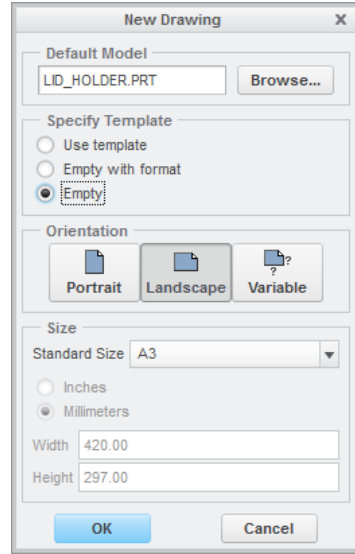


Рисунок 6.76 – Вказівка моделі та розміру листа

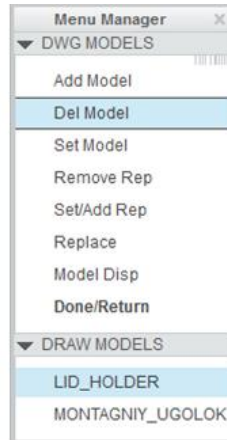
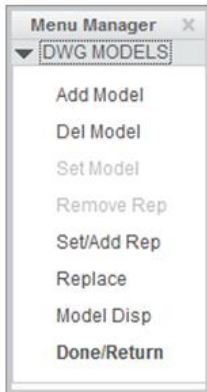


Рисунок 6.77 – Меню для додання моделей до кресленника та керування ними

та у відкритому менеджері меню (рис. 6.77), обравши команду **Add Model (Додати модель)**, вказати місце знаходження файлу 3D моделі (файл з розширенням *.prt) і задати зміну **Done/Return (Готово/Повернути)**. Також, користуючись командами **Del Model** та **Set Model**, можна видаляти та робити активною додану до кресленника раніше модель. Проте слід пам'ятати, що якщо вже існує вид даної моделі, то видалення її заборонено, доки не будуть видалені всі види кресленника, побудовані на основі цієї моделі.

В системі Creo Parametric головний вид названо **загальним видом**. На кресленнику при розміщені видів моделі, перший вид і є загальним, а всі інші є похідними видами від нього.

Для додання загального виду на кресленник, перейдемо на вкладку **Layout (Компоновка)** на стрічковому меню, та в групі інструментів **Model Views (Види моделі)** виділимо кліком лівої клавіші миші піктограму **General (Загальний)**. У вікні **Select Combined State (Вибрати комбінований стан)**, не будемо вказувати комбінований стан, тому просто натиснемо на клавішу **OK**. Для додання на аркуш кресленника загального виду наведіть курсор миші в місце його розташування (наприклад в верхню ліву частину листа), та зробіть клік лівою клавішею миші. Вказана точка і буде центральною точкою розміщуваного виду. У заданому місці буде додано вид моделі (рис. 6.78), та відкриється вікно **Drawing View (Вид кресленника)** для налаштування відображення даного виду моделі.

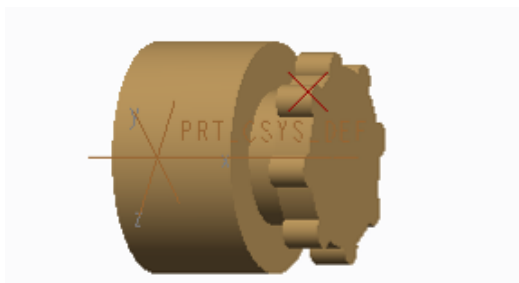


Рисунок 6.78 – Доданий не налаштований загальний вид моделі

На вкладці категорії **View Type (Тип виду)** в області **View type (Тип виду)** в поле **View name (Назва виду)** введемо назву нашого виду – `general_view_1`. Для налаштування орієнтування ви-

ду, в області **View orientation (Орієнтація виду)** перемикач **Select orientation method (Обирати метод орієнтації)** залишимо встановлений за замовченням в положення **Views name from the model (Імена видів з моделі)** та оберемо зі списку **Model view names (Імена видів моделі)** фронтальний вид **FRONT**. Залишивши орієнтацію за замовченням **Default orientation (Орієнтація за замовчуванням)** типу **Trimetric (Триметрія)**, натиснемо на кнопку **Apply (Застосувати)**, щоб задіяти проведені налаштування (див. рис. 6.79). Не закривайте вікно налаштувань. У разі, якщо вікно було закрито, виділіть кліком створений вид на листі чи в дереві моделі за допомогою курсору миші, та за допомогою правої клавіші миші визвіть контекстне меню, де й оберіть команду **Properties (Властивості)**.

Перейдемо на вкладку **Scale (Масштаб)** та вкажемо свій масштаб – 5 мм. Для цього встановимо перемикач на **Custom scale** і введемо це значення в поле та натиснемо на клавішу клавіатури **Enter**. В результаті виконаних попередніх дій на виді буде зображено кришку з фронтального боку в масштабі. Знизу з'явиться позначка масштабування – **SCALE 5.0** (рис. 6.80)

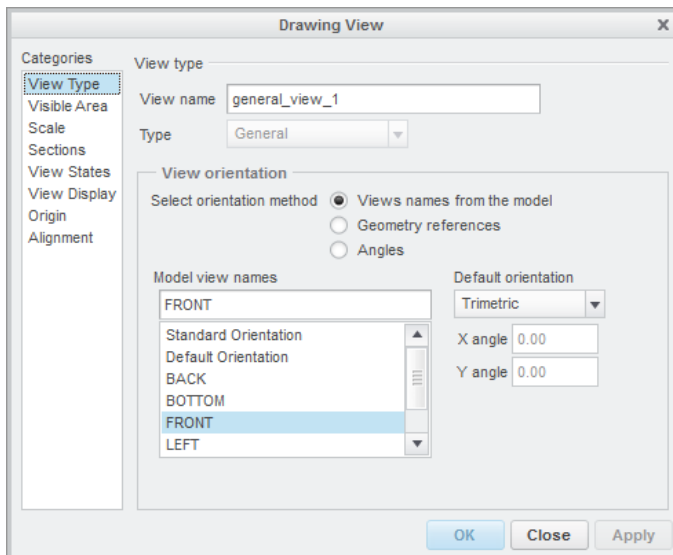


Рисунок 6.79 – Налаштування орієнтації загального виду

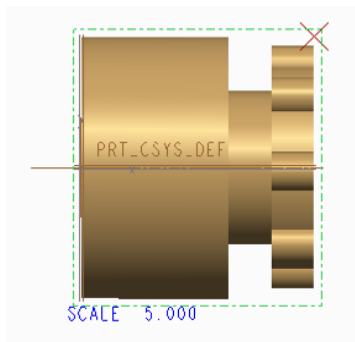




Рисунок 6.80 – Зображення загального виду після масштабування та орієнтації

Змінимо стиль відображення виду на **No Hidden (Без прихованих)** , перейшовши до категорії налаштувань **View Display (Показ виду)**, і вибравши даний стиль в списку стилів **Display style**. Змінимо і стиль показу дотичних кромок на **None (Немає)**  у списку **Tangent edge display style (Стиль показу дотичних кромок)** (рис. 6.81). В результаті загальний вид кришки утримувача прийме вигляд (див. рис. 6.82).

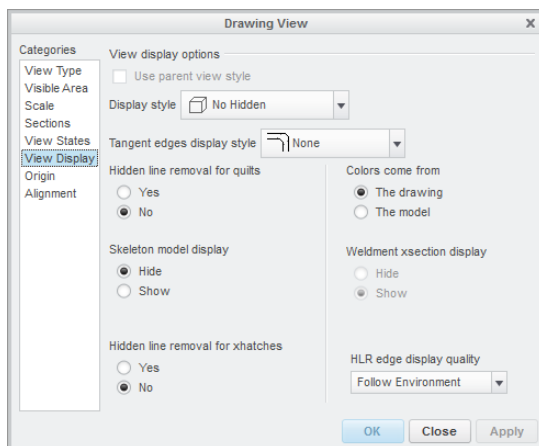


Рисунок 6.81 – Налаштування стилю показу виду та дотичних кромок

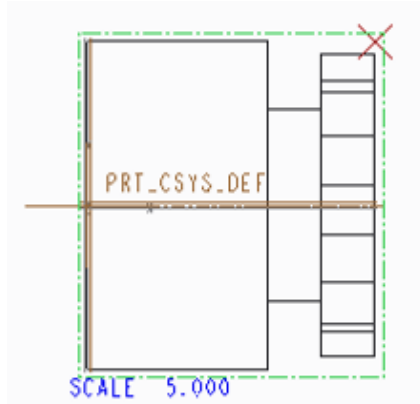


Рисунок 6.82 – Отриманий загальний вид

Перейдемо на вкладку **Original (Початок)**: та змінимо позицію розміщення виду на аркуші **View location in sheet (Переміщення по аркушу)**, ввівши значення X та Y відповідно 4 та 8,5 (рис. 6.83). Прийmemo зміни, натиснувши на кнопку **Apply (Прийняти)**, та закриємо вікно **Close (Закрити)**.

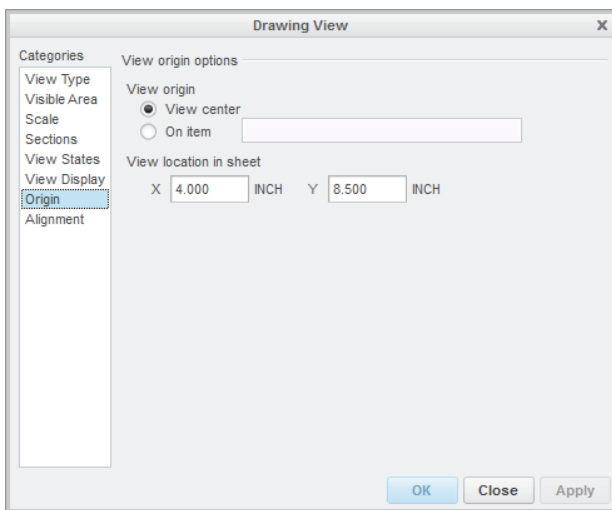



Рисунок 6.83 – Зміна позиції розміщення виду на аркуші

Збережіть створений файл кресленника, виконавши команду **File (Файл) → Save (Зберегти)**, та вказавши місце розташування, натисніть на **ОК** (бажано зберігати файл кресленника разом з підключеним до нього файлом моделі).

Проекційний вид – це ортогональна проекція геометрії іншого виду по горизонтальній чи вертикальній осі. Як правило види даного типу розміщуються вище, нижче, справа чи зліва свого батьківського виду, вирівняні до нього по вертикалі, чи по горизонталі, та зв’язані проекційними зв’язками. Проекційний вид може бути прямим (в напрямку погляду на деталь) чи зворотнім (як в дзеркалі). Це визначається значенням параметру `projection_type`. У випадку, коли ця змінна рівна `first_angle` то на виді зліва від батьківського буде розміщено вид зліва, якщо – `third_angle` – то на виді справа від батьківського буде вид справа.

Продовжимо побудову нашого кресленника. Для початку задамо для всіх наступних будованих видів стиль показу **No Hidden (Без прихованих)** , встановивши для цього опцію `model_display_for_new_views` в значення `no_hidden` (рис. 6.84). Щоб це зробити, перейдемо за командами: **File (Файл) → Prepare (Підготувати) → Drawing Properties (Властивості кресленника)** та у відкритому вікні **Drawing Properties (Властивості кресленника)** оберемо редагування (**change – змінити**) даних опцій (**Detail Options – Опції деталізації**). Далі просто введемо назву опції в поле **Option (Опція)** та виберемо дане значення в списку **Value (Значення)**. Додамо дану опцію до опцій кресленника натисненням кнопки **Add / Change (Додати / Змінити)** та, підтвердивши зміни натиском на **Apply (Прийняти)**, закриємо (**Close**) відкриті вікна налаштування опцій кресленника.

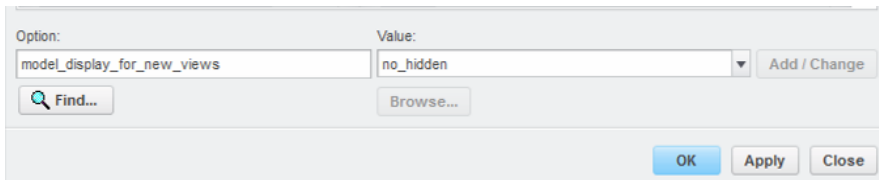



Рисунок 6.84 – Додання опції No Hidden

Додамо проєкційний вид зверху. Для цього наведемо курсор миші на фронтальний вид, та виділимо його кліком лівої клавіші миші. Далі в контекстному меню оберемо команду **Insert Projection View... (Вставити проєкційний вид...)**, та перемістивши курсор миші нижче фронтального виду зробимо клік лівою клавішею миші для вказання точки центру його розміщення. В результаті буде додано ще один вид (рис. 6.85).

Виділивши щойно доданий вид, перейдемо до діалогового вікна **Drawing View (Вид кресленика)**. Змінимо назву виду на **bottom_2**, вписавши її в поле **View name (Назва виду)** категорії **View Type (Тип Виду)**. Покажемо 2D розріз на даному виді. Для цього, не виходячи з вікна налаштування показу виду, перейдемо до категорії **Sections (Перетини)** та перемістимо перемикач на **2D cross-section**. Додамо новий розріз натиснувши на **Add cross-section to view (Додати штриховку в вид)** . Далі, якщо менеджер меню не відкритий, в таблиці в полі **Name (Назва)** обрати **Create New (Створити новий)**.

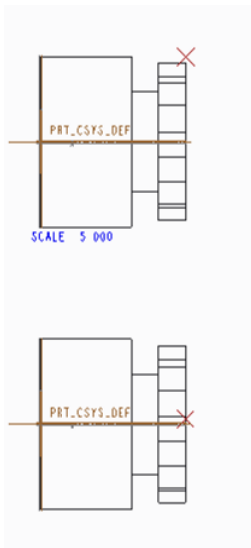


Рисунок 6.85 – Доданий вид зверху



Рисунок 6.86 – Менеджер меню вибору типу розрізу

В менеджері меню оберемо властивості **Planar (Плоский), Single (Одинарний)** та натиснемо на **Done (Готово)** (рис. 6.86). В поле, що з'явилось введемо назву розрізу – **A** та натиснемо на **Enter**. Далі в наступному менеджері меню оберемо **Plane (Плоскість)** та в дереві моделі базову площину **TOP**. Дана площина буде перерізати нашу деталь. Підтвердимо виконані дії – **Apply** та закриємо вікно настройки виду (**Close**). На рисунку 6.87 показано доданий запис до таблиці розрізів та вид зверху з розрізом.

Перед тим як побудувати проєкційний вид з права встановимо наступну опцію `projection_type` в значення `third_angle` (рис. 6.88).

Для додання даного виду, виділимо фронтальний вид `general_view_1` та оберемо інструмент **Projection (Проекційний)** з групи інструментів **Model Views (Види моделі)** вкладки **Layout (Компоновка)**. Після чого зробимо клік праворуч від фронтального виду для розташування виду з права. Змінимо назву виду на – `right_3`, обравши його в дереві моделі, та скориставшись командою **Rename (Перейменувати)** з контекстного меню. Отриманий кресленик, що містить три види без розмірів зображений нижче (рис. 6.89).

Збережіть отриманий результат за допомогою команди **Save (Зберегти)**, натиснувши поєднання клавіш **Ctrl + S**.

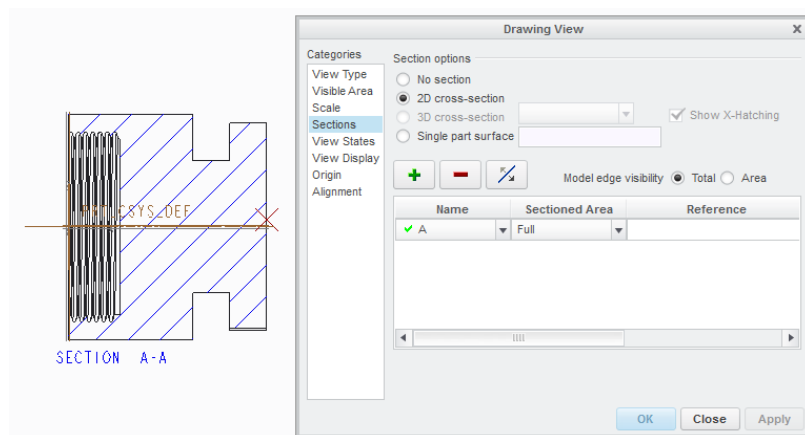


Рисунок 6.87 – Запис доданого розрізу



Рисунок 6.88 – Додання опції projection_type

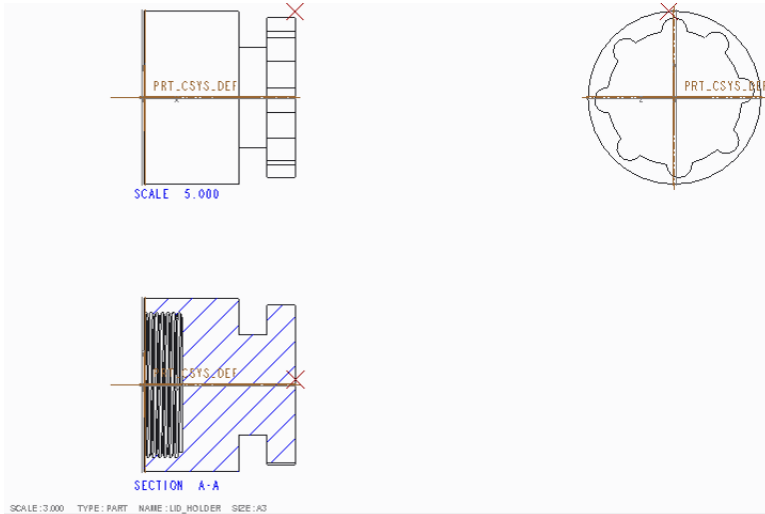


Рисунок 6.89 – Кресленник кришки утримувача без розмірів

6.4.4 Приклад створення динамічного складня

Для створення складня моделі запобіжника, з раніше створених твердотільних моделей його частин (див. п. 6.4.2), створимо файл-складень, використавши для цього команди **File (Файл)** → **New (Створити)**, та вказавши наступні параметри (див. рис. 6.90), натиснемо на кнопку **ОК**.

Оскільки було знято прапорець, що вказував на використання шаблону за замовчуванням (**Use default template**), то у наступному відкритому вікні натиснемо на кнопку **Browse...(Перегляд...)** та оберемо створений раніше шаблон для складнів `asm-mmns.asm`. Обравши шаблон (прототип) для складня натиснемо **ОК** (рис. 6.91). В результаті виконаних дій буде відкрите вікно системи Creo Parametric 1.0 для роботи зі складнем.

Додамо першу деталь до нашого складня, котра буде базою, а всі останні будемо приєднувати (прив'язувати) до неї. У нашому випадку нею буде основа утримувача вставки плавкої ДВП4-1В. Для додавання компонент (деталей) до складня будемо використовувати операцію **Assemble (Скласти)** зі списку **Assemble (Скласти)** групи інструментів **Component (Компонент)** вкладки **Model (Модель)**. Вибравши дану операцію, оберемо з каталогу на дисківі раніше створений файл `base_holder.prt`. Таким чином ми додали до складня основу утримувача.

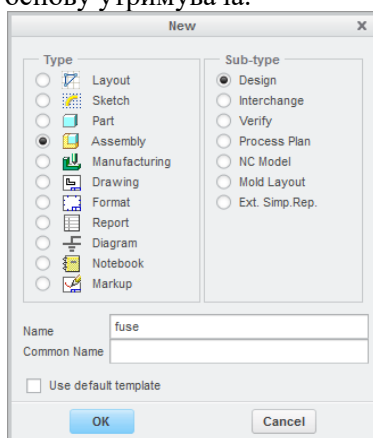


Рисунок 6.90 – Створення складня

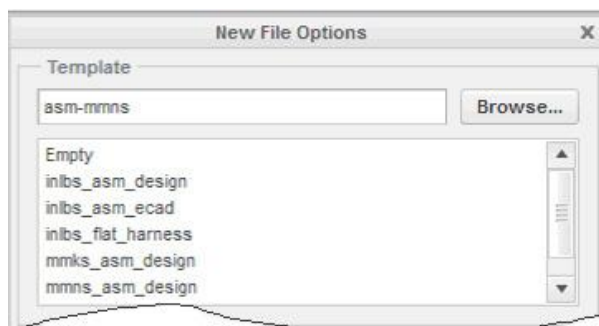



Рисунок 6.91 – Завдання шаблону

Залишилося лише зафіксувати її. В даному випадку будемо використовувати прив'язку **Default (За замовчуванням)**. Прив'язка **За замовчуванням**, зазвичай, використовується при розміщенні першого компоненту у складаній одиниці для того, щоб вирівняти його створену за замовчуванням систему координат зі створеною за замовчуванням системою координат складня. При використанні цієї прив'язки система сама визначає, які системи координат необхідно поєднати. Приклад додавання першого компоненту зображений на рисунку 6.92. Після натиснемо на підтвердження виконання операції .

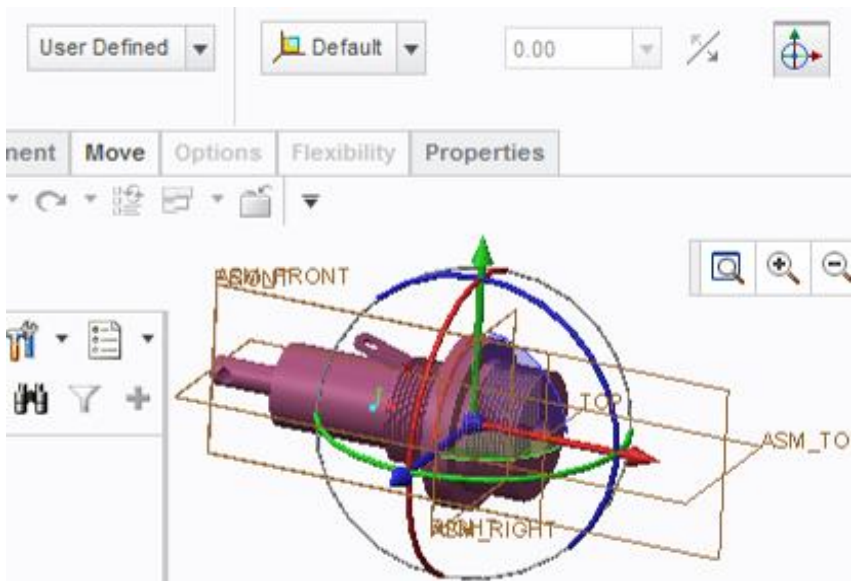



Рисунок 6.92 - Додавання першого компоненту

Другий компонент буде спряжений з використанням Первинного з'єднання **Slider (Повзун)**:

1. На вкладці **Model (Модель)** натисніть іконку  **Assemble (Зібрати)**. У вікні **Open (Відкрити)** двічі клікніть по файлу вставки плавкої – `fusible_link.prt`.

2. На панелі виконання операції складня розкриємо список **User Defined (Визначений користувачем)**. У списку типів з'єднань визначених користувачем виберіть з'єднання **Slider (Повзун)** та розкриємо випадаюче меню **Placement (Розміщення)** (рис. 6.93).

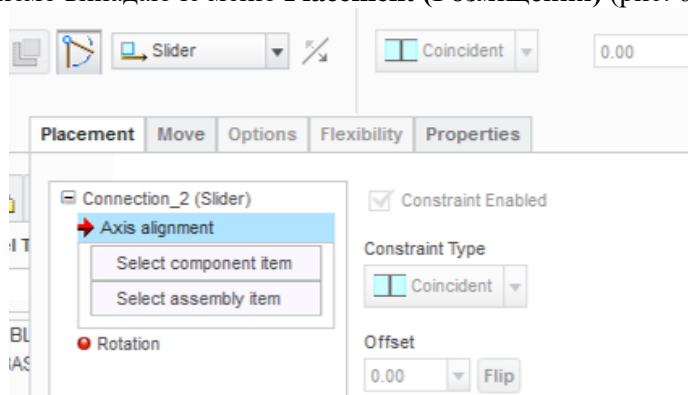


Рисунок 6.93 - Панель виконання операції додавання вставки плавкої до складня

3. У якості прив'язки **Axis alignment (Вирівнювання вісі)** вкажіть центральні вісі обертання на деталях `base_holder.prt` та `fusible_link.prt`, як показано на рисунку 6.94.

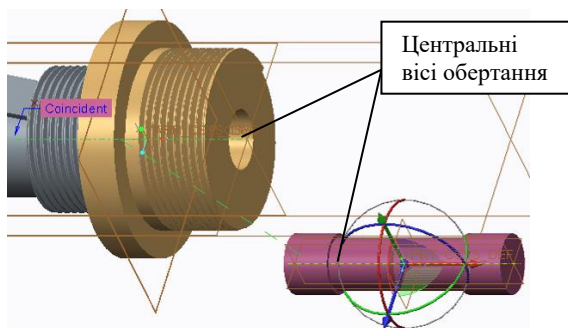


Рисунок 6.94 - Розміщення вставки плавкої за допомогою **Axis alignment (Вирівнювання вісі)**

4. У якості прив'язки **Rotation** (Поворот) з'єднаємо TOP площини деталей base_holder.prt та fusible_link.prt, як показано на рисунку 6.95.

5. Для завершення на діалоговій панелі натисніть .

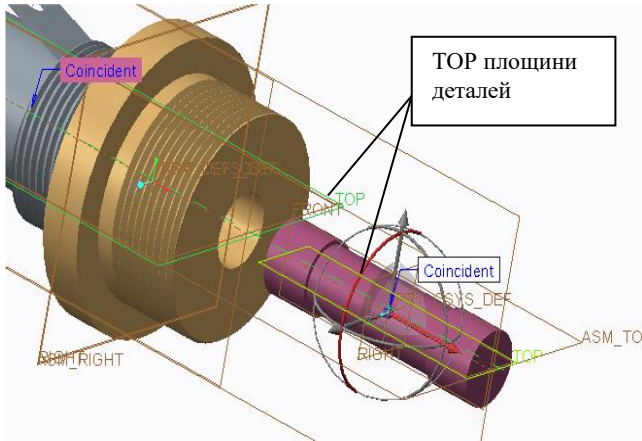



Рисунок 6.95 - Виділення TOP поверхонь у якості прив'язки **Rotation** (Поворот)

Коли вставка плавка додана до складня з використанням первинного з'єднання Slider (Повзун), можемо використати інструмент Drag component (Рухати компоненти) для того, щоб вручну перетягувати вставку плавку. Для цього необхідно перейти **Model (Модель)** → **Component (Компонент)** → **Drag component (Рухати компоненти)** . З'явиться вікно **Drag (Перетягти)**, в якому можна робити знімки та накладати обмеження.


Наведемо курсор миші на вставку плавку і клікнемо ЛКМ, повинен з'явитися чотирикутник, після чого, не затискаючи кнопки миші, рухаючи мишкою, ми можемо бачити, як рухається сама вставка плавка. Заведіть вставку плавку у середину основи утримувача та клікніть ЛКМ, щоб припинити перетягування (рис. 6.96).

Для завершення закрийте вікно Drag (Перетягти).

Спряження кришки з основою утримувача вставки плавкою будимо робити за допомогою Первинного з'єднання **Cylinder (Циліндр)**:



Рисунок 6.96 - Виконання команди Drag (Перетягти)

1. На вкладці **Model (Модель)** натисніть іконку  **Assemble (Зібрати)**. У вікні *Open (Відкрити)* двічі клікніть по файлу кришки утримувача вставки плавкої ДВП4-1 – lid_holder.prt.
2. На панелі виконання операції складня розкриємо список **User Defined (Визначений користувачем)**. У списку типів з'єднань, визначених користувачем виберіть з'єднання **Cylinder (Циліндр)** та знову відкриємо випадаюче меню **Placement (Розміщення)** (рис. 6.97).

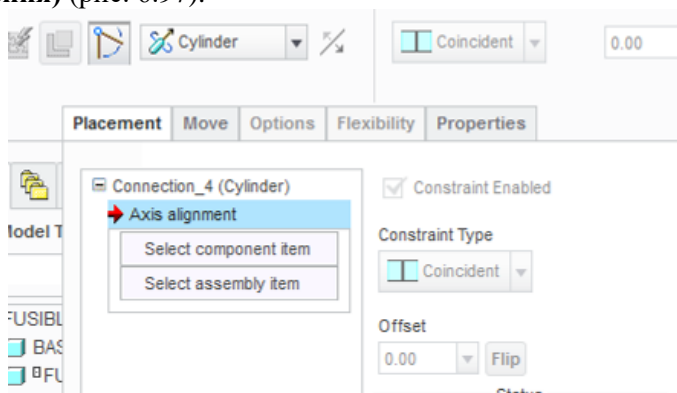


Рисунок 6.97 - Панель виконання операції додавання кришки запобіжника до складня

3. У якості прив'язки *Axis alignment* (Вирівнювання вісі) вкажіть на циліндричні поверхні деталей `base_holder.prt` та `lid_holder.prt`, як показано на рис. 6.98.

4. Для завершення натисніть .

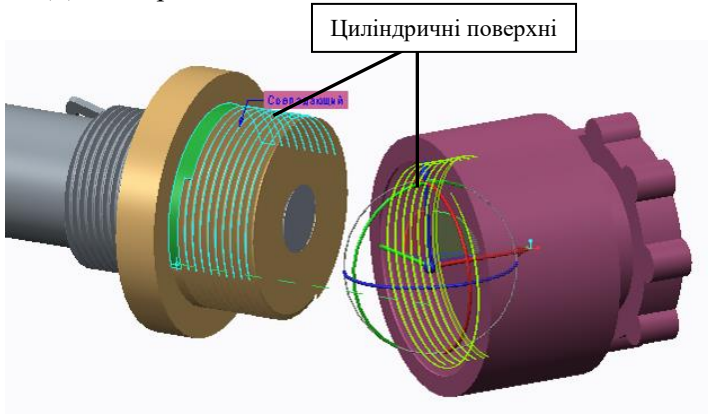



Рисунок 6.98 - Виділення циліндричних поверхонь деталей

При необхідності кришку запобіжника можна також пересунути в інше положення за допомогою інструменту , який викликається із вкладки **Model (Модель)** → **Component (Компонент)** → **Drag component (Рухати компоненти)**. (рис. 6.99)

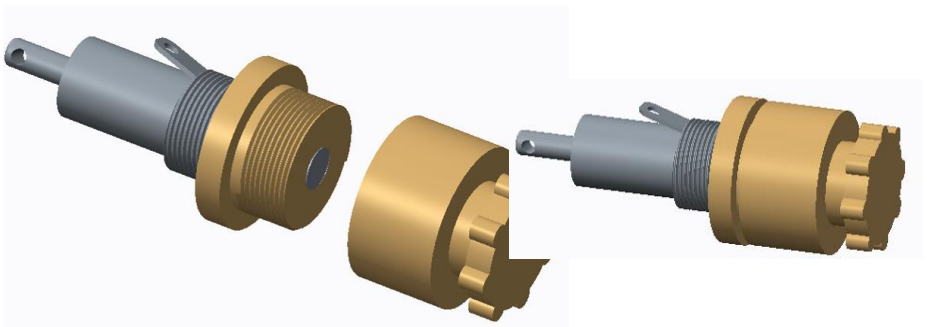




Рисунок 6.99 - Вигляд складня запобіжника


Останній компонент, якій необхідно додати до складня – це гайка, яку можна знайти в бібліотеці стандартних деталей.

1. На вкладці **Model (Модель)** натисніть іконку  **Assemble (Зібрати)**. У вікні **Open (Відкрити)** двічі клікніть по файлу гайки – nut.prt.

2. На панелі виконання операції збирання задамо тип з'єднання **Rigid (Жорстке)** та прив'язки **Automatic (Автоматично)**, а також на панелі виконання операції додавання гайки до складню вимкнемо відображення елементів 3D перетягнувши натиснувши на іконку  та у якості посилань вкажіть центральні вісі як зображено на рисунку 6.100.

3. На вкладці **Placement (Розміщення)** виберіть **New Constraint (Нове обмеження)** та у списку **Constraint Type (Тип обмеження)** виберіть нову прив'язку **Distance (Відстань)** (рис. 6.101).

4. Вкажіть поверхні які зображені на рисунку 6.102. Та встановіть значення Offset (Зсув) рівним 2 мм (рис. 6.103).

Після того як завершите розміщення натисніть на кнопку  на стрічковій вкладці **Component Placement (Розміщення компонента)**.

Збережемо отриману модель складня запобіжника (рис. 6.104), використовуючи команду **File (Файл) → Save (Зберегти)**.

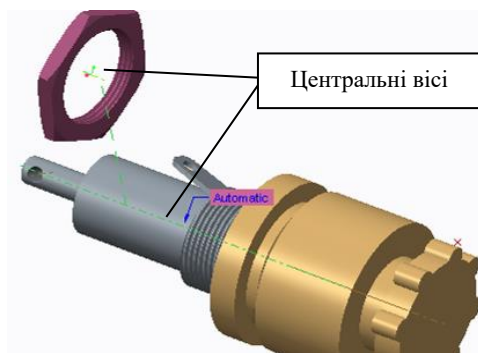


Рисунок 6.100 – Посилання на об'єкти для прив'язки Align (Вирівняти)

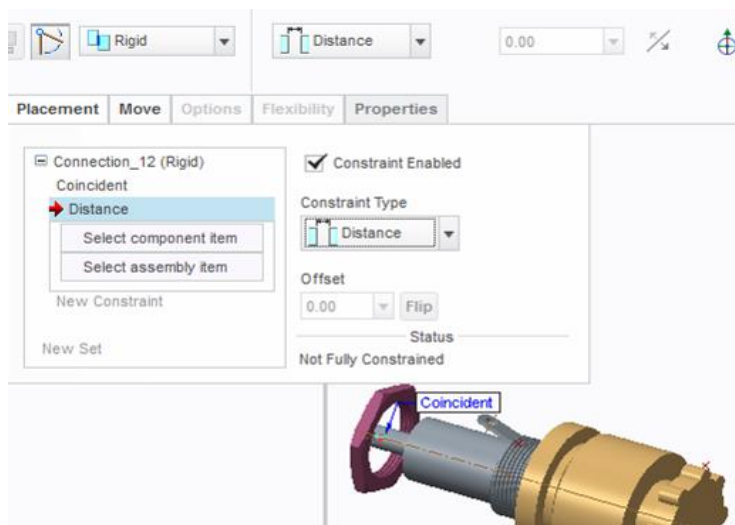


Рисунок 6.101 – Встановлення нового з'єднання

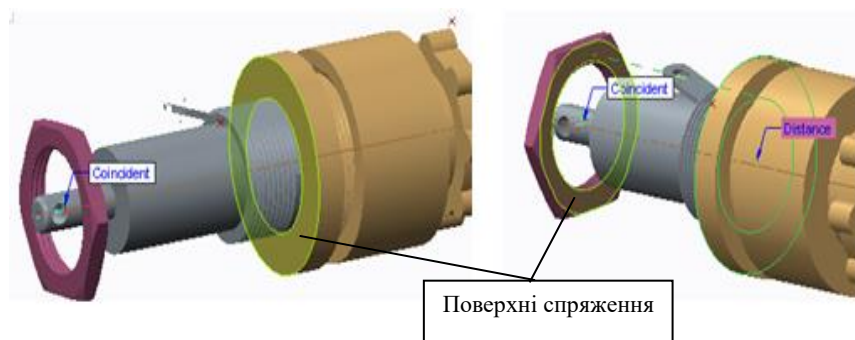


Рисунок 6.102 – Вибрані поверхні

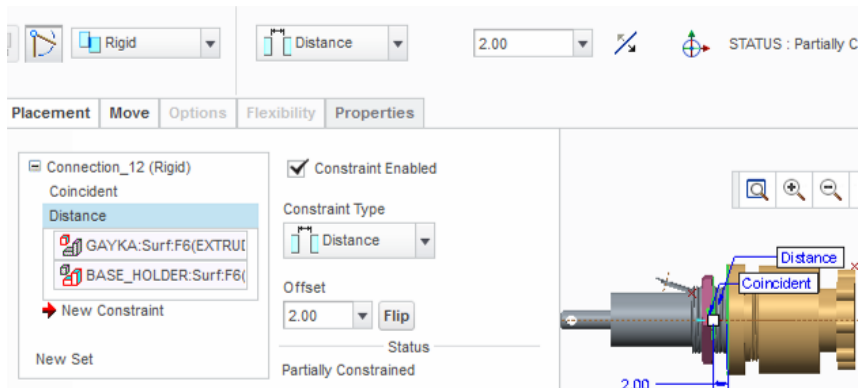


Рисунок 6.103 – Встановлення параметра Offset (Зсув)

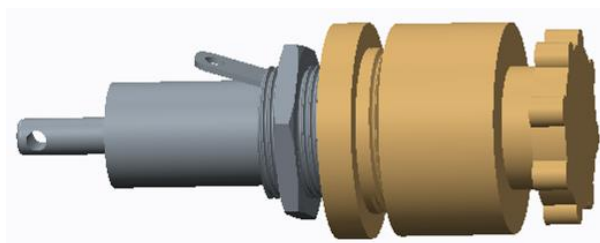



Рисунок 6.104 – Кінцевий вигляд складня

6.4.5 Моделювання роботи складня

Creo Mechanism забезпечує потужне середовище віртуального прототипування для аналізу і вдосконалення роботи механізмів в рамках процесу розробки. Creo Mechanism дозволяє інженерам створювати віртуальні механізми, не покидаючи звичного призначеного для користувача інтерфейсу і середовища Creo Parametric.

Відкрийте складень запобіжника, яке було створено у пункті 6.4.4. Натисніть на іконку  – **Open (Відкрити)** у панелі швидкого доступу і виберіть у вікні **Open (Відкрити)** складень запобіжника fuse.asm.

Для створення анімації динамічного складня необхідно перейти в середовище Mechanism (Механізм). Для цього виконайте

Applications (Застосунки) → Motion (Рух) → Mechanism (Механізм). Головне вікно дещо перетворилось, з'явилась нова вкладка Mechanism (Механізм) та Mechanism Tree (Дерево механізму). Крім того, можемо побачити, що на самому складні з'явилися дві стрілочки (рис.6.105). Це Motion Axis (Вісі руху) первинних з'єднань, які були створені. Одна пряма стрілка, яка має в основі куб – це вісь руху з'єднання Slider (Повзун), а вісь руху з'єднання Cylinder (Циліндр) виглядає як пряма стрілка і ще одна стрілка закручена довкола неї, при чому в основі прямої стрілки знаходиться циліндр.

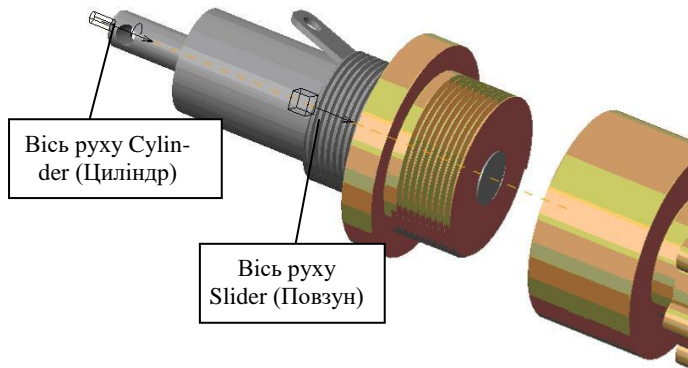


Рисунок 6.105 – Зображення Motion Axis (Вісі руху)

По-перше, виконаємо настройку параметрів Motion Axis (Вісі руху) Первинного з'єднання Cylinder (Циліндр). Бачимо на рисунку 6.105, що у цієї Вісі руху є 2 компоненти:

- вісь переміщення (пряма стрілка);
- вісь обертання (зігнута стрілка).

Ці компоненти можна налаштовувати незалежно один від одного. Щоб це зробити, встановіть над прямою стрілкою курсор, клікніть ПКМ і одразу ЛКМ, щоб виділити тільки пряму стрілку. Після вибору, затисніть ПКМ та утримуйте її доки не з'явиться спливаюче меню та виберіть **Edit Definition (Правити визначення)** (рис.6.106).

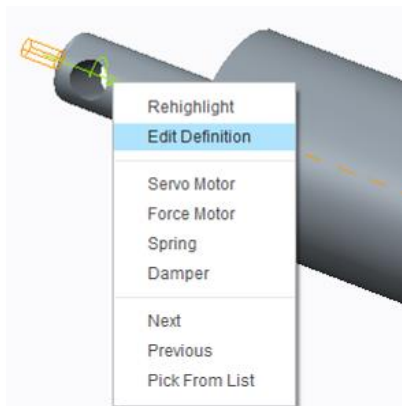


Рисунок 6.106 - Виділення вісі переміщення

З'явиться нове вікно **Motion Axis (Вісь руху)**. У верхній частині вікна вибираються прив'язки **Translation Axis (Вісі переміщення)**, в даному випадку це поверхні деталей, які зображені на рисунку 6.107.

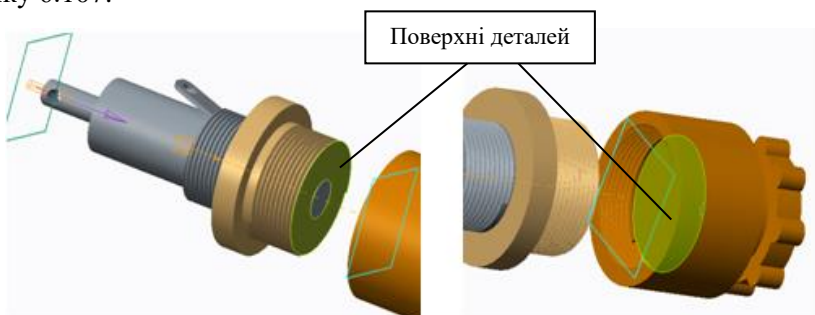



Рисунок 6.107 - Виділення поверхонь

Нижче у цьому вікні є поле, яке вказує поточне положення **Вісі руху (Current Position)**. Воно активується після вибору Translation Axis (Осей переміщення). Введіть в нього різні значення і можете побачити, як змінюється положення кришки відносно основної частини вставки плавкої. Встановіть значення цього вікна як зображено на рисунку 6.108. Після натисніть .

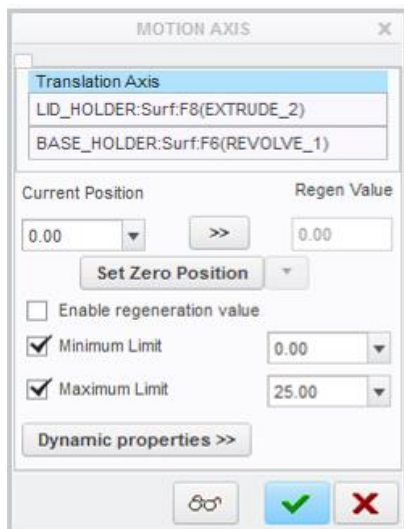


Рисунок 6.108 - Приклад заповнення вікна Motion Axis (Вісь руху) для вісі переміщення

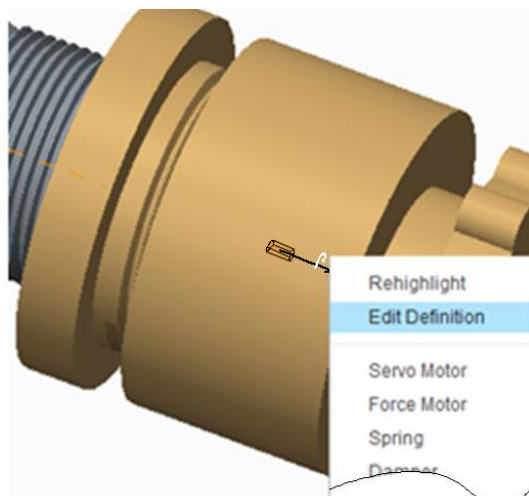


Рисунок 6.109 - Виділення вісі обертання

Далі необхідно виділити усю вісь руху (рис. 6.109) та викликати вікно редагування, щоб встановити параметри вісі обертання для первинного з'єднання **Cylinder (Циліндр)**. У якості прив'язок для Rotation Axis (Вісі обертання) виберіть TOP поверхні кришки та основи утримувача вставки плавкої. Усі інші параметри встановіть так як показано на рисунку 6.110.

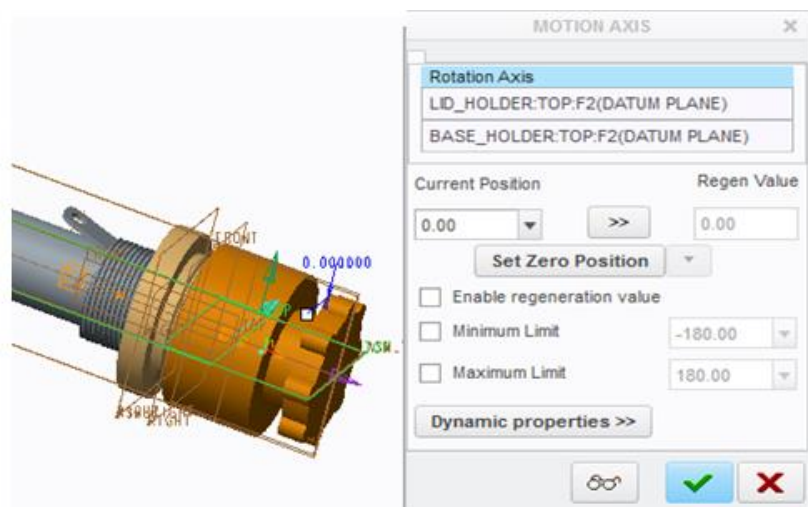



Рисунок 6.110 - Встановлення параметрів для вісі обертання

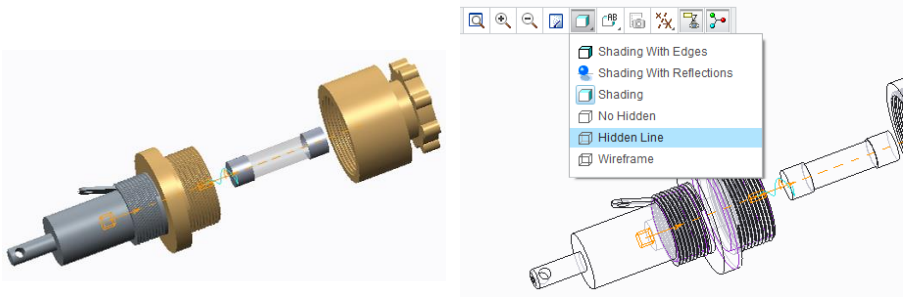
Налаштуємо вісь руху для первинного з'єднання **Slider (Повзун)**:

1. Викличте інструмент  із вкладки **Mechanism (Механізм)** → **Motion (Рух)** → **Drag component (Рухати компоненти)** та перетягніть кришку та вставку плавку так, як зображено на рисунку 6.111 (а).

2. Далі, для зручності, за допомогою графічної панелі, відобразимо складень у стилі **Hidden Line (Прихована лінія)** (рис. 6.111 б).

3. Наведіть курсор миші на Вісь руху та клікніть ЛКМ, щоб виділити її. Після чого, клікніть ПКМ та утримуйте, доки не з'явиться спливаюче меню та виберіть **Edit Definition (Правити визначення)** (рис.6.112). Відкриється вікно **Motion Axis (Вісь**

руху), встановіть параметри які вказані на рисунку 6.113. В якості прив'язок *Translation Axis (Вісь переміщення)* вкажіть поверхні, як на рисунку 6.114.



а

б

Рисунок 6.111 - Налаштування складня

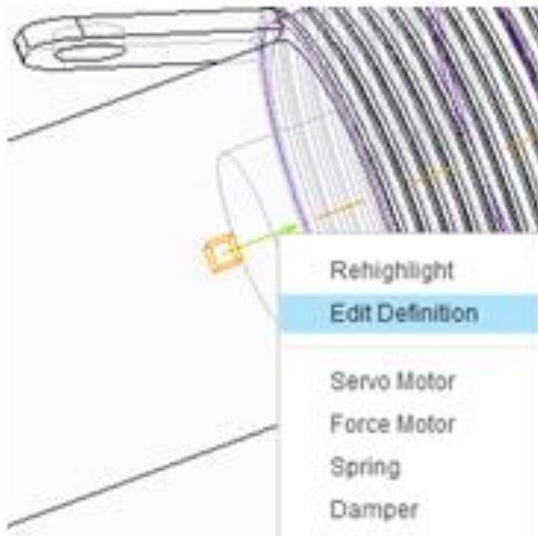


Рисунок 6.112 - Вибір вісі переміщення для з'єднання Slider (Повзун)

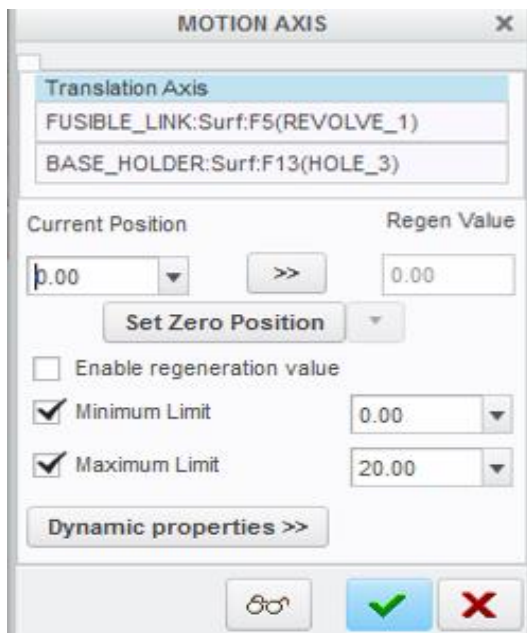


Рисунок 6.113 - Вікно Motion Axis (Вісь руху) вісі переміщення з'єднання Slider (Повзун)

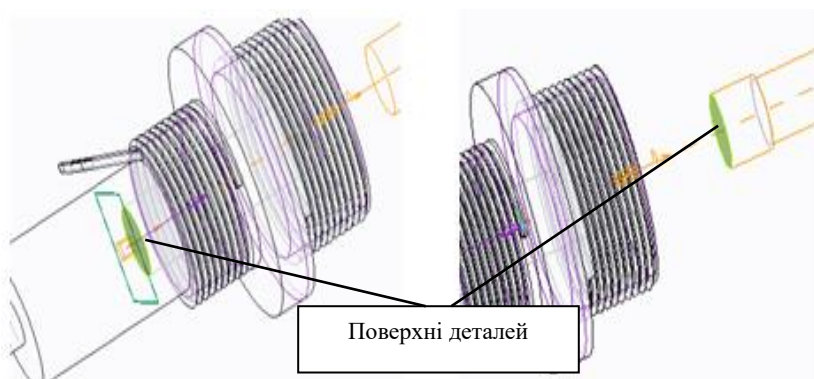


Рисунок 6.114 - Виділення поверхонь Translation Axis (Вісь переміщення)

Завершіть встановлення параметрів руху первинного з'єднання Slider (Повзун), натиснувши у вікні **Motion Axis (Вісь руху)**. Також на графічній панелі виберіть стиль складня **Shading (Зафарбування)** (рис. 6.115).

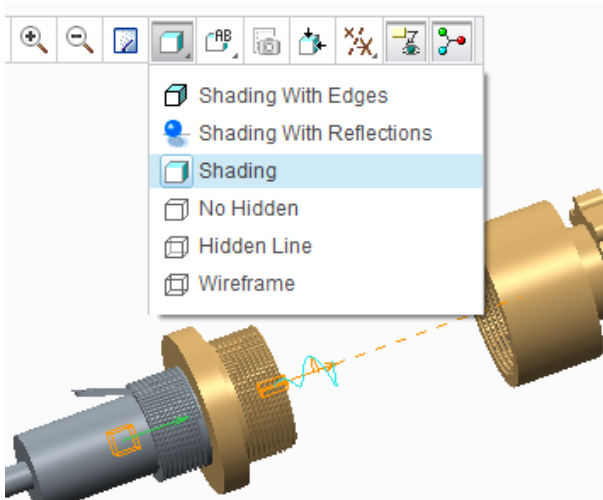



Рисунок 6.115 - Shading (Зафарбування) складня

Після попередніх налаштувань, тепер можна визначити Сервоприводи, які будуть керувати розкручуванням і скручуванням кришки та переміщенням вставки плавкої. У цьому розділі будемо створювати 6 сервоприводів (4 для кришки та 2 для вставки плавкої). Але треба знати, що Анімація за замовчуванням триває 10 секунд. Це важливо, бо параметри, які будуть використовуватись при визначенні Сервоприводу, будуть залежати від того, скільки часу буде проходити анімація руху.

Почнемо зі створення сервоприводів для вставки плавкої. Вона буде рухатись зі швидкістю переміщення 20 мм за 5 секунд, тобто 4 мм за 1 сек.

1. Створимо сервопривід для витягування вставки плавкої із основи утримувача: **Mechanism (Механізм)** → **Insert (Вставити)** → **Servo Motors (Сервоприводи)** . Відкриється вікно **Servo**

Motor Definition (Визначення сервоприводу), в якому введіть назву Сервоприводу у полі *Name (Ім'я)* та на вкладці *Type (Тип)* у якості Motion Axis виділіть Вісь переміщення (пряму стрілочку) первинного з'єднання Slider (Повзун) (рис. 6.116 а). Перейдіть на вкладку *Profile (Профіль)* і встановіть параметри, як зображено на рисунку 6.116 (б).

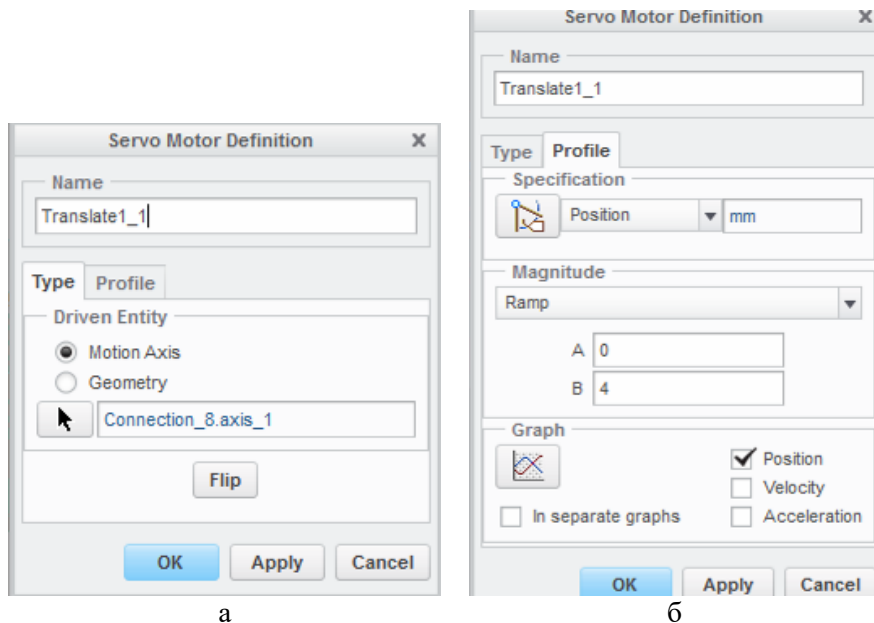




Рисунок 6.116 - Параметри вісі переміщення з'єднання Slider (Повзун)

Можемо переглянути графік положення, швидкості та прискорення руху вставки плавкої (рис. 6.117), для цього у секції **Graph (Графік)**, вікна **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)**, поставте галочки біля всіх пунктів та натисніть на іконку . В графіку, що з'явився, бачимо, що швидкість та прискорення руху вставки плавкої постійні і тому прямолінійні. А переміщення становить 40 мм за 10 секунд, або 20 мм за 5 сек. Після вводу параметрів у вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)**, натисніть **ОК**.

2. Створимо сервопривід для повернення вставки плавкої назад, усередину основи утримувача: **Mechanism (Механізм)** → **Insert (Вставити)** → **Servo Motors (Сервоприводи)** . У вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)** у полі **Name (Ім'я)** введіть назву Сервоприводу та на вкладці **Type (Тип)** у якості Motion Axis виділіть вісь руху первинного з'єднання Slider (Повзун) (рис. 6.118 а). Перейдіть на вкладку **Profile (Профіль)** і встановіть параметри як зображено на рисунку 6.118 б. Після вводу параметрів у вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)** натисніть **OK**.

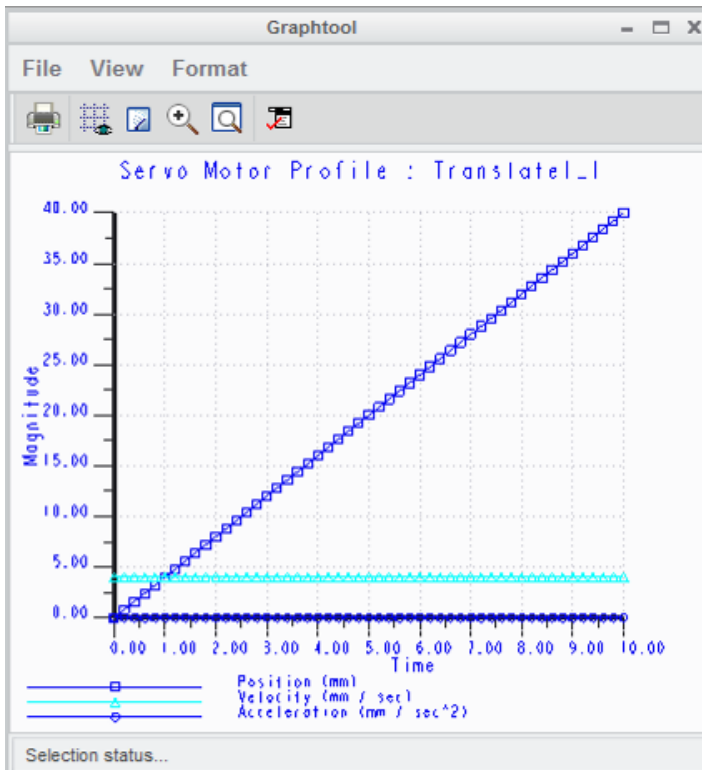
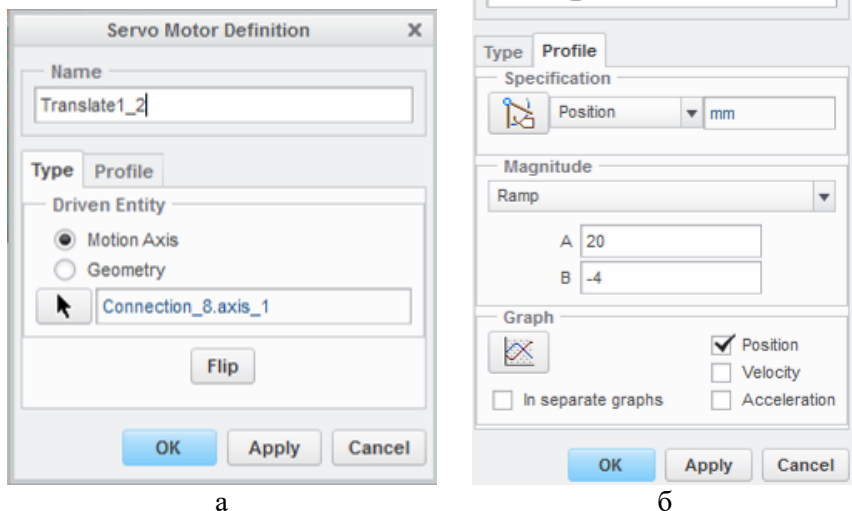


Рисунок 6.117 - Графік руху вставки плавкої



а

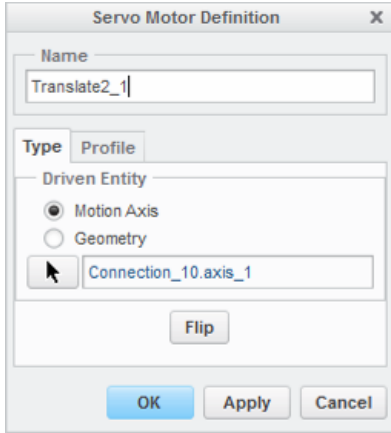
б

Рисунок 6.118 - Параметри вікна Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу) для вісі переміщення з'єднання Slider (Повзун)

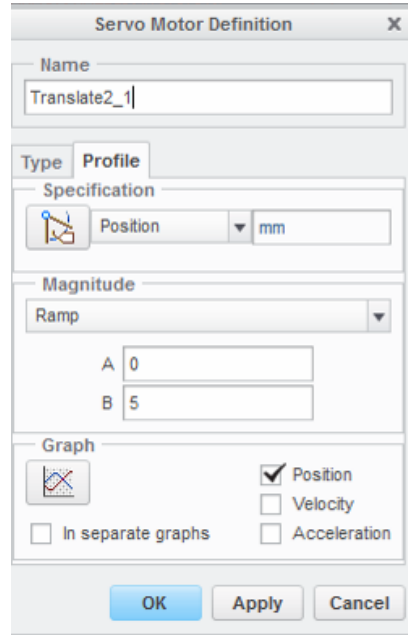
Створимо чотири Сервоприводи для кришки утримувача вставки плавкої:

1. Перший сервопривід буде відповідати за переміщення кришки у сторону розкручування. Кришка буде рухатись зі швидкістю переміщення 25 мм за 5 секунд, тобто 5 мм за 1 сек.

Створимо сервопривід: **Mechanism (Механізм)** → **Insert (Вставити)** → **Servo Motors (Сервоприводи)** . У вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)** у полі **Name (Ім'я)** введіть назву Сервоприводу та на вкладці **Type (Тип)** у якості **Motion Axis** виділити вісь переміщення (пряма стрілка) первинного з'єднання **Cylinder (Циліндр)** (рис. 6.119 а). Щоб виділити тільки пряму стрілку треба встановити над прямою стрілкою курсор, клікніть ПКМ і одразу ЛКМ. Перейдіть на вкладку **Profile (Профіль)** і встановіть параметри як зображено на рисунку 6.119 б. Після вводу параметрів у вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)** натисніть **OK**.




а



б

Рисунок 6.119 - Параметри вікна Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу) для вісі переміщення з'єднання Cylinder (Циліндр)

2. Створимо сервопривід для повернення кришки утримувача плавкої назад, тобто у бік закручування: **Mechanism (Механізм) → Insert (Вставити) → Servo Motors (Сервоприводи)**  . У вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)** у полі **Name (Ім'я)** введіть назву Сервоприводу та на вкладці **Type (Тун)** у якості Motion Axis виділіть вісь переміщення (так само як в попередньому сервоприводі) первинного з'єднання Cylinder (Циліндр) (рис. 6.120 а). Перейдіть на вкладку **Profile (Профіль)** і встановіть параметри як зображено на рисунку 6.120 б. Після вводу параметрів у вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)** натисніть **OK**.

3. Створимо сервопривід, який буде відповідати за обертання кришки у сторону відкручування. Швидкість руху кришки 2 оберти на секунду або 720 градусів/сек.

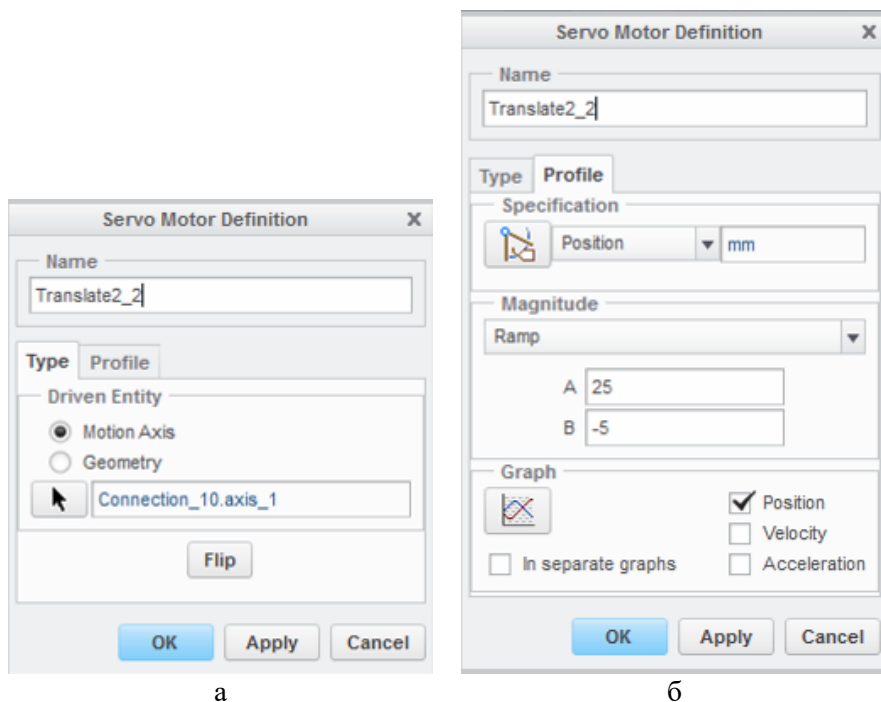


Рисунок 6.120 - Параметри вікна Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу) для вісі переміщення з'єднання Cylinder (Циліндр)

Створимо сервопривід: **Mechanism (Механізм)** → **Insert (Вставити)** → **Servo Motors (Сервоприводи)** . У вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)** у полі *Name (Ім'я)* введіть назву Сервоприводу та на вкладці *Type (Тип)* у якості Motion Axis виділіть усю вісь руху первинного з'єднання Cylinder (Циліндр) (рис. 6.121 а). Перейдіть на вкладку *Profile (Профіль)* і встановіть параметри як зображено на рисунку 6.121 б. Після вводу

параметрів у вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)** натисніть на кнопку **OK**.

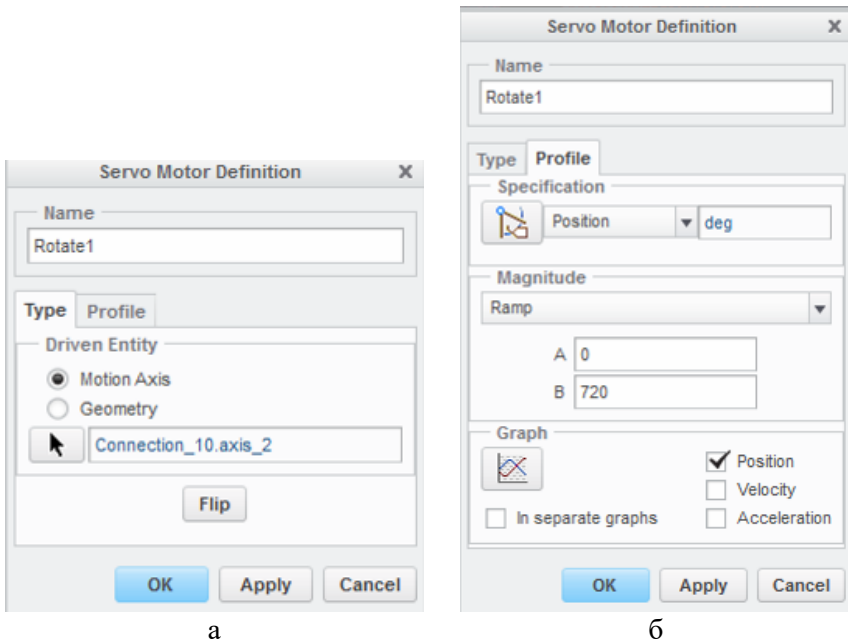



Рисунок 6.121 - Параметри вікна Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу) для вісі обертання з'єднання Cylinder (Циліндр)

4. Останній сервопривід буде відповідати за обертання кришки у бік закручування: **Mechanism (Механізм)** → **Insert (Вставити)** → **Servo Motors (Сервоприводи)** . У вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)** у полі *Name (Ім'я)* введіть назву Сервоприводу та на вкладці *Type (Тип)* у якості Motion Axis виділіть усю вісь руху первинного з'єднання Cylinder (Циліндр) (рис. 6.122 а). Перейдіть на вкладку *Profile (Профіль)* і встановіть параметри як зображено на рисунку 6.122 б. Після вводу параметрів у вікні **Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу)** натисніть **OK**.

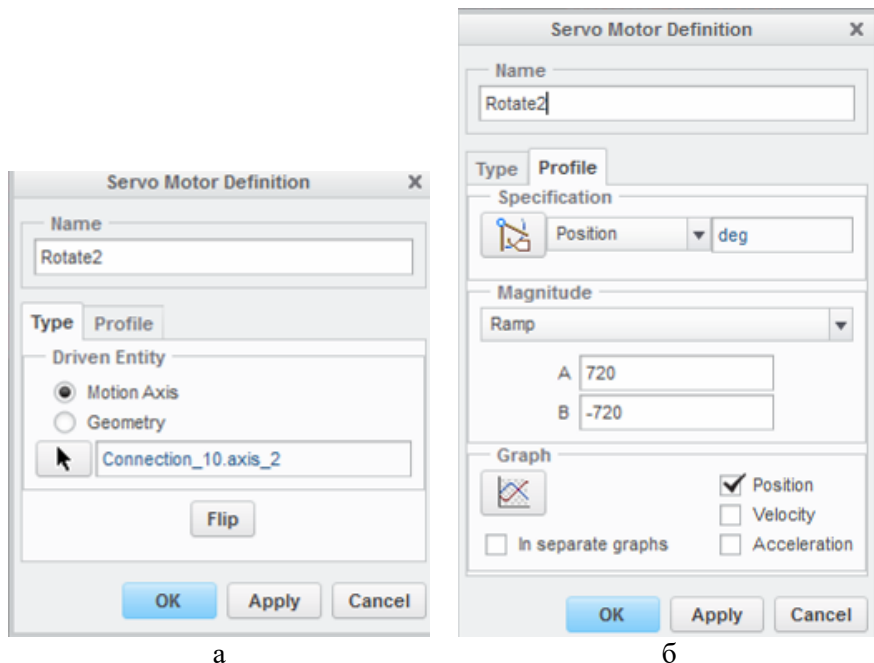



Рисунок 6.122 - Параметри вікна Servo Motor Definition (Визначення сервоприводу) для вісі обертання з'єднання Cylinder (Циліндр)

Тепер у нас Сервоприводи визначені і можемо перейти до створення Аналізу, щоб переглянути анімацію. Тому, натиснемо на іконку  **Mechanism Analysis (Аналіз Механізму)**, яка знаходиться на вкладці **Mechanism (Механізм)**, у групі інструментів **Analysis (Аналіз)**.

З'явиться вікно **Analysis Definition (Визначення аналізу)**, яке зображено на рисунку 6.123, у полі **Name (Ім'я)** введіть ім'я створюваного аналізу. Для простої анімації будемо використовувати *Kinematic (Кінематичний аналіз)*, який вибирається зі списку **Type (Тип)**.

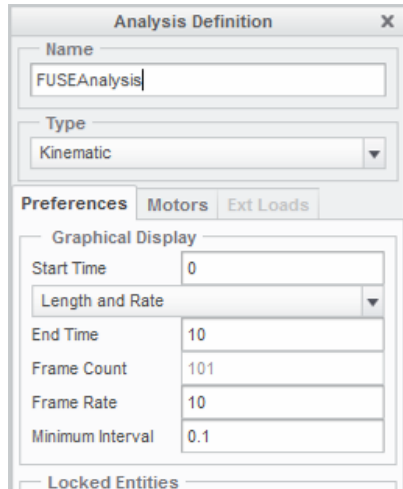


Рисунок 6.123 - Вікно Analysis Definition (Визначення аналізу)

Далі перейдіть на вкладку *Motors (Приводи)* вікна **Analysis Definition (Визначення аналізу)**. На цій вкладці присутні всі 6 приводів, які були створені, їх можна видалити або додати до Аналізу. Кожний привід має назву, початок та кінець виконання своєї роботи.

Встановіть параметри цієї вкладки як на рисунку 6.124. Як можемо бачити, сервопривід руху вставки плавкої вперед (Translate1_1) починається з самого початку анімації і закінчується на п'ятій секунді, саме для цього ми прораховували, що за 5 секунд вставка плавка повинна переміщуватись вперед на 20 мм і саме тому ми при встановленні параметрів вікна Motion Axis (Вісі руху) для вставки плавкої параметр Maximum Limit (Максимальна межа) встановили рівним 20. Звідси можемо зробити висновок, що прорахунок руху деталей в анімації починається ще з налаштування параметрів Motion Axis (Вісі руху). А з 5 секунди одразу починає роботу сервопривід, який відповідає за повернення вставки плавкої назад (Translate1_2) і який завершує свою роботу по завершенню анімації, тобто на десятій секунді.

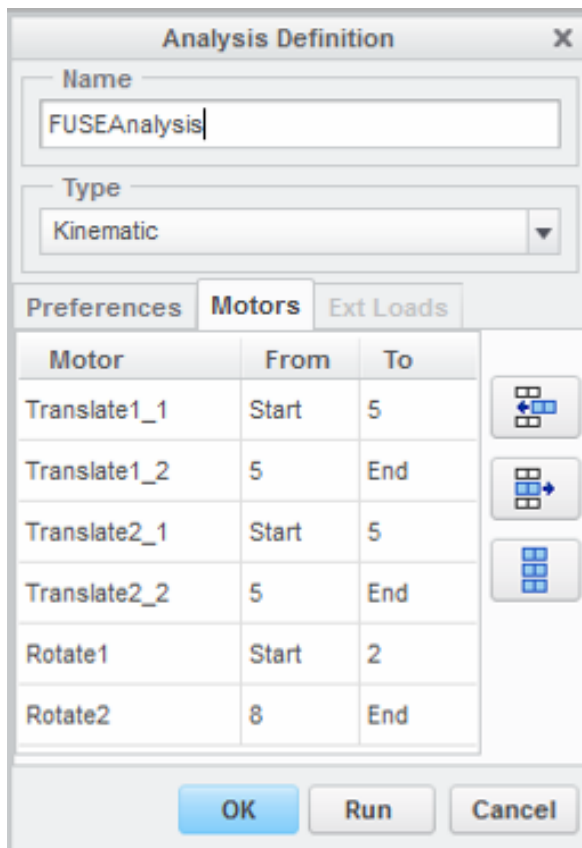



Рисунок 6.124 – Визначення Сервоприводів та часу їх роботи.

Після завершення встановлення параметрів натисніть кнопку **Run (Виконати)**, щоб аналіз почав виконуватись і ви можете побачити роботу анімації. Після, натисніть на кнопку **OK**.

Щоб відтворити або зберегти створений аналіз натисніть іконку  **Playback (Відтворення)**, яка знаходиться на вкладці **Mechanism (Механізм) → Analysis (Аналіз)**. З'явиться вікно **Playback (Відтворення)** (рис. 6.125), у списку **Result Set (Набір результатів)** виберіть аналіз, який необхідно відтворити або зберегти.

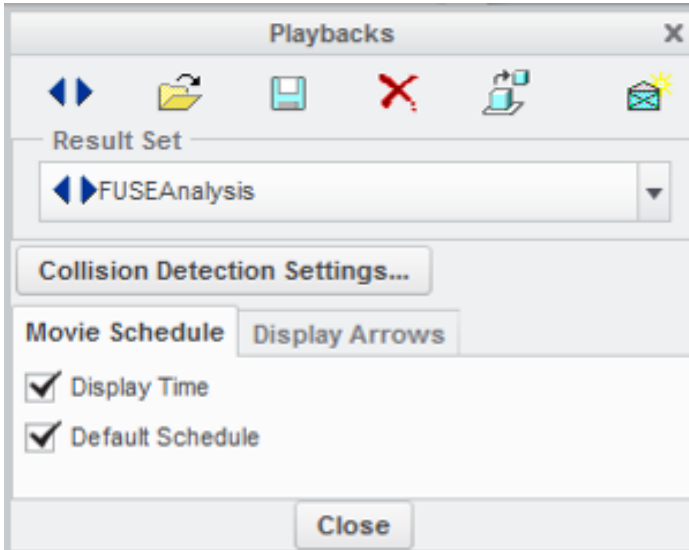





Рисунок 6.125 - Вікно Playback (Відтворення)

Для збереження аналізу натисніть іконку  у вікні **Playback (Відтворення)**. Для відтворення вибраного аналізу натисніть  у тому ж вікні, після чого з'явиться нове вікно **Animate (Анімація)**, у якому можна програвати створену анімацію, зупиняти, прискорювати або навпаки уповільнювати. А для того, щоб створити MPEG фільм необхідно натиснути кнопку **Capture... (Захват...)** і система сама створить і збереже фільм у поточному каталозі.

6.4.6 Структурний аналіз у середовищі Creo

Creo Simulate надає проєктувальникам можливість оцінювати структурні та теплові характеристики виробів на віртуальній моделі, замість того, щоб створювати дорогий фізичний прототип, що, до того ж, віднімає багато часу. Отримавши розуміння характеру поведінки виробу, можливо значно покращити якість продукції, зекономити час та матеріальні витрати. У цьому пункті буде пред-

ставлений простий статичний аналіз деталі на міцність за допомогою методу скінченних елементів у середовищі Creo Simulate.


Запустимо Creo Parametric 1.0 та відкриємо деталь монтажного кута (montagniy_ugolok.prt) за допомогою іконки  – **Open (Відкрити)** на панелі швидкого доступу.

Після того, як деталь завантажиться, можемо перейти до моделювання навантаження у середовищі Creo Simulate. Для цього виберіть **Applications (Застосунки)** → **Simulate**. З'являться нові стрічкові меню інструментів, які дозволяють працювати над створенням аналізу деталі, моделюючи різні фізичні впливи на об'єкт, і т.і.

Після того, як ви опинилися у середовищі Creo Simulate, можемо побачити, що на стрічці **Home (Початок)** → **Set up (Настройка)** вказані два режими: **Structure (Структурний)** (який встановлений за замовчуванням) і **Thermal (Термальний)**. Виберіть команду **Model Setup (Настройка моделі)**. Відкриється діалогове вікно **Model Setup (Настройка моделі)**, в якому клікніть на кнопку **Advanced (Позашерений)**. У цьому вікні відображені всі типи моделі які існують, по замовчуванням стоїть 3D-модель. Залишимо всі параметри за замовчуванням, як на рисунку 6.126 і натиснемо **OK**.

Також можемо бачити, що на самій деталі з'явилась зелена система координат, відмічена як WCS (рис. 6.127). Це весвітня система координат (World Coordinate System), створена Creo за замовчуванням. FEA (Finite Element Analysis) модель може мати декілька систем координат (декартову, циліндричну або сферичну). Активна система буде виділена зеленим кольором. Треба звернути увагу на напрямки X, Y і Z. - це важливо при визначенні напрямів навантажень та обмежень.

Будемо накладати обмеження на стінку монтажного кута, яка фіксується на внутрішній бічній поверхні корпусу приладу (рис. 6.128).

1. Виберіть **Home (Початок)** → **Constraints (Обмеження)** → **Displacement (Зсув)** . Відкриється діалогове вікно **Constraints (Обмеження)**, як зображено на рисунку 6.128.

2. У полі **Name (Найменування)** введіть [fixed]. У секції References (Прив'язки) з випадаючого меню виберіть **Surfaces**

(Поверхні) і вкажіть на поверхню монтажного кута, яка зображена на рисунку 6.129.

3. У нижній частині вікна **Constraints (Обмеження)** знаходиться 6 можливих обмежень: чотири **Translation (Переміщення)** і чотири **Rotation (Обертання)**. Активні іконки обмежень описані у таблиці 6.1. Залишаємо все за замовчуванням, тобто **Fixed (Фіксований)**. Натиснемо кнопку **OK**.

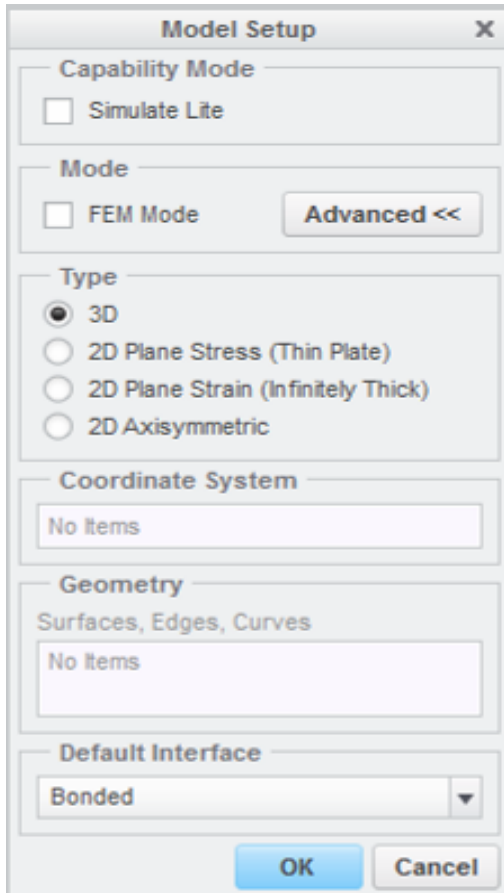


Рисунок 6.126 – Вікно Model Setup (Настройка моделі)

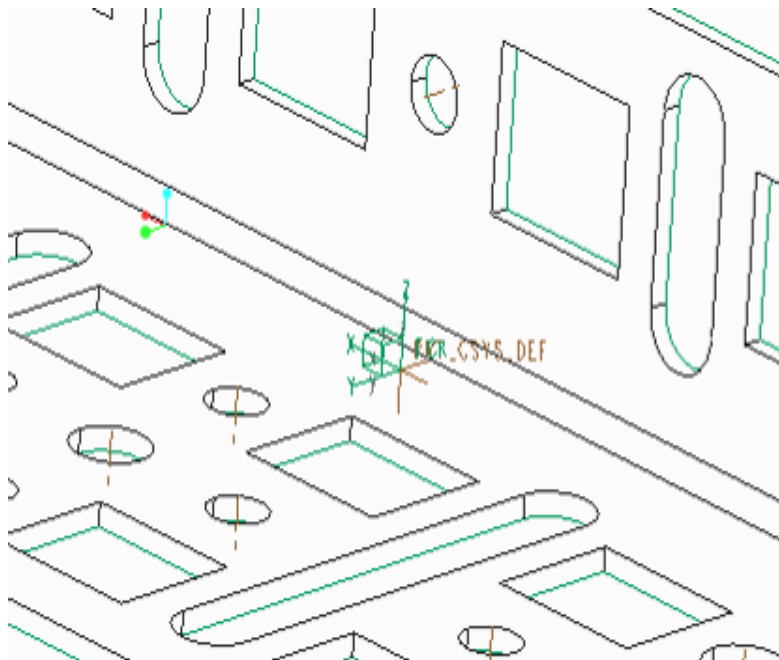


Рисунок 6.127 – Відображення системи координат WCS

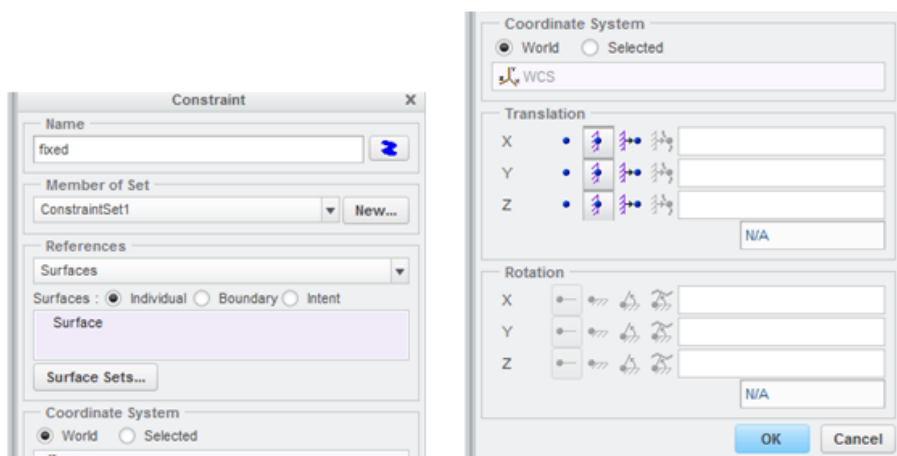


Рисунок 6.128 – Діалогове вікно Constraints (Обмеження)

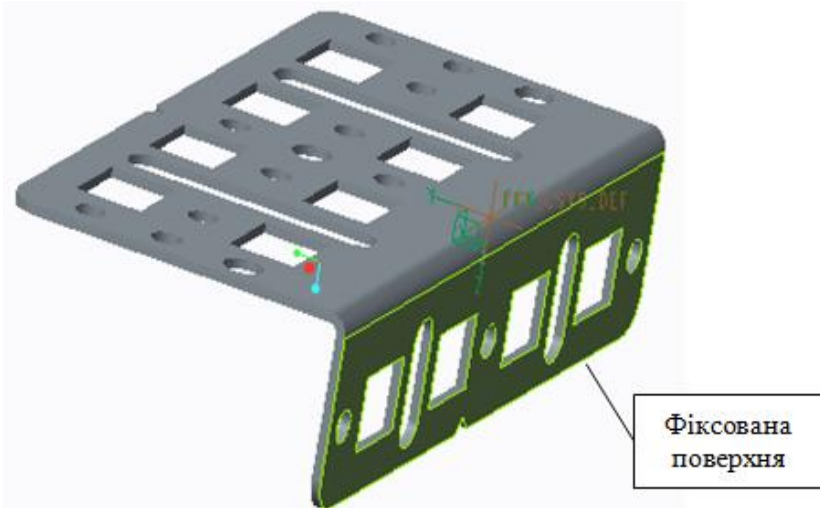


Рисунок 6.129 – Поверхня накладання обмеження

Силу тиску будемо прикладати до поверхні, на яку кріпиться внутрішній складень і яка зображена на рисунку 6.130.

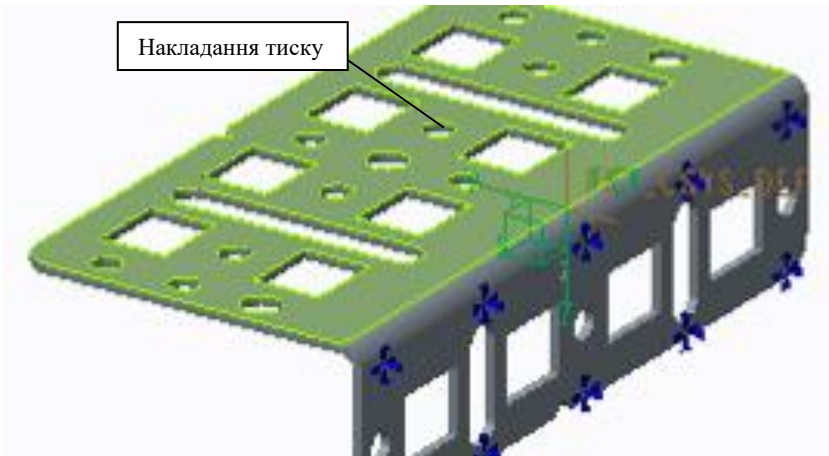


Рисунок 6.130 – Поверхня кріплення внутрішнього складня

Таблиця 6.1 – Типи обмежень

Тип	Опис
Free (Вільний)	Дозволяє обмеженому елементу вільно рухатись або обертатись у відповідному напрямі.
Fixed (Фіксований)	Фіксує обмежений елемент так, що він не може рухатись і обертатись у відповідному напрямі.
Prescribed (Задано)	Обмежений елемент вільно рухається і обертається у відповідному напрямі при точно встановленому переміщенні.
Function of coordinate (Функція координат)	Обмежений елемент вільно рухається і обертається у відповідному напрямі заданої функції.

Перед тим, як починати роботу з моделлю, треба провести деякі математичні розрахунки. Треба визначити тиск внутрішнього складня (p) на монтажний кут, яке розраховується за формулою:

$$p = \frac{F}{S} = \left[\frac{H}{m^2} \right] = [Pa];$$

де $F = P = g \cdot m$, (H) – сила, яка діє на поверхню монтажного кута;


$S = 0.110 \cdot 0.019 = 0.00209$ (m^2) – площа поверхні тиску, яка контактує з монтажним кутом;

$m = 0.886$ (kg) – маса всього складня, який кріпиться до монтажного кута;

$g = 9.81$ (m/s^2) – одиниця прискорення.

Звідси можемо розрахувати силу тиску плати на монтажний кут, але треба взяти до уваги, що маса складня ділиться між двома монтажними кутами, тому ми будемо брати половину від всієї маси:

$$p = \frac{9,81 \cdot 0,443}{0,00209} = 2079 [Pa];$$

На вкладці **Home (Початок)** → **(Loads) Навантаження** виберіть інструмент  **Pressure (Тиск)**. Це викличе діалогове вікно показане на рисунку 6.131.

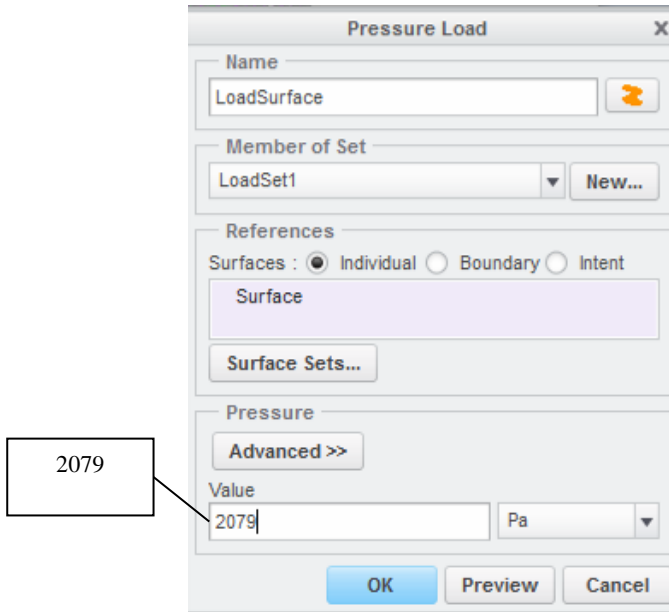


Рисунок 6.131 – Вікно Pressure (Тиск)

1. У полі *Name (Найменування)* введіть [LoadSurface]. У секції *References (Прив'язки)* вкажіть на поверхню монтажного кута, яка зображена на рисунку 6.130.

2. У секції *Pressure (Тиск)* встановіть значення сили тиску, яке було розраховане вище (рис 6.131).

3. Натисніть кнопку **Preview (Попередній перегляд)** та переконайтесь, що тиск до моделі прикладений так само, як показано на рисунку 6.132.

4. Натисніть **OK** для завершення встановлення навантаження тиском.

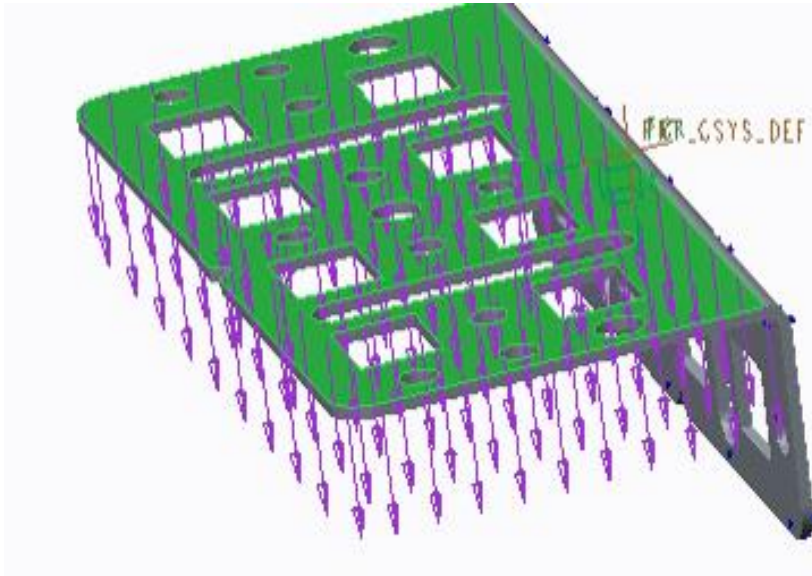






Рисунок 6.132 – Прикладене навантаження тиском

Тепер задамо матеріал, з якого виготовлений монтажний кут (конструкційна сталь). Цей процес проходить у два етапи: визначення матеріалу моделі та призначення його деталі. Виберіть інструмент  **Materials (Матеріали)** із групи інструментів **Materials (Матеріали)**. Відкриється діалогове вікно **Materials (Матеріали)**. В списку ліворуч клікніть на steel.mtl. Потім натисніть кнопку  (це завантажить матеріал до моделі, але не привласнить його деталі). Натисніть **ОК**.

Виберіть інструмент  **Material Assignment (Призначення Матеріалу)** із групи інструментів **Materials (Матеріали)**. У вікні **Material Assignment (Призначення Матеріалу)** встановіть параметри, як на рисунку 6.133 та натисніть **ОК**.

На моделі з'явилося нове позначення матеріалу ().

Виберіть **Home (Початок)** → **Run (Виконати)** →  **Analyses and Studies (Аналізи та дослідження)**. Відкриється вікно **Analyses and Design Studies (Аналізи і дослідження)** (рис.6.134).

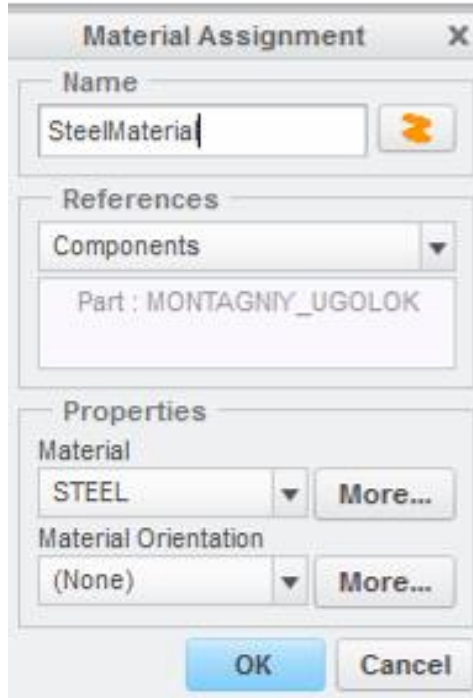


Рисунок 6.133 – Вікно Material Assignment
(Призначення Матеріалу)

У вікні **Analyses and Design Studies (Аналізи і дослідження)** виберіть **File (Файл) → New Static (Новий статичний...)**. Відкриється вікно **Static Analysis Definition (Визначення статичного аналізу)**, в якому встановіть параметри як вказано на рисунку 6.135. Натисніть **OK**.

Щоб перевірити модель на наявність помилок та достовірність імітаційної моделі, у вікні **Analyses and Design Studies (Аналізи і дослідження)** виберіть **Info (Дані) → Check Model (Перевірити модель)**. У вікні **Information (Інформація)** натисніть кнопку **OK**, щоб завершити дослідження моделі на помилки.

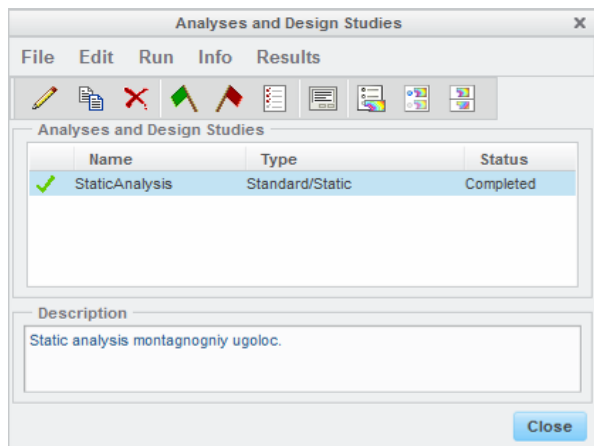





Рисунок 6.134 – Головне діалогове вікно для визначення і виконання аналізу та дослідження конструкції

У тому ж вікні **Analyses and Design Studies (Аналізи і дослідження)** виберіть **Run (Виконати) → Settings (Настройка)**. У верхній частині вікна **Run Settings (Настройка виконання)** укажіть шлях, де будуть зберігатися вихідні файли результатів аналізу, всі інші елементи встановіть, як на рисунку 6.136.

Після, натисніть **OK** і поверніться до вікна **Analyses and Design Studies (Аналізи і дослідження)**, у якому виберіть **Run (Виконати) → Start (Початок)**, або натисніть на іконку . Почекайте, коли виконається аналіз, це може зайняти декілька хвилин, в залежності від потужності комп'ютера. Після завершення аналізу, з'явиться вікно **Diagnostics (Діагностика)**, яке може допомогти знайти деякі помилки у моделі, у цьому вікні натисніть на кнопку **Close (Закрити)**. Щоб повністю переглянути стан виконання аналізу натисніть у групі інструментів на іконку  (рис. 6.137)

Для того, щоб переглянути результати дослідження конструкції або скінченно-елементного аналізу, клікніть на іконку  або виберіть в групі інструментів **Results (Результати) → Review Results (Визначити вікно результатів)**.

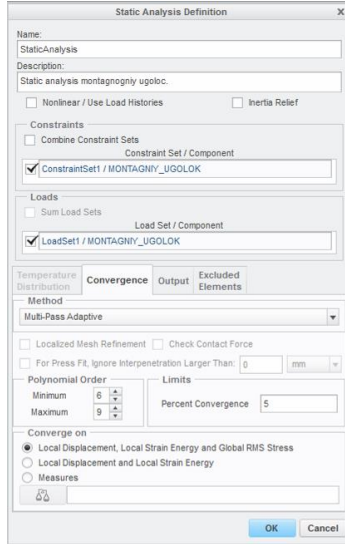


Рисунок 6.135 – Діалогове вікно Analyses and Design Studies (Аналізи і дослідження)

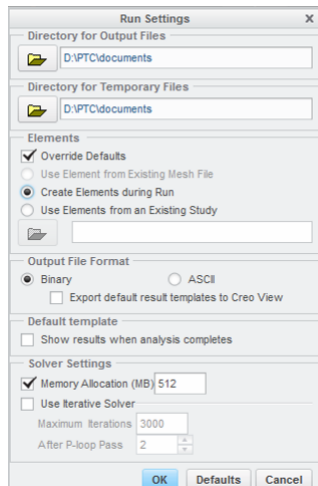


Рисунок 6.136– Встановлення параметрів вікна Run Settings (Настройка виконання)

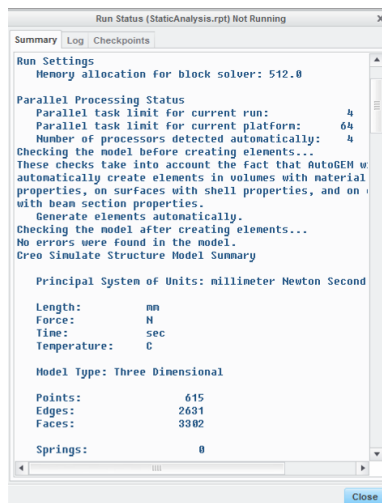


Рисунок 6.137 – Вікно відображення статусів виконання аналізу моделі

Відкриється нове вікно перегляду результатів **Creo Simulate Results (Результати Creo Simulate)** зі своїм рядком меню та панеллю інструментів (рис. 6.138) та перед ним ще одне вікно **Result window definition (Визначення вікна результатів)**, в якому на вкладці встановить параметри як зображено (рис. 6.139). Першим будемо проводити аналіз напруження, тому на вкладці **Quantity (Кількість)** з випадаючого меню виберіть **Stress (Напруження)**.

Після встановлення параметрів, натисніть кнопку **OK and Show (OK і Показ)**. У вікні **Creo Simulate Results (Результати Creo Simulate)** з'явиться монтажний кут розфарбований у різні кольорові відтінки (рис. 6.140). Спектр кольору легенди знаходиться в межі від темно синього до темно червоного. Чим ближче колір деталі до червоного тим сильніше напруження у цьому місці деталі і тим слабше це місце, що може призвести до ризику деформації або навіть поламки деталі.



Рисунок 6.138 – Панель інструментів вікна результатів

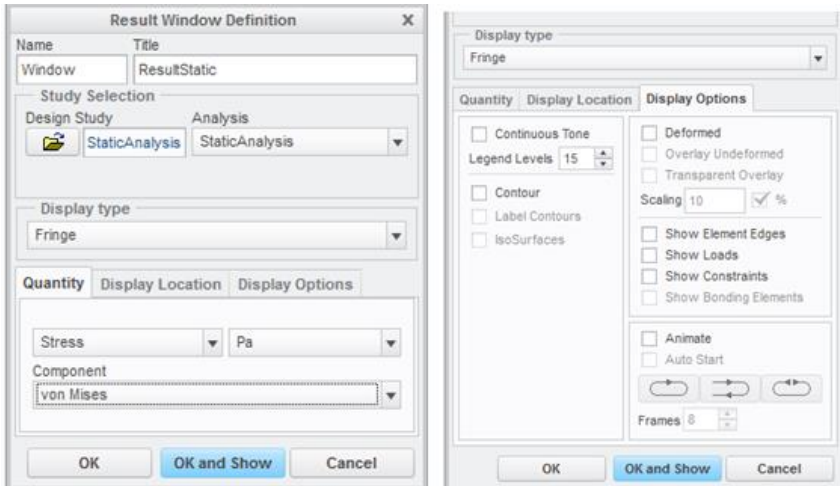


Рисунок 6.139 – Параметри визначення вікна результатів

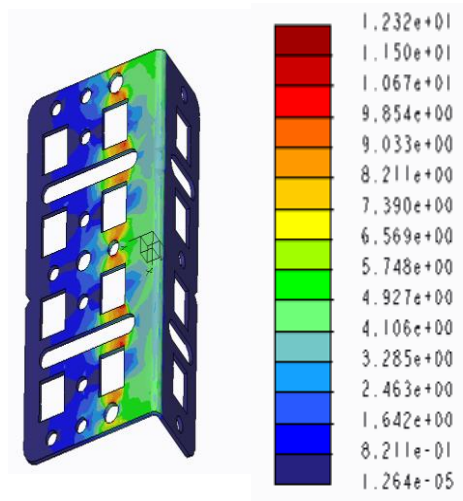


Рисунок 6.140 – Відображення монтажного кута у вікні (Результати Creo Simulate)

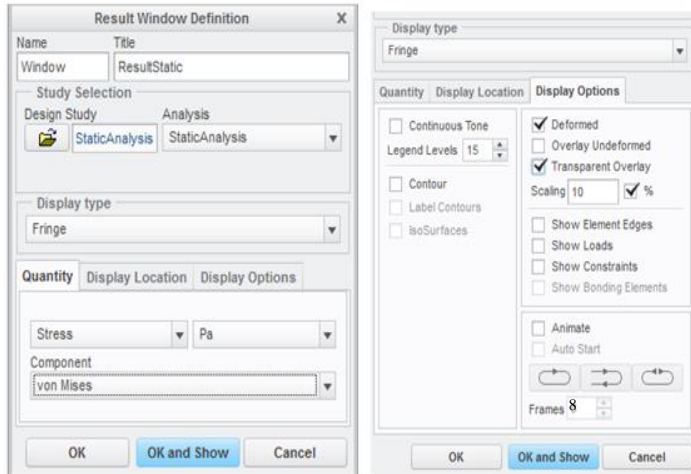


Рисунок 6.141 – Параметри вікна Result window definition
(Визначення вікна результатів)

Можна переглянути ступінь деформації монтажного кута від початкового стану під силою тиску, яку ми задали. Для того, щоб змінити відображення моделі у рядку меню натисніть **Edit (Правити)** → **Result Window...** (**Вікно результатів...**). І у вікні **Result window definition (Визначення вікна результатів)** встановить параметри які вказані на рисунку 6.141. Далі натисніть **OK and Show (OK і Показ)**. Результати зображені на рисунку 6.142.

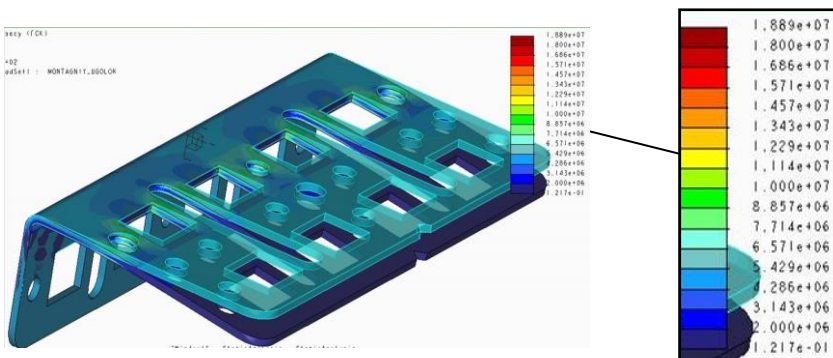


Рисунок 6.142 – Відображення деформації монтажного кута

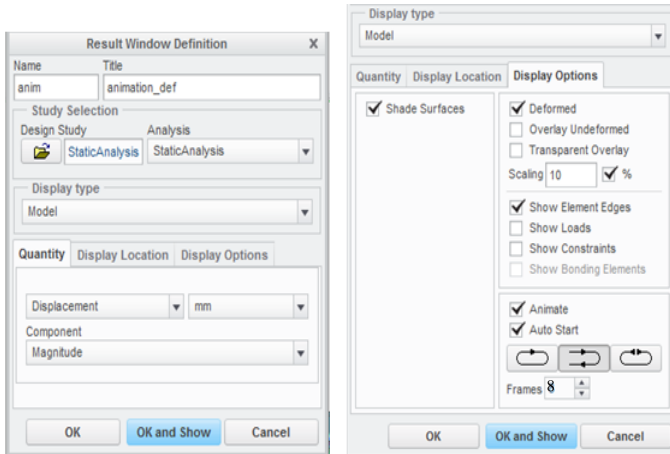



Рисунок 6.143 – Визначення параметрів вікна Result window definition (Визначення вікна результатів) для показу анімації деформації

Оскільки у наступному вікні нам необхідно показати анімацію деформації, тобто використовувати такий же самий каталог результатів, необхідно натиснути кнопку  **Copy (Копіювати)** на панелі інструментів, при показі результатів це розділить вікно результатів на дві частини. У вікні **Result window definition (Визначення вікна результатів)** введемо ім'я [anim] та заголовок [animation_def], всі інші параметри, як на рисунку 6.143. Далі натисніть **OK and Show (OK і Показ)** (рис. 6.144).

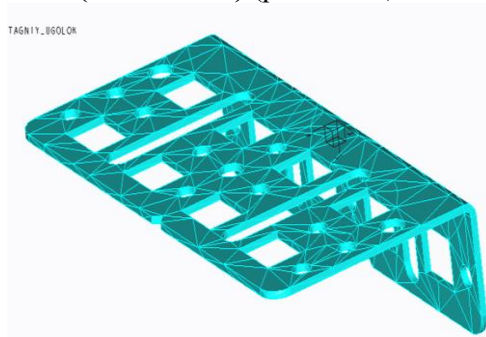


Рисунок 6.144 – Видяг монтажного кута у вікні показу анімації

Для керування анімацією на панелі інструментів є спеціальні команди, зображені на рисунку 6.145.

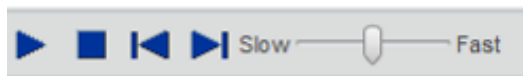


Рисунок 6.145 – Панель керування анімацією

Після завершення перегляду результатів закрийте вікно **Creo Simulate Results (Результати Creo Simulate)**.

6.4.7 Дослідження FEA-сітки та AutoGEM

FEA сітка (рис. 6.146) створюється за допомогою автоматичного генератора сітки – AutoGEM.

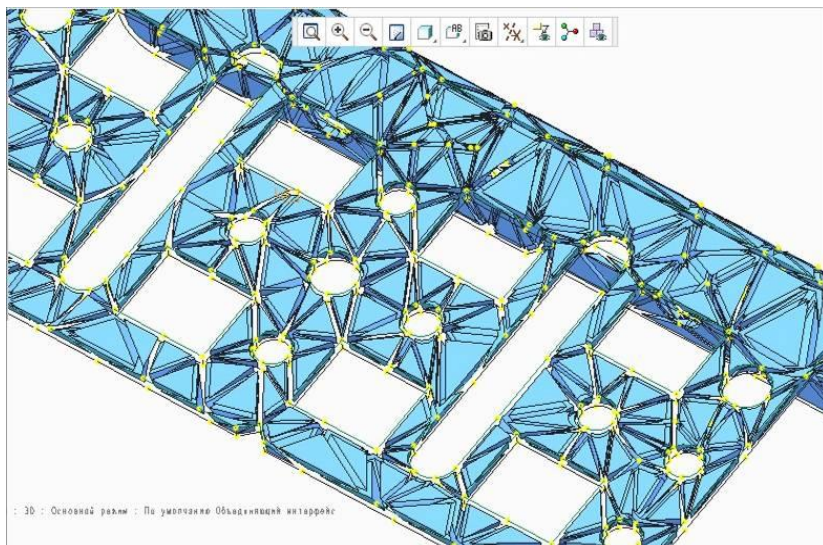



Рисунок 6.146 – FEA-сітка, створена за допомогою AutoGEM

На графічній панелі інструментів виберіть  **Simulation Display (Показ розрахункової моделі)**. Відкриється вікно **Simulation Display (Показ розрахункової моделі)**. На вкладці **Loads/Constraints (Навантаження/Обмеження)** встановіть параметри, як зображено на рисунку 6.147.

Перейдіть на вкладку **Mesh (Сітка)** виберіть **Mesh Point (Точки сітки)**, **Solid (Тверді тіла)**, значення **Shrink Element (Стиснути елемент)** встановіть рівним 30%. На вкладці **Modeling Entities (Модельовані об'єкти)** встановіть **Material Assignments (Призначення матеріалу)** і натисніть на кнопку **ОК**.

Тепер можемо створити сітку. Перейдіть **Refine Model (Покращити модель)** → **AutoGEM**. У вікні **AutoGEM** натисніть кнопку **Create (Створити)** (рис. 6.148).

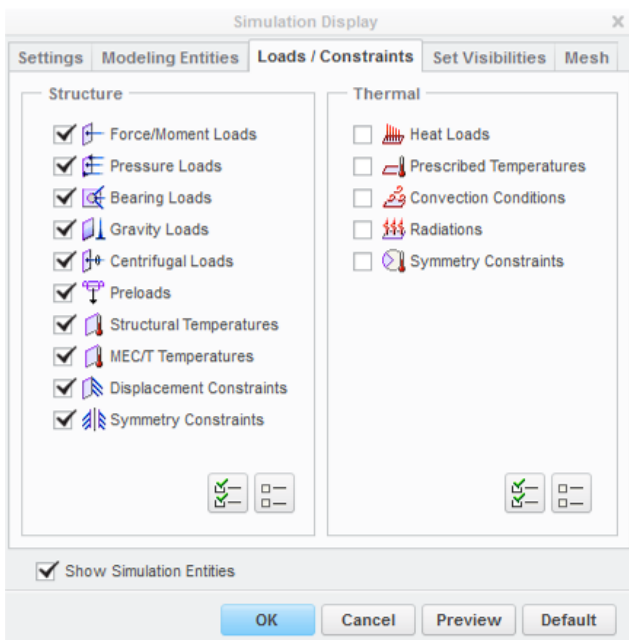


Рисунок 6.147 – Вікно Simulation Display (Показ розрахункової моделі)

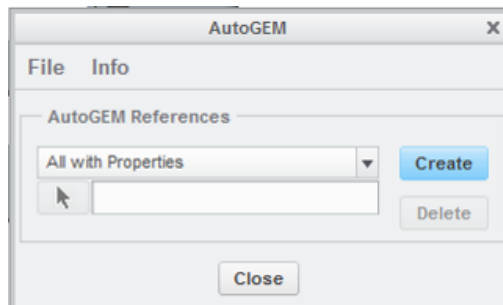


Рисунок 6.148 – Вікно AutoGEM

Після створення сітки відкриється два вікна **AutoGEM Summary** (Зведення AutoGEM) та **Diagnostics** (Діагностика). У них можна передивитись головну інформацію по проектуванню FEA сітки. Після перегляду можете їх закрити. У вікні **AutoGEM** можете зберегти створену сітку, натиснувши **File (Файл) → Save mesh (Зберегти сітку)**.

6.4.8 Проектування та аналіз друкованої плати в середовищах Altium Designer та Creo

Робота в Altium розпочинається зі створення схеми електричної принципової за допомогою спеціального редактора схем. Приклад створених схем електричних принципових для кожного окремого шару проектованої плати наведено на рис.6.149.

Altium підтримує 4 типи бібліотек. При створенні принципової схеми використовуються дві з них, які інтегровані між собою - бібліотека символів і бібліотека посадочних місць. Тому, ще до створення схеми слід визначити, чи всі бібліотечні елементи в наявності. Якщо ні, то Altium надає набір інструментів для самостійного створення елементів.

Важливим кроком у досягненні потрібного результату при створенні проекту ЕЗ є процес відлагодження роботи схеми пристрою ще до його виготовлення, тому до складу Altium Designer включена програма моделювання, яка дозволяє розробнику відразу по закінченню створення принципової схеми розпочати її дослідження, змінювати параметри та проводити аналіз. Altium Designer підтримує велику кількість типів аналізу, в тому числі:

- частотний аналіз в режимі малого сигналу;
- аналіз перехідних процесів;
- розрахунок спектральної щільності внутрішнього шуму;
- аналіз передаточних функцій по постійному струму;
- статистичний аналіз вихідних електричних параметрів схеми методом Монте-Карло;
- аналіз впливу змін значень параметрів елементів схеми і температури на роботу схеми;
- спектральний аналіз Фур'є;
- можливості математичної обробки розрахованих сигналів: їх додавання, віднімання, застосування до них різних математичних функцій.

Далі, на підставі відлагодженої схеми можна спроектувати плату і навіть переглянути її тривимірне зображення.

Головне призначення будь-якого Редактора друкованих плат - це розміщення компонентів і трасування провідників на сигнальних шарах плати, що з'єднують виводи компонентів згідно зі списком з'єднань. Система Altium Designer пропонує користувачеві достатній набір інструментів для автоматизації цих та інших дій.

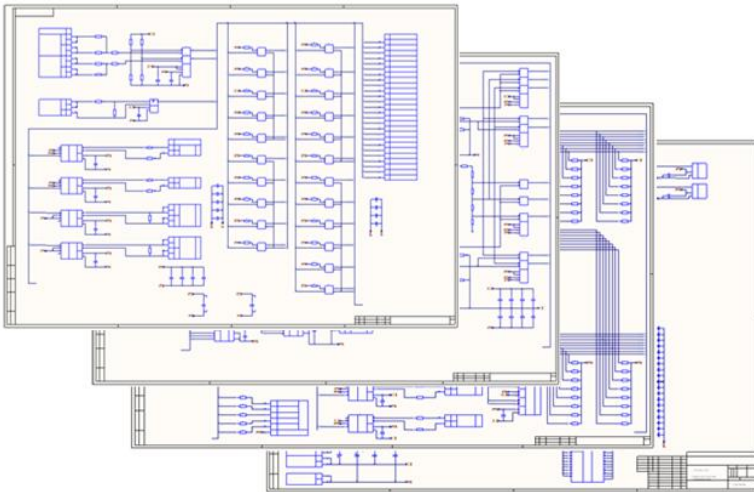


Рисунок 6.149 – Розроблені схеми електричні принципи для ДП

Розроблена електрична принципова схема була перенесена на плату і виконано розміщення компонентів, після чого було здійснено автоматичне трасування (рис. 6.150) і задані параметри шарів (рис. 6.151).

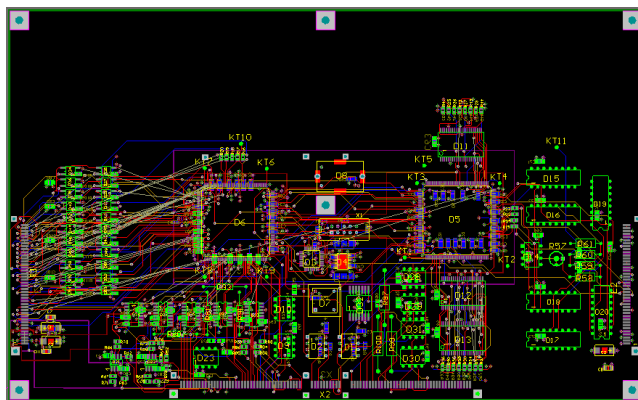


Рисунок 6.150 – 2D-модель розробленої плати

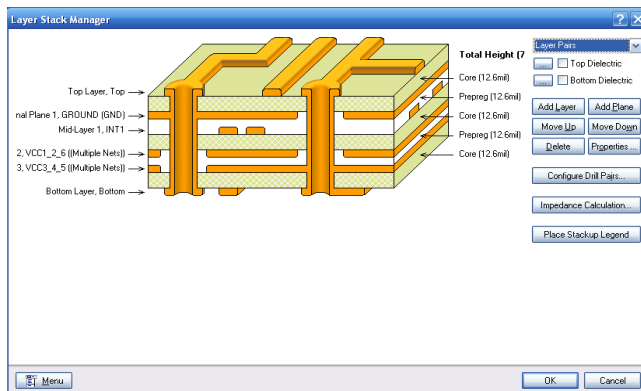


Рисунок 6.151 – Параметри шарів для розробленої плати

У Altium Designer існує можливість перегляду усередині системи тривимірного виду проектованої плати. При цьому розробник може:

- вивести на монітор реальний вигляд плати з компонентами

- оцінити спраження плати з механічними деталями конструкції і тут же внести необхідні зміни;

- відключати відображення компонентів або ділянок металізації і тим самим спостерігати вид плати на проміжних етапах виготовлення;

- виключення текстур заливки об'єктів дозволяє переглядати багатoshарову структуру плати на просвіт, як на рентгенівському знімку;

- контролювати перевищення компонентами максимально допустимої висоти з наочним відображенням виявлених порушень.

Після того, як 2D модель плати завершена, можна переглянути 3D модель. Altium надає два різні способи отримання об'ємної моделі (рис. 6.152 - 6.153), причому якщо вони недостатньо інформативні, то можна як створити інші об'ємні елементи засобами Altium, так і імпортувати в форматі STEP.

Перенесення проєкту електронного виробу з одного середовища проєктування в інше завжди було одним із найскладніших завдань.

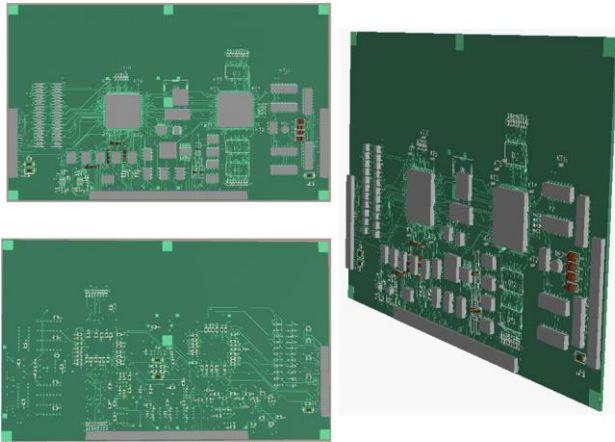


Рисунок 6.152 - 3D-модель розробленої плати, отримана за допомогою Legacy Tools. Фронтальна, зворотна сторона та вигляд збоку

Якщо розробник одночасно працює з іншою САПР або одержує проєкт від сторонніх розробників, йому просто необхідна можливість імпорту схеми або проєкту плати в систему Altium Designer.

Вбудований помічник імпорту (Import Wizard) дозволяє імпортувати схеми, плати, бібліотеки, виконані за допомогою систем P-CAD, OrCAD, PADs, DxDesigner, Allegro PCB, і перетворює їх у проєкти Altium Designer.

У редакторі друкованих плат є традиційні можливості імпорту файлів у стандартні плоскі формати DWG або DXF (наприклад, контур друкованої плати) та передачі проєкту в механічні САПР для подальшого оформлення. Altium Designer також дозволяє здійснювати обмін файлами з будь-якою з програм твердотільного моделювання (AutoCAD, Creo, Inventor і т.д.) у форматі STEP.

Для проведення термального аналізу, розроблена плата може бути з середовища Altium Designer імпортована засобами формату STEP в Creo Simulate.

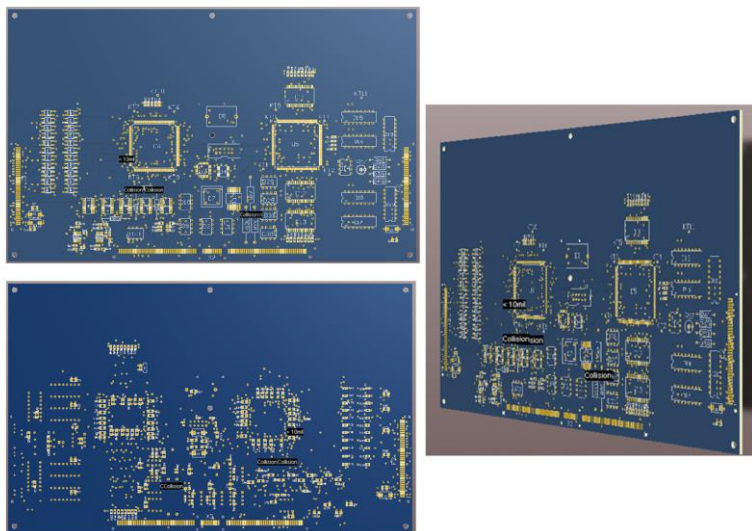


Рисунок 6.153 - 3D-модель розробленої плати, отримана за допомогою 3D View. Фронтальна, зворотна сторона та вигляд збоку.

По закінченню аналізу ми можемо спостерігати в наочному вигляді, за допомогою кольорової візуалізації температурне поле плати. Виходячи з результатів аналізу можна сказати чи буде відбуватися перегрів елементів, яка область плати перенасичена тепловипромінюючими елементами.

Якщо результати аналізу не влаштовують по тепловим характеристикам, то потрібно знову відкрити плату в Altium Designer і внести зміни, наприклад, рознести теплонавантажені елементи далі один від одного.

Для створюваного проєкту враховувалося, що не тільки елементи, встановлені на платі випромінюють тепло, але і інша плата, яка розташована нижче в тому ж корпусі, також є джерелом тепла. В даному випадку теплові характеристики нас задовольняють, перегріву елементів і самої плати не виявлено. Вхідні дані і результати термального аналізу ДП наведені на рис. 6.154 – 6.157.

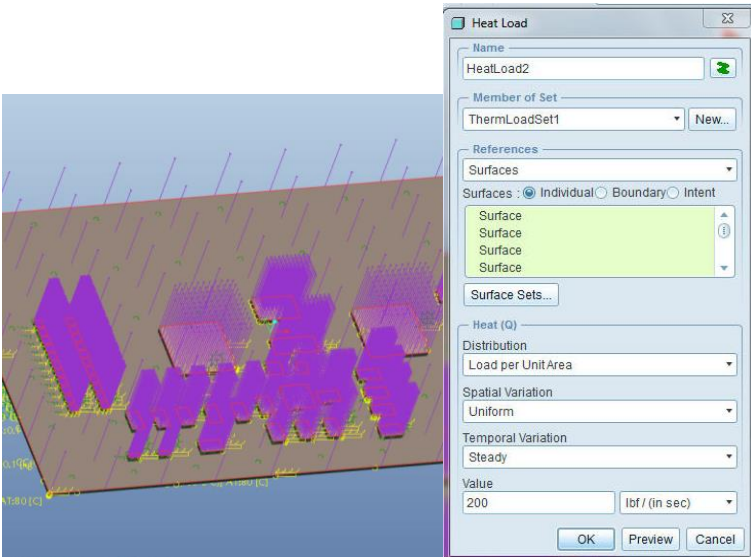


Рисунок 6. 154 - Застосування теплового випромінювання до елементів плати

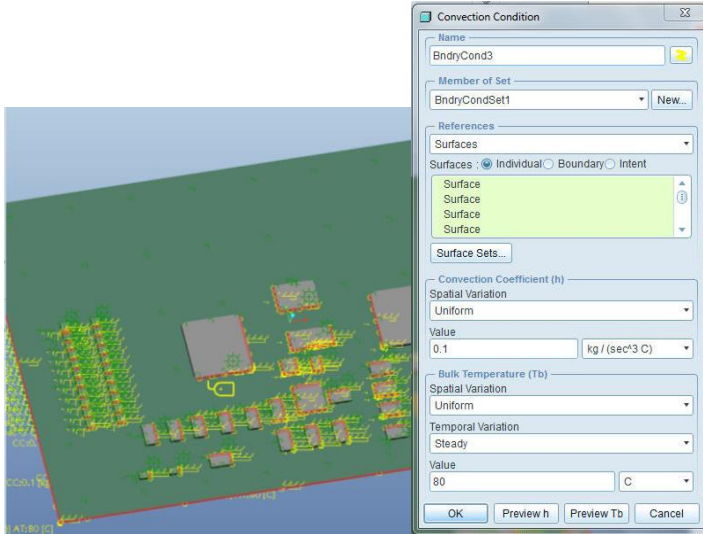


Рисунок 6.155 - Завдання граничних умов

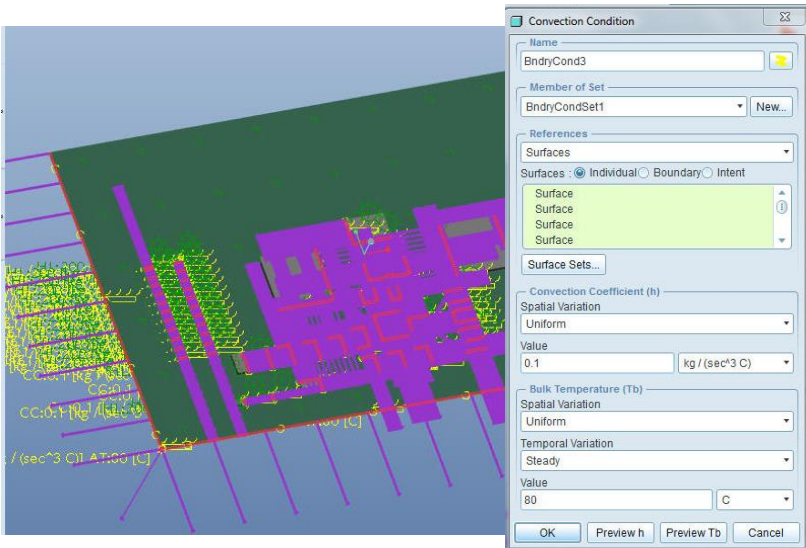


Рисунок 6.156 - Схематичне зображення випромінюваного елементами тепла

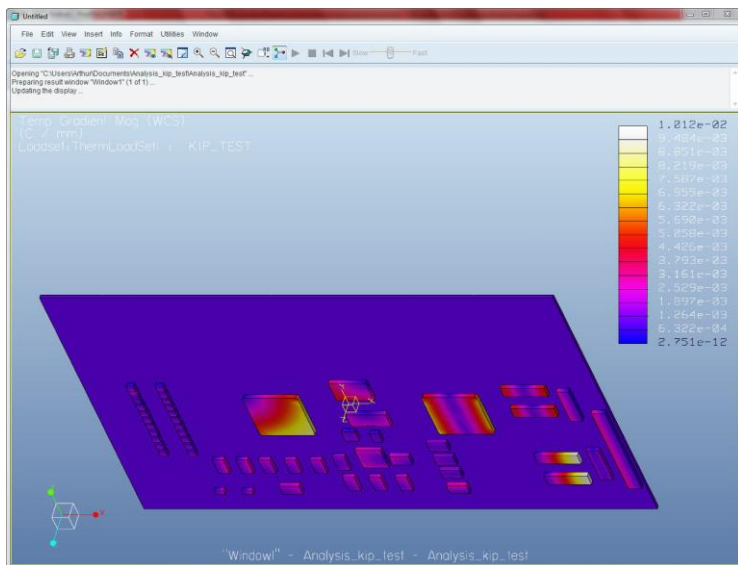


Рисунок 6.157 - Схематичне зображення теплового поля плати

Таким чином, системи Creo та Altium Designer дозволяють створити віртуальний прототип проєктованого об'єкта задовго до його фізичного втілення - налагоджений, узгоджений і повністю передбачуваний (рис.6.158).

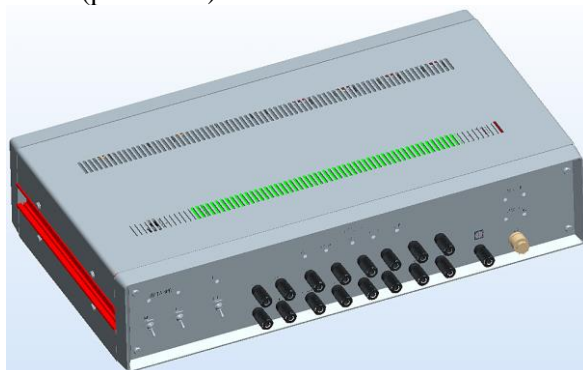


Рисунок 6.158 – Створений віртуальний прототип контрольно-вимірювального пристрою

6.5 Розробка математичного забезпечення аналізу паразитних параметрів конструктивів електронних засобів

6.5.1 Обґрунтування необхідності аналізу паразитних зв'язків у конструктивах ЕЗ на ранніх етапах проєктування

Різні елементи електронних пристроїв працюють на найрізноманітніших рівнях потужності, максимальне відношення яких може досягати великих значень. Небезпека виникнення взаємних перешкод у цих умовах дуже велика. Вона ще ускладнюється тим, що живлення різних пристроїв здебільшого здійснюється від загальної енергетичної мережі або від місцевої борт мережі.

Між двома електричними ланцюгами, що знаходяться на декількій відстані один від другого, можуть виникати електромагнітні зв'язки через електричне поле, магнітне поле, електромагнітне поле випромінювання, дроти і хвилеводи.

На малих відстанях діють усі чотири види зв'язку. Зі збільшенням відстані в першу чергу зникають зв'язки крізь ближні електричні і магнітні поля, у другу чергу перестає впливати електромагнітне поле випромінювання і на великій відстані впливає тільки зв'язок по дротам і хвилеводам. Повне врахування паразитних зв'язків нераціональне, тому що воно дає уточнення результатів на зневажливо малі розміри. Тому, паразитний зв'язок через ближнє електричне поле буде розглядатися як ємнісний зв'язок через малу паразитну ємність без урахування магнітного поля, що з'являється при цьому. Так само, паразитний зв'язок через ближнє магнітне поле буде розглядатися як індуктивний зв'язок через малу паразитну взаємоіндуктивність без урахування електричного поля, що з'являється при цьому.

В мікросбірках (МЗБ) відстані між елементами різко зменшені, а самі елементи розміщуються на підкладці, матеріал якої має провідність та діелектричну проникність набагато більше, ніж у повітря. Це спричиняє підсилення зв'язків між елементами, в тому числі і паразитних. Тому, паразитні зв'язки необхідно враховувати при розробці топології МЗБ. Паразитними параметрами є: для плівкових провідників – власна індуктивність та ємність, взаємна індуктивність та ємність зв'язку з сусідніми провідниками, а також

ємність на перетинах провідників. Для резисторів – послідовна індуктивність, шунтуюча ємність, шунтуючий опір та опір контактів. Для конденсаторів – опір обкладинок та діелектрика. Для котушок індуктивності – послідовний опір та ємність.

У друкованих вузлах (ДВ) відстань збільшується, зростають габарити елементів. Це спричиняє послаблення паразитних зв'язків. Паразитними параметрами для пліткових провідників є власна індуктивність та ємність, взаємна індуктивність та ємність зв'язку з сусідніми провідниками, а також з провідниками, що лежать на іншому боці плати, ємність на перетинах провідників. Для котушок індуктивності – послідовний опір та ємність. Для виводів елементів – опір контактів, взаємна індуктивність та ємність зв'язку з сусідніми контактами елементів.

У гібридних інтегральних модулях (ГІМ) виникають зв'язки, аналогічні зв'язкам в МЗБ та ДВ. Крім того, необхідно враховувати паразитні зв'язки, що виникають між ГІМ, які розташовані на деякій відстані один від другого через з'єднувальні дроти.

Можливості технологічних процесів виготовлення комутаційних плат МЗБ і багатошарових друкованих плат дозволяють реалізувати високу роздільну здатність комутації. Значна щільність розташування провідників і відносно мала товщина діелектричних матеріалів, що розділяють провідники різних шарів, невеличка відстань між провідниками сприяють виникненню паразитних електричних зв'язків на комутаційних платах і в першу чергу ємнісних та індуктивних. Оскільки паразитні ємнісні та індуктивні зв'язки можуть у неприпустимих межах погіршити електричні характеристики схеми, а в деяких випадках призвести до повної втрати її працездатності, їх обов'язково необхідно враховувати на ранніх етапах проєктування.

6.5.2 Моделювання паразитних ємнісних зв'язків

За геометричним розміщенням провідників на платах варто розрізняти ємнісні зв'язки між провідниками, що лежать в одному провідному шарі, а також між провідниками, що лежать у різних провідних шарах.

Ємнісні зв'язки між рівнобіжними провідниками, що лежать в одному шарі, визначаються за формулою:

$$C_{ij} = \varepsilon_0 * \varepsilon * \overline{C_{ij}} * l, \quad (6.1)$$

де C_{ij} - ємність між рівнобіжними і-м та j-м плівковими провідниками, Ф;

$\overline{C_{ij}}$ - ємнісний коефіцієнт і-го та j-го провідників;

l - довжина взаємного перекриття, м;

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2), \quad (6.2)$$

ε_1 - діелектрична проникність підшарку,

ε_2 - діелектрична проникність середовища;

ε_0 - діелектрична постійна, що дорівнює $8.854 * 10^{-12}$ Ф/м.

Ємнісний коефіцієнт $\overline{C_{ij}}$ визначається в залежності від топології та кількості провідників.

Для системи двох рівнобіжних плівкових провідників ємнісний коефіцієнт $\overline{C_{ij}}$ визначається за формулою:

$$\overline{C_{12}} = 1.56 + 0.41 * \lg \frac{b_1 + b_2}{a_1^2}, \quad (6.3)$$

де b_1 - ширина першого провідника, м;

b_2 - ширина другого провідника, м;

a_1 - відстань між першим і другим провідником, м.

Система двох рівнобіжних плівкових провідників зображена на рис. 6.159 а.

Ємнісні коефіцієнти $\overline{C_{ij}}$ для системи трьох рівнобіжних плівкових провідників (рис. 6.159 б), визначаються за формулами:

$$\overline{C_{23}} = \overline{C_{12}} = 1.18 + 0.31 \lg \frac{b_1 * b_2}{a_1^3}, \quad (6.4)$$

$$\overline{C}_{13} = 0.58 + 0.27 \lg \frac{b_1^{12} * b_3^{12}}{a_1^3 * b_2^3 * a_2^3}, \quad (6.5)$$

де b_3 - ширина третього провідника, м;

a_2 - відстань між 2 і 3 провідником, м;

Ємнісні коефіцієнти \overline{C}_{ij} для системи чотирьох рівнобіжних плівкових провідників (рис. 6.159 в) визначаються за формулами (6.6) - (6.10):

$$\overline{C}_{12} = \overline{C}_{34} = 1.1 + 0.29 \lg \frac{b_1 * b_2^2}{a_1^3}, \quad (6.6)$$

$$\overline{C}_{13} = 0.37 + 0.17 \lg \frac{b_1 * b_3^{\frac{3}{2}}}{b_2^{\frac{11}{6}} * a_1^{\frac{1}{3}} * a_2^{\frac{1}{3}}}, \quad (6.7)$$

$$\overline{C}_{14} = 0.36 + 0.18 \lg \frac{b_1 * b_4}{b_2^{\frac{3}{4}} * a_2^{\frac{1}{2}} * b_3^{\frac{3}{4}}}, \quad (6.8)$$

$$\overline{C}_{23} = 0.96 + 0.41 \lg \frac{b_2 * b_3}{a_2^2}, \quad (6.9)$$

$$\overline{C}_{24} = 0.37 + 0.17 \lg \frac{b_2 * b_4^{\frac{3}{2}}}{b_3^{\frac{11}{6}} * a_2^{\frac{1}{3}} * a_3^{\frac{1}{3}}}, \quad (6.10)$$

де b_4 - ширина четвертого провідника, м;

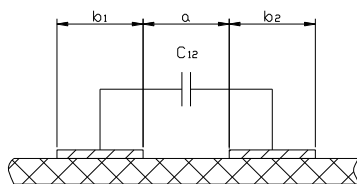
a_3 - відстань між 3 і 4 провідником, м;

Ємність між вигнутими під прямим кутом рівнобіжними плівковими провідниками визначається за формулою:

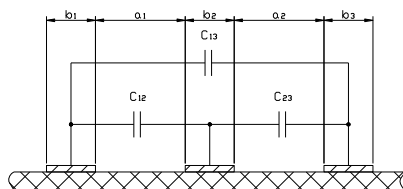
$$C_{ij} = \varepsilon_o * \varepsilon * \overline{C}_{ij} * l_{екв}, \quad (6.11)$$

де $\overline{C_{ij}}$ - ємнісний коефіцієнт;

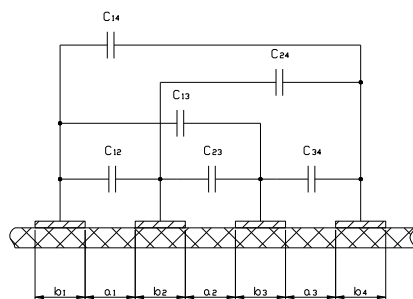
$l_{екв}$ - еквівалентна довжина.



а



б



в

а – система двох рівнобіжних провідників; б – система трьох рівнобіжних провідників; в – система чотирьох рівнобіжних провідників

Рисунок 6.159 – Ємнісні зв'язки при розташуванні рівнобіжних провідників на платі з одним рівнем провідників

Для системи двох вигнутих під прямим кутом провідників (рис. 6.160 а) $l_{\text{екв}}$ і $\overline{C_{ij}}$ визначаються за формулами:

$$l_{\text{екв}} = 6b_1 + \frac{1}{2}b_2 + a_1 \quad (6.12)$$

$$\overline{C_{12}} = 1.56 + 0.411 \lg \frac{b_1 * b_2}{a_1^2} \quad (6.13)$$

Для системи трьох вигнутих під прямим кутом провідників (рис. 6.160 б) $l_{\text{екв}}$ і $\overline{C_{ij}}$ визначаються за формулами:

$$l_{\text{екв}12} = 20,25 * b_1, \quad (6.14)$$

$$\overline{C_{12}} = 1.18 + 0.311 \lg \frac{b_1 * b_2^2}{a_1^3}, \quad (6.15)$$

$$l_{\text{екв}23} = 26,23b_1, \quad (6.16)$$

$$\overline{C_{23}} = 1.18 + 0.311 \lg \frac{b_3 * b_2^2}{a_2^3}, \quad (6.17)$$

$$l_{\text{екв}} = 23,19b_1, \quad (6.18)$$

$$\overline{C_{13}} = 0.58 + 0.271 \lg \frac{b_1^{12} * b_3^{12}}{a_1^{\frac{1}{3}} * a_2^{\frac{1}{3}} * b_2^{\frac{3}{2}}}, \quad (6.19)$$

Ємнісні зв'язки між провідниками, що лежать в різних провідних шарах можуть визначатися для наступних випадків.

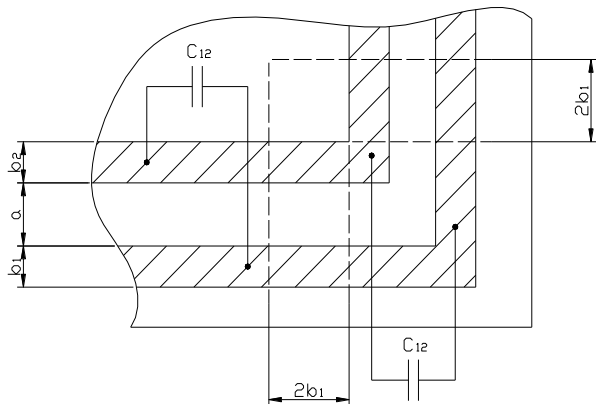
Ємність між двома провідниками, які лежать перпендикулярно один до одного (рис. 6.161 а) за формулою:

$$C_{ij} = \varepsilon_o * \varepsilon_1 * b_i * b_j * \frac{1}{h}, \quad (6.20)$$

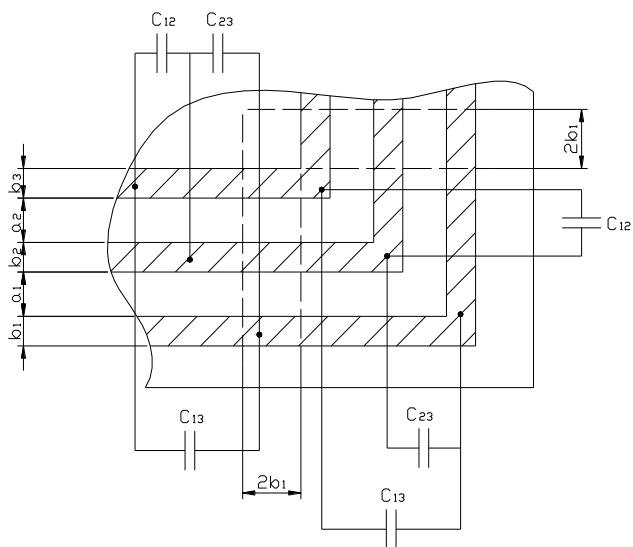
де h - товщина плати, м;

b_i - ширина і-го провідника, м;

b_j - ширина j-го провідника.



а



б

а – система двох провідників; б – система трьох провідників

Рисунок 6.160 – Ємнісні зв'язки при розташуванні вигнутих під прямим кутом провідників на платі з одним рівнем провідників

Ємність між двома провідниками, які лежать паралельно один до одного і мають деяку ширину перекриття (рис. 6.161 б) за формулою:

$$C_{ij} = \varepsilon_0 * \varepsilon * b * \frac{l}{h}, \quad (6.21)$$

де b - ширина перекриття двох провідників, м;

l - довжина взаємного перекриття провідників, м.

Ємність між провідником і поверхнею, що екранує, (рис. 6.161 в) за формулою:

$$C_{ij} = 0,0085 * \varepsilon * \ln\left(\frac{b}{h}\right) \left[1 + \frac{2 * H_2}{\pi * b} \left(11 + \lg \frac{\pi * b}{h}\right)\right], \quad (6.22)$$

де H_2 - товщина провідника, м;

b - ширина провідника, м;

h - товщина підшарку, м.

6.5.3 Моделювання паразитних індуктивних зв'язків

За геометричним розміщенням провідників на платах варто розрізняти індуктивні зв'язки між провідниками, що лежать в одному провідному шарі, між провідниками, які лежать у різних провідних шарах і власну індуктивність провідників.

Власна індуктивність провідника (рис. 6.162 а) визначається за формулою:

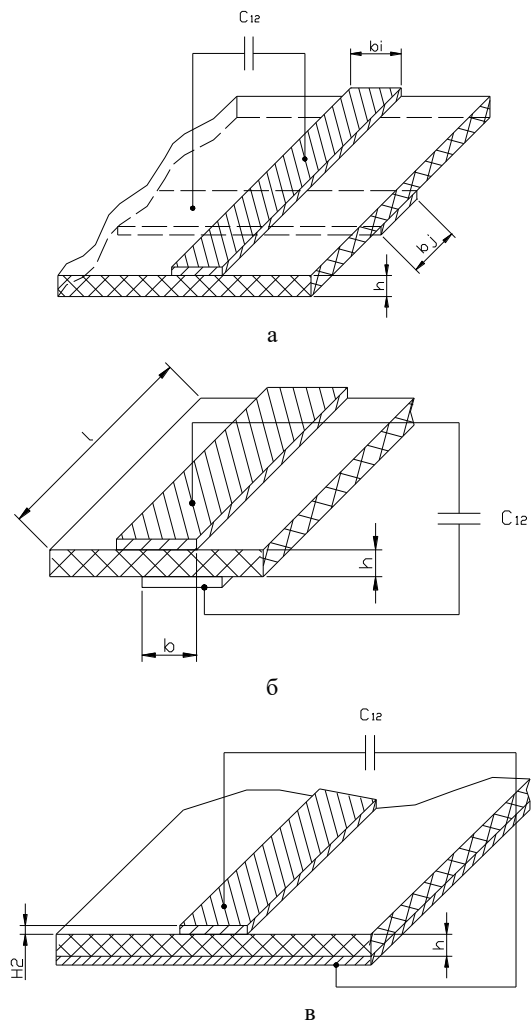
$$l = 0.0002 * \left[2.31 * \lg \frac{2 * x}{b} + 0.2235 \frac{b}{x} + 0.5\right], \quad (6.23)$$

де l - власна індуктивність, Гн;

x - довжина провідника, м;

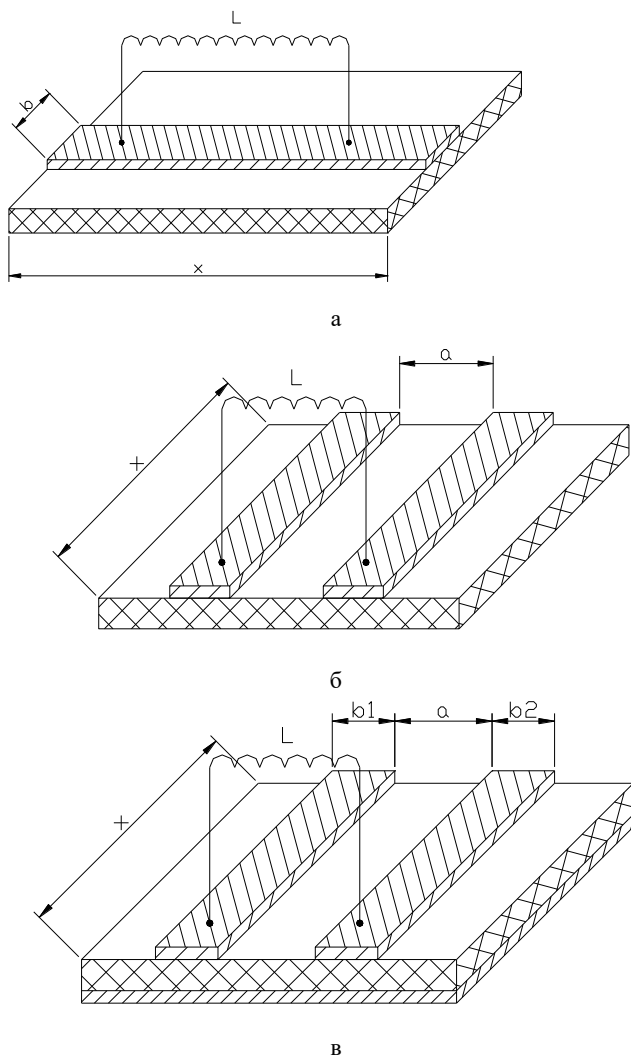
b - ширина провідника, м.

Індуктивність двох рівнобіжних провідників, розташованих в одному провідному шарі (рис. 6.162 б) визначається по формулі:



а – система перпендикулярних провідників; б – система рівнобіжних провідників;
в – система провідник-екран

Рисунок 6.161 – Паразитні ємнісні зв'язки при розташуванні провідників на платі з різними провідниковими шарами



а – власна індуктивність; б – індуктивність двох рівнобіжних провідників; в – індуктивність двох провідників на платі з екраном

Рисунок 6.162 – Паразитні індуктивні зв'язки для різних варіантів розташування провідників

$$L = 0.02 * x * [2.3 * \lg\left(\frac{2x}{a}\right) - 1 - \frac{a}{x}], \quad (6.24)$$

де L - індуктивність, Гн;

x - довжина перекриття провідників, м;

a - відстань між провідниками, м.

Індуктивність двох рівнобіжних провідників, які знаходяться на платі з поверхнею, що екранує, (рис. 6.162 в) визначається за формулою:

$$L = 2 * x * \left[\frac{a + 0.5 * (b_1 + b_2)}{h} + \ln \frac{2 * x}{a + 0.5 * (b_1 + b_2)} \right], \quad (6.25)$$

де L - індуктивність, Гн;

x - довжина перекриття провідників, м;

a - відстань між провідниками, м;

b_1 - ширина першого провідника, м;

b_2 - ширина другого провідника, м;

h - товщина підшарку, м.

6.5.4 Розробка методики урахування впливу паразитних ємнісних та індуктивних параметрів на функціонування електронного виробу

Узагальнений алгоритм методики урахування впливу паразитних параметрів на функціонування електронного виробу наведено на рис. 6.163.

Блок 1. Початок.

Блок 2. Виконати нумерацію всіх провідників на топологічному кресленнику, згідно з нумерацією вузлів на схемі електричній принципівій.

Блок 3. Керуючись рекомендаціями розробника, виділити сигнальний ланцюг.

Блок 4. Виділити відповідні фрагменти топології провідникового шару.

Блок 5. Вибрати відповідні методики розрахунку паразитних параметрів для різних фрагментів топології.

Блок 6. Підготувати вхідні дані для розрахунку паразитних параметрів.

Блок 7. Ввести вхідні дані для розрахунку паразитних параметрів.

Блок 8. Розрахувати паразитні параметри, використовуючи відповідні математичні моделі.

Блок 9. Включити одержані паразитні параметри в схему електричну принципову, згідно з вузлами включення (номерами провідників).

Блок 10. Ввести вхідні дані для розрахунку електричних параметрів схеми.

Блок 11. Виконати розрахунок параметрів та характеристик схеми з урахуванням впливу паразитних зв'язків.

Блок 12. Виконати аналіз впливу паразитних параметрів на роботу електронної схеми.

Блок 13. Перевірка якості проєкту. В разі отримання задовільних результатів, перехід на блок 15, якщо ні – перехід на блок 14.

Блок 14. Корегування проєкту. В разі необхідності, змінити конфігурацію провідникового шару та виконати повторний аналіз (перехід на блок 4).

Блок 15. Кінець.

При розробці методики оцінки впливу паразитних параметрів основна увага приділяється урахуванню паразитних ємностей та індуктивностей, що виникають між рівнобіжними провідниками, які знаходяться в одному шарі. Приватними випадками є:

- перпендикулярні провідники, що лежать на різних боках підшарку;

- провідники, що утворюють прямий кут;

- провідник, що лежить на підшарку, зворотній бік якого є екраном;

- провідники, що лежать на різних боках підшарку та мають перекриття шириною b_1 ;

- провідник, що лежить на підшарку.

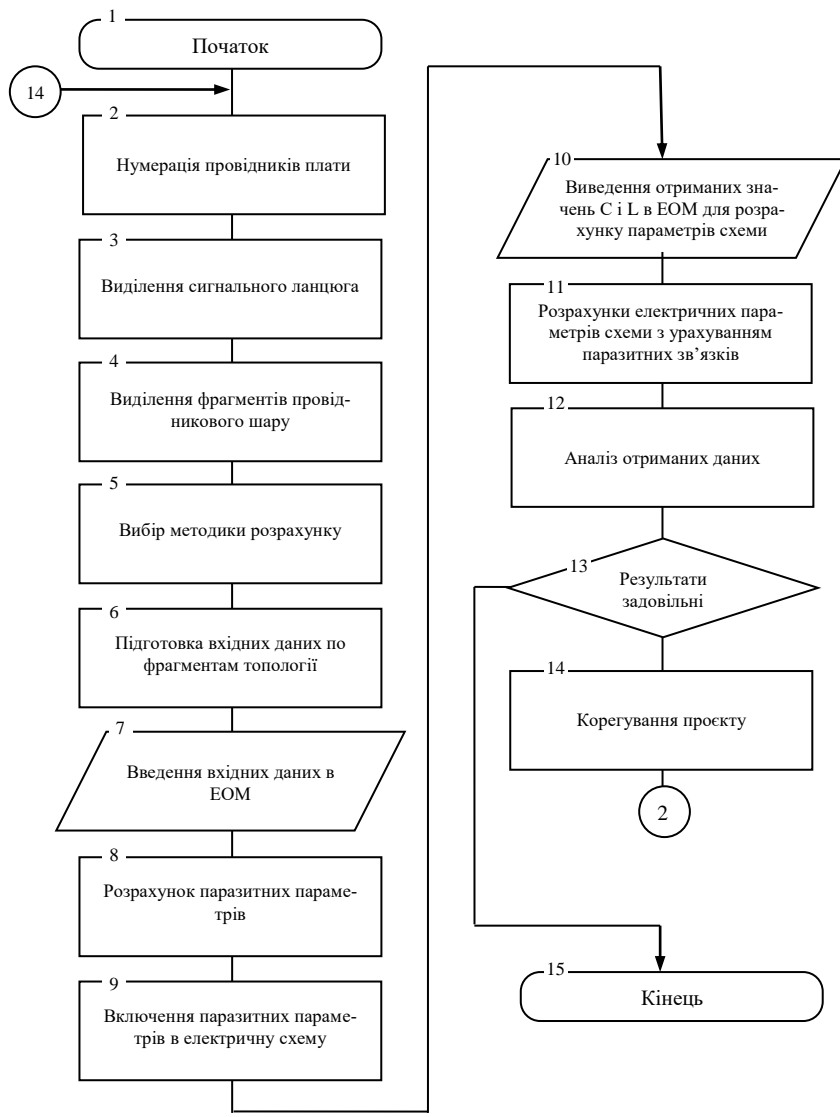


Рисунок 6.163– Схема алгоритму методики урахування впливу паразитних параметрів

При виділенні типових фрагментів топології рівнобіжних провідників необхідно дотримуватись наступної послідовності дій:

- виділити фрагменти топології сигнального ланцюга, що містять чотири рівнобіжні провідника, причому відстань між провідниками не повинна перевищувати $2h$ (дві товщини плати);

- виділити фрагменти топології сигнального ланцюга, що містять три рівнобіжні провідника;

- виділити фрагменти топології сигнального ланцюга, що містять два рівнобіжні провідника;

- після розгляду всіх провідників сигнального ланцюга, розглянути провідники, які знаходяться у безпосередній близькості до нього (для випадку чотирьох, трьох та двох рівнобіжних провідників);

- для провідників, що лишилися виділити фрагменти з чотирьох, трьох та двох рівнобіжних провідників.

При виділенні типових фрагментів топології провідників, що утворюють прями́й кут, необхідно дотримуватись наступної послідовності дій:

- розбити систему провідників на три підсистеми (дві підсистеми рівнобіжних провідників та підсистема, яка містить провідники, що розташовані під прямим кутом на відстані $2b_1$ від перегину);

- виділити фрагменти топології для кожної окремої підсистеми;

- загальну ємність розрахувати як суму ємностей для трьох підсистем.

Розроблена методика дозволяє виділити різні фрагменти топології провідникового шару, виконати розрахунки паразитних параметрів у відповідності з наведеними методиками, провести аналіз впливу паразитних параметрів на функціонування електронного засобу [38].

6.6 Розробка комплексних фізико-топологічних моделей елементної бази електронних засобів і методики ідентифікації їх параметрів

6.6.1 Вибір і обґрунтування виду вихідної математичної моделі взаємопов'язаних фізичних процесів

Вимоги до комплексних моделей елементної бази ЕЗ витікають з недоліків математичних моделей, які використовуються в сучасних САПР і методик ідентифікації їх параметрів, а також із сутності та особливостей застосування моделей для комплексного моделювання електричних і теплових процесів в апаратурі, яка характеризується значними питомими тепловиділеннями, неоднорідністю теплових полів. Вони можуть бути сформульовані таким чином:

- моделі мають бути адекватні об'єкту моделювання, з достатньою точністю відбивати фізичні процеси в приладі;
- моделі мають відображати взаємний вплив електричних і теплових процесів, що спільно протікають в приладі, дозволяти проаналізувати роботу приладу з урахуванням його реальної температури;
- ідентифікація первинних параметрів моделей має здійснюватися розрахунковим способом, з використанням доступної вхідної інформації;
- методика ідентифікації має забезпечувати розрахунок допусків значень параметрів моделі;
- методика розрахунку первинних параметрів моделей має легко програмно реалізовуватися.

Аналіз особливостей моделювання ЕЗ, а також вимог до комплексних моделей, дозволив зробити висновок, що найбільш повно урахувати фізичні принципи функціонування, структуру, топологію, а також тісний взаємний вплив електричних і теплових процесів дозволяють комплексні фізико-топологічні моделі елементної бази (КФТМ). КФТМ – це модель у вигляді еквівалентної заступної схеми, вітки якої відображають шляхи розповсюдження потокових змінних з урахуванням ідеалізації фізичного процесу; вузли моделі відповідають поверхням, об'ємам або частинам об'є-

мів, а первинні параметри визначаються фізико-топологічними і фізико-технологічними параметрами напівпровідникової структури.

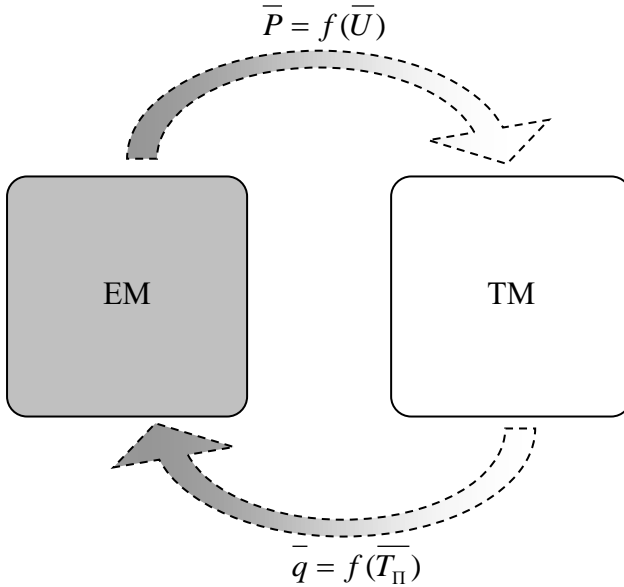


Рисунок 6.164 – Узагальнена комплексна фізико-топологічна модель елемента

Моделі можуть бути представлені у вигляді двох складових частин – моделі електричних процесів (ЕМ) і моделі теплових процесів (ТМ) (рис. 6.164). Взаємозв'язок між складовими частинами комплексної моделі здійснюється через залежності параметрів компонентів від змінних моделі (різниці електричних потенціалів, температури). На рисунку позначені: \bar{P} – вектор розсіюваних потужностей; \bar{U} – вектор напруг (різниць потенціалів); \bar{q} – вектор внутрішніх параметрів компонентів моделі; \bar{T}_i – вектор температур активних зон.

6.6.2 Розробка узагальненого алгоритму методики створення КФТМ елементної бази ЕЗ

Для створення комплексних моделей елементів необхідно запропонувати методику, яка має:

- відображати послідовність виконання і зміст основних етапів розробки моделі;
- дозволяти виконати розробку моделей різних напівпровідникових приладів та ІМС;
- передбачати перевірку адекватності розроблених моделей і точності розрахованих параметрів;
- визначати найбільш раціональні шляхи коректування для досягнення необхідної точності і адекватності моделювання.

Для побудови комплексних фізико-топологічних моделей напів-провідникових приладів та ІМС розроблено схему алгоритму методики створення КФТМ, яку наведено на рис.6.165. Схема відображає послідовність виконання і зміст основних етапів вибору моделі, розробки методики її ідентифікації, підтвердження точності та адекватності моделей і методики.

Блок 1. Початок розробки методики. Отримання вихідних даних на моделювання: тип приладу, його конструктивно-технологічне виконання, особливості застосування в апаратурі.

Блок 2. Вибір структури моделі. Найбільш прийнятними з точки зору використання в програмах схемотехнічного моделювання є моделі у вигляді еквівалентних заступних схем, вітки яких відображають шляхи розповсюдження фізичних поточкових змінних в приладі. Кількість віток і вузлів моделі визначає витрати машинного часу та об'єм необхідної пам'яті. Тому, при виборі структури моделі необхідно знайти компромісне рішення між точністю моделі та її складністю. Модель має з інженерною точністю відображати фізичні процеси у елементі.

Блок 3. Вибір аналітичних співвідношень для опису параметрів віток моделі. При комплексному моделюванні електричних і теплових процесів, які спільно відбуваються в апаратурі найбільшу увагу необхідно приділити урахуванню залежностей внутрішніх параметрів компонентів від змінних моделі (різниці електричних потенціалів, температури) та урахуванню найважливіших фізичних ефектів в компоненті.

Блок 4. Вибір співвідношень методики визначення первинних параметрів моделі. Вирішальним чинником при виборі співвідношень є можливість розрахунку первинного параметра на основі фізико-топологічних і фізико-технологічних параметрів структури (а у разі ускладнення - за даними ТУ). Для цього необхідно провести аналіз даних, які наведено в конструкторсько-технологічній документації (КТД), в ТУ на елемент та в довідковій літературі. При розрахунках електрофізичних параметрів напівпровідникових структур необхідно враховувати їх залежність від температури.

Блок 5. Введення вхідної інформації для елемента схеми тестової структури. Вхідними даними є: геометричні, технологічні, електрофізичні, параметри і дані ТУ. Перевагу необхідно віддати однозначно наведеним в ТУ значенням, а не значенням, які визначаються опосередковано з характеристик приладу.

Блок 6. Розрахунок первинних параметрів КФТМ елемента. Для підвищення точності розрахунків пропонується застосування інтервального аналізу, який дозволяє виконати розрахунки не на основі усереднених вхідних даних (наприклад середні значення концентрації легуючих домішок в ділянках напівпровідникової структури), внаслідок чого маємо наближені значення параметрів, а отримати допускові значення первинних параметрів моделей.

Важливість і актуальність завдання первинних параметрів моделей в допусковому інтервалі наочна, оскільки існує можливість реально їх застосувати при аналізі та забезпеченні показників надійності і якості аналогових ЕЗ.

Блок 7. Введення вхідних даних опису схеми тестової структури. Передбачає введення описової і керуючої інформації: опис параметрів і вузлів включення віток, джерел зовнішнього впливу, значень первинних параметрів моделей напів-провідникових приладів схеми тестової структури, вид аналізу, що проводиться.

Блок 8. Комплексний розрахунок параметрів і характеристик схеми тестової структури. Може бути виконаний за допомогою відомих систем схемо технічного моделювання, за умови вбудовання в їх бібліотеки розроблених моделей елементної бази ЕЗ.

Блоки 9, 10. Порівняння експериментальних і розрахованих значень параметрів і характеристик схеми тестової структури. Для підтвердження точності розробленої методики передбачено порів-

няння розрахункових параметрів і характеристик схеми (струми і потенціали в вузлах схеми, теплові потужності розсіяння, температури активних зон) з експериментальними, які можуть бути виміряні при наявності вимірювального обладнання або використовуватися задані в ТУ. При цьому визначається вектор похибок $\Delta \bar{p}$:

$$\Delta \bar{p} = [\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_i] \quad (6.26)$$

Блок 11. Перевірка умови досягнення необхідної точності моделювання. Дозволяє виявити недоліки моделі і методики та визначитися з напрямком для внесення змін.

$$\max \Delta p_i \leq \varepsilon, \quad (6.27)$$

де ε – допустима похибка розрахунку параметрів і характеристик схеми.

Блок 12. Виведення результатів розрахунку. При досягненні необхідної точності виводяться результати розрахунку первинних параметрів моделі і схеми тестової структури.

Блоки 13-15. Коректування моделі і методики. Пріоритетне значення має коректування співвідношень методики, після чого можливий ще один розрахунок. Якщо необхідна точність не досягнута, робиться спроба коректування аналітичних співвідношень, що описують параметри віток моделі і, нарешті, в останню чергу - коректування структури моделі.

Запропонована методика створення КФТМ елементів дозволяє виконати розробку моделі з урахуванням комплексного характеру протікання взаємопов'язаних електричних та теплових процесів, перевірити її точність та адекватність.

6.6.3 Розробка КФТМ елементної бази ЕЗ

Розробка КФТМ елементів здійснюється в декілька етапів. Спочатку будується електрична модель (ЕМ). Отримані ЕМ елементної бази, враховуючи необхідні фізичні ефекти в приладах, є моделями великого сигналу, що дозволяє їх використовувати при автоматизованому проектуванні, як для аналізу нелінійних схем ЕЗ в режимі великого сигналу, так і для аналізу лінеаризованих схем ЕЗ в режимі малого сигналу. Як теплова модель елемента використовується топологічна модель.

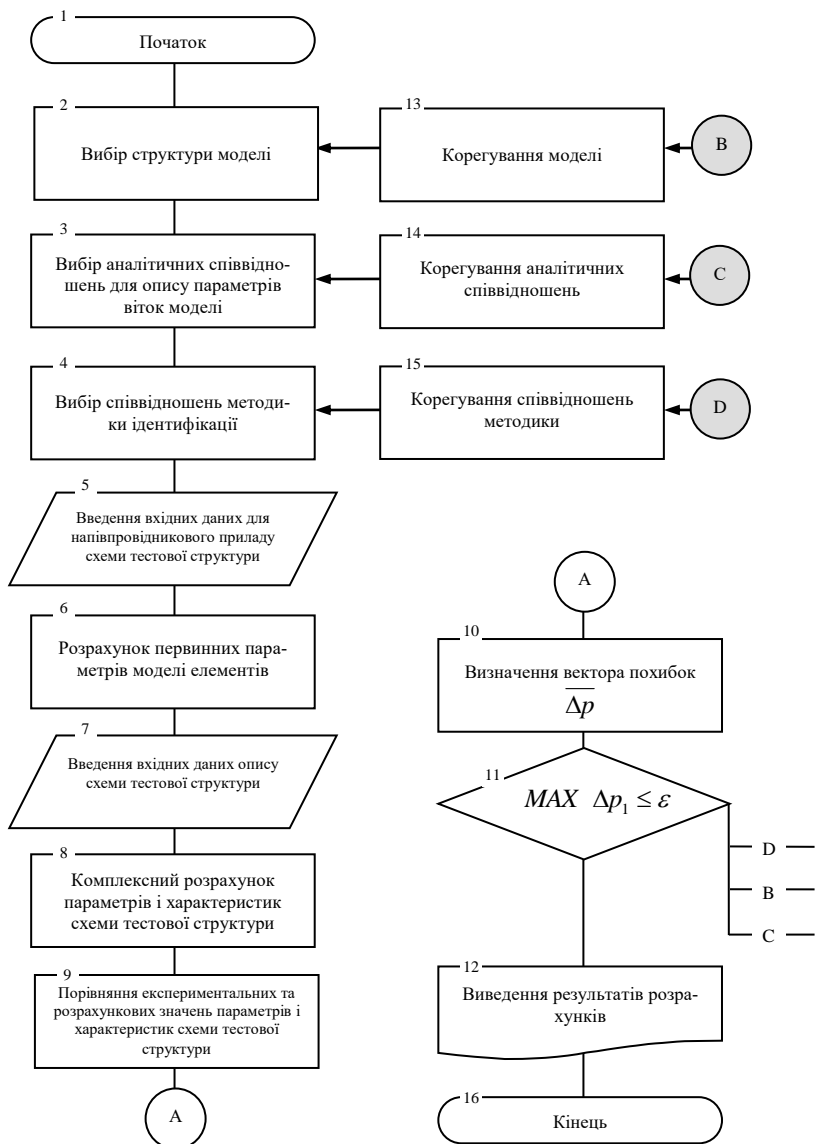


Рисунок 6.165 – Схема алгоритму розробки комплексних фізико-топологічних моделей елементної бази ЕЗ

Вибір саме цієї структури теплової моделі, яка є фактично його макромоделлю, пояснюється тим, що при автоматизованому проектуванні розробника апаратури цікавить передусім температура активної зони елемента і середня температура його поверхні. Для моделювання теплового процесу напівпровідникових приладів можна прийняти наступні допущення: об'єм кристала ізотермічний, поверхня основи кристалотримача ізотермічна, зони контакту з'єднувального шару між кристалом і поверхнею кристалотримача ізотермічні.

На другому етапі ЕМ і ТМ елемента об'єднують в єдину КФТМ. Принципи об'єднання двох топологічних моделей відображають реальний взаємозв'язок між електричними і тепловими процесами в приладі та зводяться до наступного:

- джерело теплового потоку в ТМ, що моделює тепловиділення в елементі представляється як залежне джерело, кероване потенційними змінними віток ЕМ приладу;

- зворотний зв'язок між ЕМ і ТМ встановлюється шляхом введення в ЕМ залежностей внутрішніх параметрів компонентів від температурного потенціалу активної зони ТМ, причому внутрішній параметр вітки ЕМ відповідає фізичному параметру елемента, а вигляд температурної залежності використовується відомий.

Графічне зображення електричної частини КФТМ операційного підсилювача наведено на рис. 6.166. На рис. 6.167 представлено побудову теплової частини моделі. В таблицях 6.3, 6.4 наводяться докладний опис і перелік первинних параметрів запропонованої КФТМ операційного підсилювача. Опис моделі наведено в наступній послідовності:

- а) пасивні компоненти моделі – параметри лінійних і нелінійних компонентів, поточкові змінні нелінійних компонентів;

- б) активні компоненти моделі – поточкові і потенційні впливи залежних та незалежних джерел, коефіцієнти керування залежних джерел і співвідношення для потенційних впливів незалежних джерел;

- в) відповідно до опису пасивних і активних компонентів моделі виділено вектор внутрішніх параметрів компонентів моделі;

- г) наведено співвідношення для залежностей внутрішніх параметрів компонентів моделі від змінних моделі (різниці електричних потенціалів, температури);

д) з урахуванням параметрів наведених залежностей виділено вектор первинних параметрів КФТМ елемента [39].

6.6.4 Розробка методик визначення параметрів моделей елементної бази ЕЗ

Аналіз літературних джерел в галузі теорії і практики проектування конструкцій та технології виготовлення напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем свідчить, що накопичений досвід та існуючі співвідношення для розрахунку конструктивних, теплових, електрофізичних параметрів структур можуть з успіхом використовуватись при визначенні первинних параметрів розроблених КФТМ елементної бази МЕА.

Виходячи з цього, для розробки методики розрахунку параметрів моделі необхідно виконати наступне: визначити вхідні дані для розрахунку; вибрати співвідношення, які дозволяють з достатньою точністю розрахувати шукані параметри; визначити послідовність розрахунку; виконати розрахунок параметрів моделі конкретного приладу.

Наприклад, вхідні дані для розрахунку параметрів моделі операційного підсилювача:

- геометричні параметри структури: a , b , h , ΔX - відповідно, довжина, ширина, висота кристалу, а також розмір по вісі X елементарного об'єму (див. рис. 6.167);

- дані ТУ на прилад: всі параметри, що наведено в таблиці 6.4, за винятком коефіцієнта α_B ;

- теплофізичні параметри структури: λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу кристала, $B/(K \cdot m)$.

Опис методики розрахунку наступний.

Розрахунок теплового опору кристал-корпус R_{TK-K} :

$$R_{TK-K} = R_{TK-K} + R_{TKP}, \quad (6.28)$$

де R_{TKP} - тепловий опір кристала ІМС, що визначається як:

$$R_{TKP} = \frac{h}{2\lambda ab} \quad (6.29)$$

Розрахунок теплових опорів R_{T1} , R_{T2} , R_{T3} , R_{T4} , R_{T5} :

$$\begin{aligned} R_{T1} &= R_{T2} = 2RX_{TP}, \\ R_{T3} &= R_{T4} = R_{T5} = RZ_{TP} \end{aligned}$$

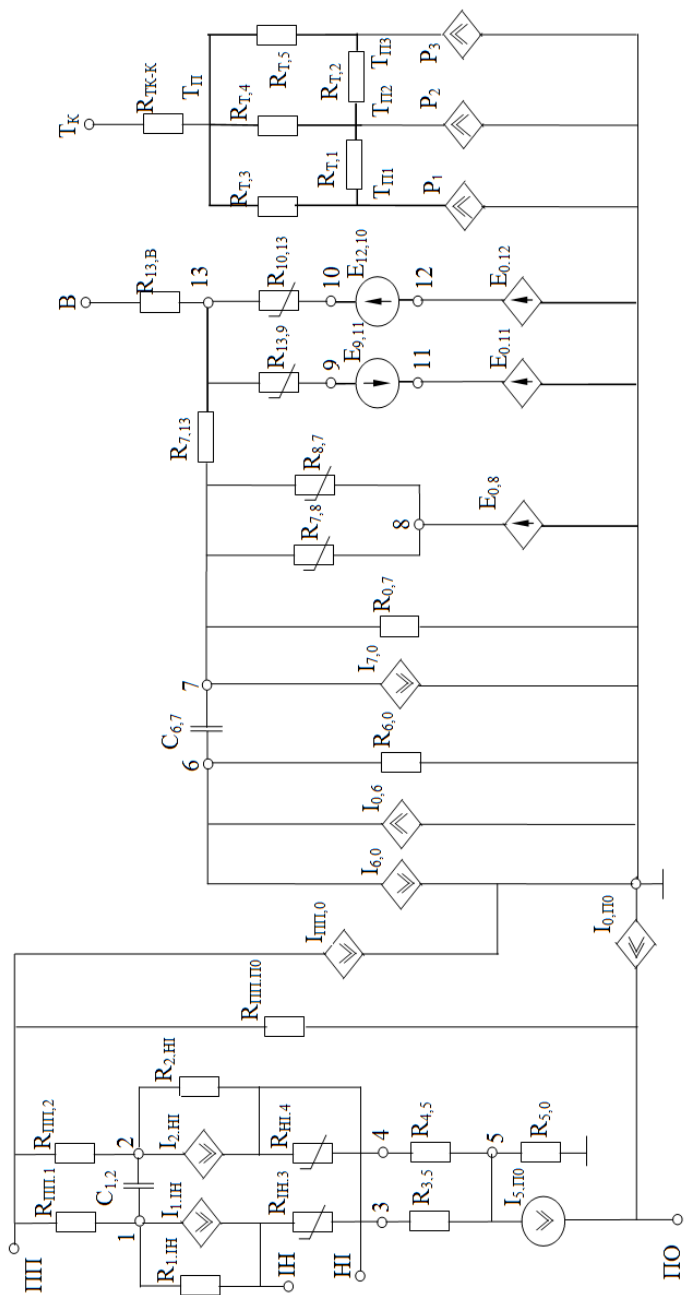


Рисунок 6.166 -.Електрична частина КФТМ операційного підсилювача

Таблиця 6.3 - Опис комплексної фізико-топологічної моделі ОП

Тип компонента, вектора або залежності	Умовні позначення і співвідношення для розрахунку
1	2
Пасивні компоненти моделі	$R_{\text{III},1} = R_K; R_{\text{III},2} = R_{\text{III},1}; R_{1,\text{IH}} = \frac{\varphi_{T1}}{I_{T1}}; R_{2,\text{IH}} = \frac{\varphi_{T1}}{I_{T2}};$ $R_{4,5} = R_{3,5}; R_{3,5} = \left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{\beta_1 + \beta_2 + 2} \right) \cdot \left(R_K - \frac{\varphi_{T1}}{I_K} \right);$ $R_{5,0} = \frac{U_A}{\left[\left(\frac{1 + \beta_1}{\beta_1} + \frac{1 + \beta_2}{\beta_2} \right) \cdot I_K \right]};$ $R_{\text{III},\text{IIO}} = \frac{(E_{\text{II}}^+ - E_{\text{II}}^-)^2}{p_{\text{IIO}} - 2I_K(E_{\text{II}}^+ - E_{\text{II}}^-)};$ $R_{6,0} = R_{\text{ПК}}; R_{0,7} = R_{\text{B1}}; R_{7,13} = R_{\text{B2}}; R_{13,8} = R_{\text{B}}; R_{\text{TK-K}};$ $R_{\text{T1}}, R_{\text{T2}}, R_{\text{T3}}, R_{\text{T4}}, R_{\text{T5}},$ $C_{1,2} = C_K \cdot \text{tg } \Delta\Phi; C_{6,7} = C_K;$ $I_{\text{RIH},3} = I_{T1} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{\text{IH},3}}{\varphi_{T1}} \right) - 1 \right]; I_{\text{RIH},4} = I_{T2} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{\text{HI},4}}{\varphi_{T1}} \right) - 1 \right];$ $I_{\text{R7},8} = I_{T3} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{7,8}}{\varphi_{T3}} \right) - 1 \right]; I_{\text{R8},7} = I_{T4} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{8,7}}{\varphi_{T3}} \right) - 1 \right];$ $I_{\text{R13},9} = I_{T5} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{13,9}}{\varphi_{T3}} \right) - 1 \right]; I_{\text{R10},13} = I_{T6} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{10,13}}{\varphi_{T3}} \right) - 1 \right];$

Продовження таблиці 6.3

1	2
Активні компоненти моделі	$J_{1, IH} = \alpha_1 \cdot I_{R\ IH,3}; \alpha_1 = \frac{\beta_1}{1 + \beta_1}; J_{2, HI} = \alpha_2 \cdot I_{R\ HI,4};$ $\alpha_2 = \frac{\beta_2}{1 + \beta_2};$ $J_{III, 0} = \alpha_3 \cdot I_{R13, B}; \alpha_3 = \begin{cases} \alpha_B, \text{ при } \varphi_B > 0; \\ 0, \text{ при } \varphi_B \leq 0; \end{cases}$ $J_{0, П0} = \alpha_4 \cdot I_{R13, B}; \alpha_4 = \begin{cases} 0, \text{ при } \varphi_B \geq 0; \\ -\alpha_B, \text{ при } \varphi_B < 0; \end{cases}$ $J_{5, П0} = I_0; I_0 = \left[\frac{\beta_1}{1 + \beta_1} + \frac{\beta_2}{1 + \beta_2} \right] \cdot I_K;$ $\alpha_6 = \frac{1}{(R_K \cdot K_{OC})};$ $J_{6, 0} = \alpha_5 \cdot U_{1,2}; \alpha_5 = \frac{1}{R_K}; J_{0, 6} = \alpha_6 \cdot U_{5,0};$ $J_{7, 0} = \alpha_7 \cdot U_{6,0}; \alpha_7 = \frac{K_U \cdot R_K}{(R_{IK} \cdot R_{BI})}; E_{0,8} = \alpha_8 \cdot U_{B,0}; \alpha_8 = 1;$ $E_{0,11} = \alpha_9 \cdot U_{III, 0}; \alpha_9 = 1; E_{0,12} = \alpha_{10} \cdot U_{П0, 0}; \alpha_{10} = 1;$ $E_{9, 11} = E_{01}; E_{01} = E_{II}^+ - U_{ВИХ}^+ + \varphi_{T_3} \ln \left(\frac{I_{ВИХ}^+}{I_{T0}} \right);$ $E_{12,10} = E_{02}; E_{02} = -E_{II}^- - U_{ВИХ}^- + \varphi_{T_3} \ln \left(\frac{-I_{ВИХ}^-}{I_{T0}} \right);$

Продовження таблиці 6.3

1	2
Активні компоненти моделі	$P_1 = \alpha'_1 \cdot U_{\text{ПП, ПО}}; \alpha'_1 = J_{5, \text{ПО}}; P_2 = \alpha'_2 \cdot U_{\text{ПП, ПО}};$ $\alpha'_2 = I_{\text{РПП, ПО}} = \frac{U_{\text{ПП, ПО}}}{R_{\text{ПП, ПО}}};$ $P_3 = \begin{cases} \alpha'_3 \cdot U_{\text{ПП, В}}; \alpha'_3 = J_{\text{ПП, 0}}; \text{нри } \varphi_B > 0; \\ \alpha'_4 \cdot U_{\text{В, ПО}}; \alpha'_4 = J_{\text{О, ПО}}; \text{нри } \varphi_B < 0; \end{cases}$
Прийняті позначення	$R_K = \frac{1}{2\pi f_T C_K}; I_K = \frac{C_K V U_{\text{ВІХ}}}{2}; I_M = \frac{(2I_K \cdot K_U \cdot R_K)}{R_{B1}};$ $R_{B1} = R_{\text{ВІХНЧ}} - R_{\text{ВІХВЧ}}; R_{B2} = R_{\text{ВІХНЧ}}; R_{\text{ПК}} = 10^5 \text{ Ом}; R_B = 0,001 \text{ Ом};$ $I_{\text{ТО}} = 8 \cdot 10^{-16} \text{ А}; U_A = 200 \text{ В}$ $\beta_1 = \frac{I_K}{\left(I_{\text{ВХ}} + \frac{\Delta I_{\text{ВХ}}}{2} \right)}; \beta_2 = \frac{I_K}{\left(I_{\text{ВХ}} - \frac{\Delta I_{\text{ВХ}}}{2} \right)};$ $I_{T1} = I_{T0} \cdot \exp\left(\frac{U_{3M}}{\varphi_{T1}}\right); I_{T2} = I_{T0}; I_{T5} = I_{T0}; I_{T6} = I_{T0};$ $I_{T3} = \left(\frac{I_M - I_{\text{ВІХ}}^+ - I_{\text{ВІХ}}^+ \cdot R_{B2}}{R_{B1}} \right) \cdot \exp\left(-\frac{I_{\text{ВІХ}}^+ \cdot R_{B2}}{\varphi_{T3}}\right);$ $I_{T4} = \left(\frac{I_M + I_{\text{ВІХ}}^- + I_{\text{ВІХ}}^- \cdot R_{B2}}{R_{B1}} \right) \cdot \exp\left(\frac{I_{\text{ВІХ}}^- \cdot R_{B2}}{\varphi_{T3}}\right);$

Продовження таблиці 6.3

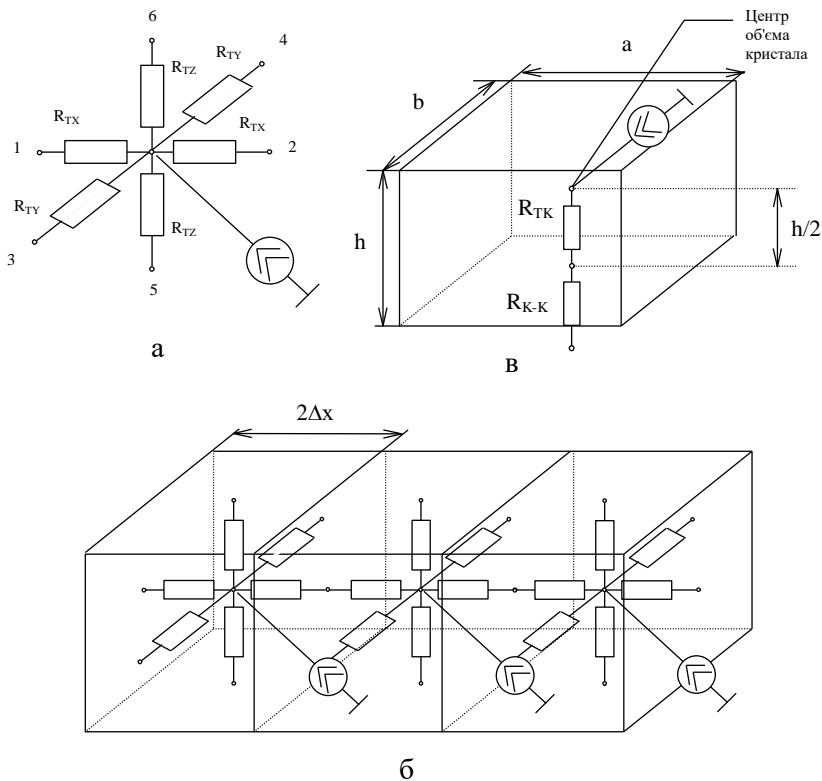
1	2
Вектор внутрішніх параметрів компонентів	$\bar{q} = \left[I_{ВХ}, U_{ЗМ}, V_{ВІХ}, U_{ВІХ}^-, U_{ВІХ}^+, I_{ВІХ}^-, I_{ВІХ}^+, R_{ВІХНЧ}, R_{ВІХВЧ}, K_U, K_{OC}, f_T, \Delta\Phi, C_K, E_{П}^-, E_{П}^+, P_{ДАО}, \alpha_B, \Phi_{T1}, \Phi_{T2}, \Phi_{T3}, R_{T1}, R_{T2}, R_{T3}, R_{T4}, R_{T5}, R_{TK-K} \right]$
Залежності внутрішніх параметрів компонентів від змінних моделі	$\Delta I_{ВХ} = \Delta I_{ВХ0} + k_{\Delta I_{ВХ}} (T_{П} - T_{П0});$ $U_{ЗМ} = U_{ЗМ0} + k_{U_{ЗМ}} (T_{П} - T_{П0}); \Phi_{T1} = \Phi_{T0} \left(\frac{T_{П1}}{T_{П0}} \right);$ $\Phi_{T2} = \Phi_{T0} \left(\frac{T_{П2}}{T_{П0}} \right); \Phi_{T3} = \Phi_{T0} \left(\frac{T_{П3}}{T_{П0}} \right);$
Вектор параметрів моделі елемента	$\bar{p} = \left[I_{ВХ}, \Delta I_{ВХ}, k_{\Delta I_{ВХ}}, U_{ЗМ0}, k_{U_{ЗМ}}, V_{УВІХ}, U_{ВІХ}^-, U_{ВІХ}^+, I_{ВІХ}^-, I_{ВІХ}^+, R_{ВІХНЧ}, R_{ВІХВЧ}, K_U, K_{OC}, f_T, \Delta\Phi, C_K, E_{П}^-, E_{П}^+, P_{ДАО}, \alpha_B, \Phi_{T0}, R_{T1}, R_{T2}, R_{T3}, R_{T4}, R_{T5}, R_{TK-K} \right]$

Таблиця 6.4 - Параметри моделі ОП

Параметр	Визначення	Од.вимір.
$I_{ВХ}$	Вхідний струм зміщення	А
$\Delta I_{ВХ}$	Різниця вхідних струмів	А
$K_{\Delta I_{ВХ}}$	Коефіцієнт температурного дрейфу різниці вхідних струмів	А/К
$U_{ЗМ}$	Напруга зміщення нуля вихідної напруги, приведена до входу	В
$K_{U_{ЗМ}}$	Коефіцієнт температурного дрейфу напруги зміщення нуля	В/К
$V_{УВІХ}$	Швидкість наростання вихідної напруги в позитивному напрямку	В/С
$U_{ВІХ}^-$	Максимальна вихідна напруга у від'ємному напрямку	В
$U_{ВІХ}^+$	Максимальна вихідна напруга в позитивному напрямку	В

Продовження таблиці 6.4

Параметр	Визначення	Од.вимір.
$I_{\text{вих}}^-$	Максимальний вихідний струм у від'ємному напрямку	А
$I_{\text{вих}}^+$	Максимальний вихідний струм в позитивному напрямку	А
$R_{\text{вих нч}}$	Вихідний опір на НЧ	Ом
$R_{\text{вих вч}}$	Вихідний опір на ВЧ	Ом
K_U	Коефіцієнт підсилення диференційного сигналу по напрузі на НЧ	Від.од
K_{OC}	Коефіцієнт послаблення синфазного сигналу	Від.од
f_T	Частота одиничного підсилення вихідного сигналу (гранична)	Гц
$\Delta\Phi$	Додатковий зсув фази вихідного сигналу на граничній частоті	Град
E_{Π}^-	Напруга джерела живлення від'ємної полярності	В
E_{Π}^+	Напруга джерела живлення позитивної полярності	В
$P_{\text{ДАО}}$	Теплова потужність розсіювання ОП при відсутності вхідного сигналу	Вт
α_U	Коефіцієнт керування джерела, що моделює зміну струму споживання ОП при зміні його вихідного струму	
$R_{\text{Тк-к}}$	Тепловий опір кристал-корпус	К/Вт
C_K	Ємність корекції	Ф
$R_{T1}, R_{T2}, R_{T3}, R_{T4} R_{T5}$	Теплові опори ділянок структури	К/Вт
φ_{T0}	Температурний потенціал при $T=T_0=298\text{K}$	В



а - узагальнена топологічна модель елементарного об'єму;

б - геометрія елементарного об'єму;

в - розбиття кристала на елементарні об'єми.

Рисунок 6.167 – Побудовання теплової частини КФТМ ОП

$$R_{x \text{ тп}} = \frac{\Delta X}{2\lambda b h}, \quad R_{Z \text{ тп}} = \frac{h}{2\lambda \Delta X b} \quad (6.30)$$

Параметр α_v визначається на основі залежності $I_c = f(I_{\text{вих}})$ як тангенс кута нахилу (зазвичай дорівнює 1,3...1,5). Всі інші первинні параметри вказуються безпосередньо в ТУ на елемент. За-

пропонований розрахунковий підхід дозволяє уникнути проведення експериментальних вимірювань, що дозволяє знизити вартість та трудомісткість визначення первинних параметрів моделей. Розроблені методики визначення параметрів КФТМ дозволяють з достатньою точністю розрахувати первинні параметри моделей та можуть бути легко програмно реалізовані.

6.6.5. Застосування інтервального аналізу для розрахунку допусків значень параметрів моделей

Як свідчить проведений аналіз вихідної інформації, що міститься в технічних умовах і конструкторсько-технологічній документації на прилади, часто наводяться дані в допустимих інтервалах (наприклад, глибина залягання р-п переходу, питомий опір ділянки напівпровідникової структури, допусків значення розмірів кристала, мінімальні, типові і максимальні значення параметрів, що містяться в ТУ на прилад і т.і.). Крім того, вхідні дані, що описують зовнішні впливи (наприклад, температура навколишнього середовища), зазвичай задаються в діапазоні значень.

Урахування конструктивних і технологічних допусків на елементи та їх параметри, а також допусків на величину зовнішніх впливів можливе шляхом застосування інтервального аналізу і завдання апіорної інформації у вигляді інтервальних чисел [55,56].

При цьому вхідна інформація для розрахунків задається у вигляді двох множин, перша з яких враховує геометричні, фізико-технологічні, електрофізичні параметри і дані ТУ:

$$X = \{x_1, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+m}\}, \quad (6.31)$$

де $x_i = [\underline{x}_i; \overline{x}_i]$ - параметри, які задаються у вигляді інтервалів, ($i = \overline{1, n}$);

\underline{x}_i і \overline{x}_i - нижня і верхня межі інтервалів;

x_{n+j} - параметри, які не мають інтервального вигляду, наприклад, фізичні константи або інші коефіцієнти, ($j = \overline{1, m}$).

Другу множину вихідних параметрів утворюють інтервальні елементи, які враховують зовнішні впливи:

$$Y = \{y_1, \dots, y_k\} \quad (6.32)$$

Тоді параметри моделей електронних приладів визначаються як множина

$$F = \{\alpha_1(X, Y), \dots, \alpha_p(X, Y)\} \quad (6.33)$$

де α_i - оператори, які встановлюють закон відповідності між елементами множин $F, X, Y, (i = \overline{1, p})$.

Задача розрахунку допусккових значень параметрів КФТМ елементної бази ЕЗ на основі підходу, викладеного в п.6.6.4 може бути вирішена з використанням інтервальної математики за умови розробки інтервальної бібліотеки, до складу якої входять інтервальні арифметичні операції:

$$\begin{aligned} & [\underline{a}; \overline{a}] * [\underline{b}; \overline{b}] = \\ & = \left[\min \{ \underline{a} * \underline{b}; \underline{a} * \overline{b}; \overline{a} * \underline{b}; \overline{a} * \overline{b} \}; \max \{ \underline{a} * \underline{b}; \underline{a} * \overline{b}; \overline{a} * \underline{b}; \overline{a} * \overline{b} \} \right], \end{aligned} \quad (6.34)$$

де $* \in \{ +, -, \cdot, / \}$ - арифметичні операції в інтервальній арифметиці.

Для операцій додавання і віднімання рівняння (6.34) записується у явному вигляді:

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = [\underline{\mathbf{a}} + \underline{\mathbf{b}}; \overline{\mathbf{a}} + \overline{\mathbf{b}}], \quad \mathbf{a} - \mathbf{b} = [\underline{\mathbf{a}} - \overline{\mathbf{b}}; \overline{\mathbf{a}} - \underline{\mathbf{b}}] \quad (6.35)$$

Крім арифметичних операцій при розрахунках параметрів КФТМ елементної бази ЕЗ необхідно виконувати розрахунки за допомогою показникових і логарифмічних функцій. Для інтервального розширення показникової функції пропонується використати співвідношення:

$$\mathbf{a}^{1/n} = \left[\underline{\mathbf{a}}^{1/n}; \overline{\mathbf{a}}^{1/n} \right], \quad n \in N, \quad (6.36)$$

при n -парному $\underline{\mathbf{a}} \geq 0$

При натуральних парних показниках степеня необхідно враховувати знак інтервалу:

$$\mathbf{a}^n = \begin{cases} \left[\underline{\mathbf{a}}^n; \overline{\mathbf{a}}^n \right] & \underline{\mathbf{a}} > 0 \\ \left[\overline{\mathbf{a}}^n; \underline{\mathbf{a}}^n \right] & \underline{\mathbf{a}} < 0 \\ \left[0; \max \{ \underline{\mathbf{a}}^n, \overline{\mathbf{a}}^n \} \right] & 0 \in \mathbf{a} \end{cases} \quad (6.37)$$

Непарним показникам степеня відповідає співвідношення (6.37) при $a > 0$.

Інтервальне розширення експоненційних і логарифмічних функцій має вид:

$$e^a = [e^{\underline{a}}; e^{\bar{a}}]; \quad \ln a = [\ln \underline{a}; \ln \bar{a}] \quad a > 0; \quad (6.38)$$

Таким чином, проблема побудови адекватної математичної моделі об'єкта може бути вирішена з використанням інтервальної математики, а інтервальна постановка задачі є найбільш інформативною, оскільки дає змогу виконати розрахунки не на основі усереднених даних, наслідком чого є отримання наближених значень параметрів, а одержати допускові значення первинних параметрів моделей [27].

6.7 Студентський інтегрований курсовий проєкт в середовищах Creo та Altium Designer

Об'єкт розробки – інформаційна технологія проєктування електронних засобів.

Мета курсового проєкту – інтегрована програмна підтримка процесу системного інженерного проєктування для підвищення ефективності виробництва та якості продукції.

Задачі курсового проєкту:

- аналіз особливостей сучасного процесу автоматизованого проєктування електронних засобів;
- вивчення структурних та функціональних можливостей САПР Creo та Altium Designer;
- розробка методики проєктування електронних засобів з застосуванням САПР Creo та Altium Designer;
- створення та дослідження віртуальної моделі проєктованого виробу в середовищах Creo та Altium Designer;
- вивчення особливостей програмування в середовищах Creo та Altium Designer;
- розробка математичного та програмного забезпечення для аналізу паразитних параметрів конструктивів електронних засобів;

- розробка математичного та програмного забезпечення для комплексного аналізу електричних та теплових процесів в конструктивах електронних засобів;
- програмна реалізація сервісних застосунків в середовищах Creo та Altium Designer;
- практичне застосування розробленого сервісного застосунка;
- розробка програмної документації.

Застосування розробленої інформаційної технології дозволить забезпечити єдину програмну підтримку всього циклу розробки, скоротити терміни проектування нових виробів, підвищити якість, надійність та конкурентоспроможність створюваної продукції.

6.8 Література до розділу

Особливості сучасного процесу автоматизованого проектування електронних засобів висвітлено в [14,22,33,47], базові прийоми роботи з системою Creo наведено в [7,34,40,46], принципи використання системи Altium Designer описані в [13,42,45]. Методика аналізу паразитних параметрів конструктивів електронних засобів запропонована в [38]. Розробка комплексної фізико-топологічної моделі операційного підсилювача представлена в [39]. Інтервальні методи призначення допусків описані в [27,55,56].

ЛІТЕРАТУРА

1. Arras, Peter. Course Pro Engineer Wildfire 5.0 Introduction to FEA-analysis. - Lessius, campus De Nayer, 2011. – 88 pp.
2. Arras, Peter. Introduction to CAM (Computer Aided Manufacturing). - Lessius, campus De Nayer 2011. - 23 pp.
3. Arras, Peter. Course BASIC MCAD. - Lessius, campus De Nayer 2011.- 276 pp.
4. Arras, Peter. Course MCAD Advanced. - Lessius, campus De Nayer, 2011. – 127 pp.
5. CAD Interoperability Today by Evan Yares, Senior Editor & Analyst, Software // Design World November 28, 2012 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.designworldonline.com/cad-interoperability-today/>
6. Cornelius, T. Leondes. COMPUTER AIDED AND INTEGRATED MANUFACTURING A 5-Volume Set. Volume 4: Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM). - World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003.- 302 pp.
7. Creo Parametric. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: . http://www.pro-technologies.ru/product/Creo_Parametric/.
8. Gopinath, Chintala. Trends in CAD/CAM/ To Capture Global Markets. - LAP Lambert Academic, 2011. – 208 pp.
9. Miltiadis, A. Boboulos. CAD-CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation. -Ventus Publishing ApS, 2003. - 174 pp.
10. Parkhomenko, A. Adaptation of P-CAD for the Enterprise's Tasks Solution / A. Parkhomenko, R. Kolosov // Proceedings of the International Conference «Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science TCSET'2004».- Lviv-Slavsko, 2004.- P.382
11. Shih, Randy H. Parametric Modeling with Creo Parametric 1.0 / Randy H. Shih. – SDC Publisher: Stepher Schroff, 2011. - 432 pp.
12. Shih, Randy H. Introduction to Finite Element Analysis Using Pro/MECHANICA Wildfire 5.0 / Randy H. Shih. – SDC Publisher: Stepher Schroff, 2011. - 431 pp.
13. Van Merode, Dirk. ECAD – Electronic Design and Production. - Lessius, campus De Nayer, 2011. - 88 pp.

14. Алексеев, О.В. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов / О.В. Алексеев, А.А. Головкин, И.Ю. Чавка, Г.Г. Пивоваров и др.; под. ред О.В. Алексеева. – М.: Высшая школа, 2000. - 480с.
15. Большаков, В.П. 3-D моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, Solid Works, Inventor, T-Flex / В.П. Большаков, А.Л. Бочков, А.А. Сергеев. - СПб.: Питер, 2010.-336 с.
16. Гореткина, Е. САПР и PLM в облаке: стоит ли овчинка выделки? PC Week/RE №34 (819) 11 декабря 2012 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.pcweek.ru/themes/detail.php?ID=144835>
17. Гореткина, Е. Настоящее и будущее рынка САПР PC Week Review: Технологии - 2011, январь 2011 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.pcweek.ru/themes/detail.php?ID=127669>
18. Дьяконов, В. Mathcad 2001: учебный курс./ В. Дьяконов. - СПб.: Питер, 2001.- 624с.
19. Жеков, К. САЕ-системы в XXI веке/ К. Жеков //САПР и графика.– 2000, №2 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.sapr.ru/archive.aspx>
20. Зубинский, А. Процесс системного инженерного проектирования и его программная поддержка / А. Зубинский // Компьютерное обозрение. – 2010, № 25.- С. 17-23.
21. Зубинский, А. Бесплатные билеты в мир CAD / А. Зубинский // Компьютерное обозрение. - 2010, № 25. - С. 24-26.
22. Кечиев, Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л. Н. Кечиев. - М.: Группа ИДТ, 2007. - 616 с.
23. Колодницький, М.М. Елементи теорії САПР складних систем: навчальний посібник / М.М. Колодницький.– Житомир: ЖІТІ, 1999. - 512с.
24. Кунву, Ли. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / Кунву Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.: ил.
25. Куракин М. Повышение производительности работы с САПР / М. Куракин // RM MAGAZINE. – 2008, №3.
26. Кугаевский, С. Что нового в организации САМ-систем / С. Кугаевский // САПР и графика. - 2009, № 1. - С. 72-73.

27. Кришук В.М., Пархоменко А.В., Шило Г.М. Застосування інтервального аналізу для розрахунків допускових значень параметрів моделей елементної бази МЕА // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник ДУ "Львівська політехніка" .- № 340.-Львів, 1997.- С.147-152.
- 28.Лозинський, А. Розв'язування задач електромеханіки в середовищах пакетів Mathcad і Matlab /Лозинський А., Мороз В., Паранчук Я. - Львів: Львівська політехніка, 2000.-166 с.
- 29.Лутова, Е. О роли САПР в комплексном решении задач технологической подготовки производства / Е. Лутова // САПР и графика. – 2011, № 7. – С.83-86
- 30.Маликов, М.А. САПР систем ТГВ: учебно-практическое пособие / М. А. Маликов. - Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 102 с.
- 31.Малюх, В.Н. Введение в современные САПР : курс лекций / В.Н. Малюх. - М. : ДМК Пресс, 2010. – 192 с. : ил.
- 32.Малюх, В. Энциклопедия PLM / В. Малюх, Д. Левин, Д. Ушаков. - Новосибирск: Азия, 2008. - 445 с.: ил.
- 33.Мироненко, И.Г. Автоматизированное проектирование узлов и блоков РЭС средствами современных САПР: учеб. для вузов / И.Г. Мироненко, В.Ю. Суходольский, К.К. Холуянов; под ред. И.Г. Мироненко. – М.: Высшая школа., 2002. – 391с.: ил.
- 34.Минеев, М. А. Pro/Engineer Wildfire 2.0/3.0/4.0: самоучитель (+ DVD-ROM) / М. А. Минеев. – М.: Наука и техника, 2008. – 352 с.
35. Назаров, Д. Обзор современных программ конечно-элементного анализа/Д. Назаров//САПР и графика.–2000, №2. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.sapr.ru/archive.aspx>
- 36.Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов / И.П. Норенков. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336с.: ил.
37. Облачное будущее корпоративных отделов ИТ «Открытые системы», № 05 , 2012 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2012/05/13016223/>
- 38.Пархоменко, А.В. Розробка математичного та програмного забезпечення аналізу паразитних параметрів конструктивів МЕА / А.В. Пархоменко //Комп'ютерні системи проектуван-

- ня. Теорія і практика.: Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. - 2001, № 415 , С.161-164.
39. Пархоменко, А.В. Розробка комплексної фізико-топологічної моделі операційного підсилювача / А.В. Пархоменко, В.М. Кришук // Радіоелектроніка та телекомунікації: Вісник Державного університету «Львівська політехніка».- 2000, № 387, С.204-211.
40. Разработка геометрических моделей и чертежей деталей на базе системы CAD/CAM Pro/Engineer. Часть 1. / под ред. В.А.Зубкова.- М.: МГИУ, 2008. - 216 с.
41. Романычева, Э.Т. Инженерная и компьютерная графика: учебник для вузов / Э.Т. Романычева, Т.Ю. Соколова, Г.Ф. Шандурина. - 2е изд. перераб. - М.: ДМК Пресс, 2001.-586 с.
42. Сабунин, А. Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств / А. Е. Сабунин. – М.: Солон-Пресс, 2009. - 432 с.
43. Семененко, М.Г. Математическое моделирование в Mathcad / М.Г. Семененко. - М.: Альтекс –А, 2003.-208 с.
44. Слюсаренко, А. Аппаратная поддержка проектирования в ANSYS / А. Слюсаренко, К. Шестопап // Компьютерное обозрение. - 2010, № 25. С. 27-29.
45. Суходольский, В. Ю. Altium Designer. Проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах / В. Ю Суходольский. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. - 480 с.
46. Степанов, Н. В. Pro/Engineer 2000i: курс пользователя/ Н. В. Степанов, А. А. Голованов. – М.: Компьютер Пресс, 2001. - 272 с.
47. Стешенко, В.Б. EDA. Практика автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств / В.Б. Стешенко. - М.: Нолидж, 2002. - 768 с.
48. Судов, Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели / Е.В. Судов. – М.: ООО Издательский дом «МВМ», 2003. – 264 с.
49. Судов, Е.В. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России. / Е.В. Судов, А.И. Левин. - М.: НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»,2002.-129 с.

50. Тимченко, А.А. Основы системного проектирования та системного аналізу складних об'єктів: Основы САПР та системного проектирования складних об'єктів: підручник / А.А. Тимченко; за ред. В.І. Бикова. - К.: Либідь, 2003. – 272 с.
51. Управление жизненным циклом продукции / А.Ф. Колчин, М.В. Овсяников, А.Ф. Стрекалов, С.В. Сумароков. – М.: Анахарсис, 2002. - 304 с.
52. Харченко, А.О. Станки с ЧПУ и оборудование гибких производственных систем: учебное пособие для студентов вузов / А.О. Харченко. - К.: ИД «Профессионал», 2004. - 304 с.
53. Центр измерительных технологий и промышленной автоматизации. Классификация систем САПР [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.automationlabs.ru/index.php/sw/135-2008-06-24-22-10-27>
54. Шалумов, А.С. Введение в CALS-технологии: учебное пособие. / А.С. Шалумов, С.И. Никишкин, В.Н. Носков. - Ковров: КГТА, 2002. - 137 с.
55. Шило, Г.Н. Расчет нормальных допусков с учетом отклонений коэффициентов внешних воздействий / Г.Н.Шило, Д.А.Коваленко, Н.П. Гапоненко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.- 2009.-№1.- С. 15-18.
56. Шило, Г.М. Призначення нормальних допусків методом відображень / Г.М. Шило, Д.А.Коваленко, М.П.Гапоненко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління.- 2008.- №1.-С.37-41.

АЛФАВІТНО-ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

Автоматизоване
 - виробництво 13, 14
 - проектування 7
 Агрегат 11
 Алгоритм 81
 Аналіз 106
 Анімація 172,182
 Апаратна платформа 19

Б

База даних 19
 База знань 37
 Бібліотека
 - посадочних місць 199
 - символів 199
 Блок
 - команд 61
 - управління верстатом 59
 Бульові операції 44

В

Верифікація 81
 Верстат з ЧПУ 58
 Відкритість 28
 Віртуальна інженерія 15
 Віртуальне
 - виробництво 16
 - проектування 16
 - прототипування 16
 Віртуальний
 - завод 16
 - прототип 206

Г

Геометричне моделювання
 11, 41

Д

Застосунок 30,85
 Друкована плата 98
 Друкований вузол 208

Ж

Життєвий цикл виробу 9

З

Замітання 44

І

Ідентифікатори команд 62
 Імітація
 -цифрова 15,17
 Інтеграція
 - етапів життєвого циклу
 11
 - програм 29, 46
 - систем 54
 Інтегрованість 28
 Інтерфейс 28

К

Категорії САПР 25
 Контролер ЧПУ 60
 Кресленик 89,156
 КФТМ 221

М

- Майстер-процес 37
- Масштабованість 91
- Метод
 - скінченних елементів 72
 - прямого конвертування 30
 - Андерсена 65
 - Ворденвебера 78
 - Джана та Лі 77
 - Кавендиша 77
 - Кікучі 77
 - Лі 77
 - Монте-Карло 200
 - непрямого конвертування 30
 - створення вузлів 77
 - Такера 77
 - Шимади 77
- Мобільність 28
- Мова
 - АРТ 63
 - EXPRESS 34
- Модель
 - декомпозиційна 48
- Модифікованість 28
- Мікррозбірка 207

О

- Об'ємне тіло 46
- Обмеження 49
- Обмін даними 86
- Обробка
 - даних 13
 - механічна 54, 96
- Оператори мови АРТ 63

П

- Параметризація
 - варіаційна 27
 - геометрична 27
 - ієрархічна 27
 - таблична 26
- Перетворення
 - даних 30
 - матриця 32
 - процесів 15
- Підхід
 - гібридний 21
 - комплексний 7
 - комп'ютеризований 62
 - прямий 90
 - хмарний 19
 - Чапеля 65
- Постпроцесор 32
- Представлення
 - воксельне 48
 - даних 31
 - комірчасте 49
 - октантного дерева 50
- Препроцесор 32, 58
- Програма
 - обробки деталі 59,61
 - оптимізації 7
- Проектування
 - конструкторське 80
 - системотехнічне 80
 - схемотехнічне 80
 - хмарне 18
- Прототип
 - віртуальний 11, 17
 - фізичний 16
- Профіль
 - системи 29

- спіралі 128

Р

Ребрендинг 88,97

Реінжиніринг 28, 95

Ресурси

- інтегровані 29

- інформаційні 34

- обчислювальні 21

Різноманіття 43

Розробка

- друкованої плати 98

- майстер-процесів 37

- математичного забезпечення 207

- програм 63

- прототипу 80

- соціальна 38

- стандартів 33

С

САПР

- категорії 25

- сучасний стан 25

Символ 31,62

Система

- автоматизованого проектування 25

- віртуального проектування 17

- геометричного моделювання 10

- гібридного моделювання 43

- каркасного моделювання 41

- координат 61

- «легкої ваги» 25

- поверхневого моделювання 42

- «середньої ваги» 25

- скінченно-елементного аналізу 67,68,69

- твердотільного моделювання 42

- «тяжкої ваги» 25

- ЧПУ 59

Сітка

- скінченних елементів 36,49,77,197

Складень 106,165

Стандарти обміну даними 30

Структура даних

- граничне представлення 47

- декомпозиційна модель 48

- конструктивна твердотільна геометрія 46

- крилових ребер 47

- напівребер 48

Схема

- функціональна 92

- блок-схема 92

- електрична принципова 92,199

- розміщення обладнання і процесів 92

- гідравлічних і пневматичних пристроїв 92

- опалення, вентиляції та кондиціонування 92

- ієрархічна 106

- управління 61

Т

Тенденції розвитку

- CAD/CAM/CAE 36,69

Технологічна

- відкритість 86

Технологія

- параметричного моделювання 27

- проектування 238

- CALS 14

Траєкторія

- руху інструмента 60

У

Управління

- виробничими лініями 16

- інженерними даними та проектами 86

- інформацією і процесами 91

- підприємством 13

- пряме 60

- розподілене 60

- створенням складаних одиниць 86

- технологічними процесами 13

- числове програмне 58

Ф

Файл

- графічний 90

- нейтральний 30

- CL 64

- MCD 64

- Gerber 98

Формат

- бінарний 31

- поблочної адресації 62

- пословної адресації 62

- табульований послідовний 62

- фіксований послідовний 62

- ASCII 31, 34

- DXF 32

- IGES 30

- Parasolid 56

- STEP 33

- STL 34

Функції

- створення примітивів 44

- віднімання та додавання об'єму 44

- замітання 44

- скінінга 44

- моделювання форми 45

- моделювання границь 45

- об'єктно-орієнтованого моделювання 45

- тонкого редагування 46

- контролерів 63

Х

Хмари

- приватні 20

- публічні 21

Ц

Цифрова
- імітація 17

Ч

Числове програмне управ-
ління 58

Е

Електронний засіб 80
Елемент
- геометричний 64
- конструктивний 10
- конструкторсько-
технологічний 58
- моделі 26
- побудови 27
- формату 31
- форм 45,56
Ескіз 112

А

API - Application Program
Interface 28
APT - Automatically
Programmed Tool 63

В

BOM - Bill of Material 86,
93
B-rep - Boundary
representation 47

С

CAD – Computer Aided
Design 12
CAE – Computer Aided
Engineering 12
CALs - Continuous
Acquisition and Life-Cycle
Support 14
CAM – Computer Aided
Manufacturing 12
CBD - Component Based
Development 29
CL - Cutter Location Data
File 64
CLU - control loop unit 58
CNC - Computer Numerical
Control 60
CPC - Collaborative Product
Commerce 14
CRM - Customer
Requirement Management
13
CSG - Constructive Solid
Geometry Representation 46
CSM - Component Supplier
Management 13

D

DDE - Dynamic Data Ex-
change - 29
DNC - direct/distributed
numerical control 60
DPU - data processing unit
57
DXF - Drawing Interchange
Format 32

E

ECAD - Electronic Design Automation 7, 94

EIA - Electronics Industries Association 29

ERP - Enterprise Resource Planning 13

F

FEA Finite Element Analysis 73

I

IGES - Initial Graphics Exchange Specification 30

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers 29

ISO - International Standard Organization 29

M

MCAD - Mechanical Design Automation 7

MCD - Machine Control Data 54

MCU - machine control unit 59

MES - Manufacturing Execution System 15

MRP 2 - Manufacturing Requirement Planning 15

N

NC - numerical control 60

O

ODBC - Open Data Based Connectivity 29

OLE - Object Linking and Embedding 29

P

Parasolid 54

PDM - Product Data Management 12

PLM - Product Lifecycle Management 16

S

SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition 15

SCM - Supply Chain Management 15

S&SM - Sales and Service Management 15

STEP - Standard for Exchange of Product Model Data 30

STL - Stereo Lithography 34

Wizards - 70

Навчальне видання

Пархоменко Анжеліка Володимирівна
Притула Анатолій Вікторович
Крищук Володимир Миколайович

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ
ЗАСОБІВ В СЕРЕДОВИЩАХ CREO ТА
ALTIUM DESIGNER

Навчальний посібник

Видання 3-тє, уточнене

Редактор Пархоменко А. В.
Дизайн обкладинки Андрєєв М. О.

Формат 60x84/16 (A5).
Папір офсетний, 80г/м. кв.
Друк цифровий, 1+1.
Підписано до друку 07.12.2020. Ум. друк. арк. 14,65.
Тираж 100 прим. Зам. № 801.

Видавець О. О. Євенок
м. Житомир, вул. М. Бердичівська, 17А
тел.: 063 101 22 33

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції України
серія ДК№ 3544 від 05.08.2009 р.

Друк та палітурні роботи ФОП О. О. Євенок
10014, м. Житомир, вул. М. Бердичівська, 17А
тел.: 063 101 22 33, e-mail: printinzt@gmail.com