

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет комп'ютерних наук та технологій
Кафедра комп'ютерних систем та мереж

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему **ПІДСИСТЕМА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
ЕНДОПРОТЕЗУ КУЛЬШОВОГО СУГЛОБУ**

Виконав: студент 2 курсу, групи КНТ-612м
спеціальності

123 Комп'ютерна інженерія

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Спеціалізовані комп'ютерні системи

ВІНЧЕНКО Д. І.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ГОЛУБ Т.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ЄФИМЕНКО М.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Комп'ютерних наук і технологій
Кафедра «Комп'ютерні системи та мережі»
Ступінь вищої освіти магістерський
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) «Спеціалізовані комп'ютерні системи»
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Кудерметов Р.К.

“24” жовтня 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

ВІНІЧЕНКА Дмитра Ігоровича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Підсистема комп'ютерного моделювання ендопротезу кульшового суглобу

керівник проєкту (роботи) к. т. н., доцент, ГОЛУБ Тетяна Василівна

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “24” жовтня 2023 року №
400

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) підсистема комп'ютерного моделювання SolidWorks, 3D-моделювання, ендопротез кульшового суглобу,

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз технічного завдання та робота з джерелами інформації;

2) Аналітичний огляд. Аналіз найбільш поширених системи комп'ютерного моделювання та їх основні риси;

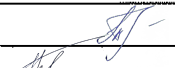
3) Розробка ендопротезу кульшового суглобу за допомогою CAD-системи SolidWorks ;

4) Моделювання роботи ендопротеза кульшового суглоба в умовах експлуатації за допомогою SolidWorks ;

5) Висновки

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

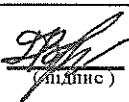
6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	ГОЛУБ Т. В., доцент		
нормоконтроль	ЩЕРБАК Н.В., ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 01.10.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз технічного завдання та робота з джерелами інформації	10.10.2023 р.	
2	Опис актуальності даної роботи .	13.10.2023 р.	
3	Формування мети та завдання курсової роботи	16.10.2023 р.	
4	Аналітичний огляд сучасних системи комп'ютерного моделювання	25.10.2023 р.	
5	Розробка ендопротезу кульшового суглобу (ніжки) в CAD- системі Solid Works.	10.11.2023 р.	
6	Моделювання роботи ендопротезу кульшового суглобу (ніжки) в умовах експлуатації.	17.11.2023 р.	
7	Оформлення отриманих результатів у ПЗ	25.11.2023 р.	
8	Оформлення графічного матеріалу	01.12.2023 р.	
9	Оформлення допоміжного матеріалу	05.12.2023 р.	

Студент  Дмитро ВІНІЧЕНКО
(підпис) (ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)  Тетяна ГОЛУБ
(підпис) (ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 82с., 63 рис., 2 табл., 27 послань.

CAD-СИСТЕМА , SOLIDWORKS, КУЛЬШОВИЙ СУГЛОБ, ПРОЄКТУВАННЯ, РОЗРОБКА, СИСТЕМА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Об'єкт дослідження – комп'ютерна розробка і моделювання ендопротезів.

Предметом дослідження є системи комп'ютерного моделювання, які можна використовувати як підсистеми для проєктування ендопротезів.

Мета роботи – розробка ендопротезу кульшового суглобу з використанням підсистеми комп'ютерного моделювання.

У процесі написання магістерської роботи було вирішено такі завдання:

- за даними науково-методичної літератури розглянуто різні системи комп'ютерного моделювання, їх основні риси, переваги та недоліки;
- обрано найбільш підходящу систему для розробки та проєктування ендопротезу.
- показано принципи використання обраної системи на прикладі розробки ендопротезу кульшового суглобу;
- показано можливості використання обраної системи на прикладі моделювання роботи ендопротезу кульшового суглобу в умовах експлуатації.

Перший розділ магістерської роботи являє собою аналітичний огляд систем комп'ютерного моделювання.

У другому розділі представлена обрана система комп'ютерного моделювання - SolidWorks. Описані його функції та можливості, та безпосередньо представлена розробка ендопротезу кульшового суглобу за допомогою SolidWorks.

У третьому розділі представлено можливості SolidWorks при моделюванні роботи ендопротезу кульшового суглобу в умовах експлуатації.

ABSTRACT

Software: 82s., 63 Fig., 2 tables., 27 messages.

CAD-SYSTEM, COMPUTER SIMULATION SYSTEM, DEVELOPMENT, HIP JOINT, PROJECTION, SOLIDWORKS.

The object of study is computer development and modeling of endoprostheses.

The subject of the research is computer simulation systems that can be used as a subsystem to projection of endoprosthesis.

The purpose of the work is to develop a hip joint with a computer simulation subsystem.

In the process of writing a master's work, the following tasks were solved:

- according to scientific and methodological literature, different systems of computer modeling, their main features, advantages and disadvantages are considered;
- the most suitable system for the development and projection of endoprosthesis is chosen.
- the principles of using the chosen system on the example of the development of the leg of the hip joint endoprosthesis are shown;
- the possibilities of using the chosen system on the example of modeling the work of hip joint in operating conditions are shown.

The first chapter of the master's work is an analytical review of computer modeling systems .

The second section presents the selected computer simulation system - Solidworks. Its functions and capabilities are described, and the development of hip joint (legs) using Solidworks is directly presented.

The third chapter presents the possibilities of Solidworks in simulation of work endoprosthesis the hip joint in operating conditions.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Аналітичний огляд. Аналіз найбільш поширених систем комп'ютерного моделювання та їх особливі риси.....	10
1.1 Види сучасних систем комп'ютерного моделювання для використання в медичній сфері.....	11
1.2 Найбільш поширені CAD-системи	12
1.2.1 Fusiot 360.....	12
1.2.2 SolidEdge	13
1.2.3 AutoCAD.....	14
1.2.4 SolidWorks	14
1.2.5 NX.....	15
1.2.6 CATIA.....	16
1.2.7 Autodesk Inventor.....	16
1.2.8 Creo.....	17
1.2.9 Rhinoceros.....	18
1.2.10 BricsCAD.....	19
1.2.11 Onshepe.....	20
1.2.12 FreeCAD.....	22
1.3 Вибір оптимальної системи для проєктування ендопротезу кульшового суглобу	25
2 Розробка ендопротезу кульшового суглобу за допомогою CAD-системи SolidWorks	25
2.1 Основні відомості про SOLIDWORKS. Історія розвитку та призначення SolidWorks	26
2.2 Програмні продукти SolidWorks	28

2.3 SolidWorks Professional 2012.....	28
2.4. Підбір параметрів для розробки ендопротезу кульшового суглоба.....	31
2.5.Проектування ніжки.....	35
2.6.Проектування головки сферичної.....	47
2.7.Проектування чашки півсферичної.....	51
2.8.Проектування вкладки.....	55
2.9.Моделювання збірки ендопротезу кульшового суглобу.....	57
3 Моделювання роботи ендопротеза кульшового суглоба в умовах експлуатації за допомогою SolidWorks	64
3.1 Виконання розрахунку запасу міцності.....	64
3.2 Порівняння міцності розроблювального ендопротезу з ендопротезами «ІТО- Мотор Січ» розробленими раніше.....	68
3.3 Перевірка діапазону кутових рухів між стегновим і вертлюжним компонентами.....	70
3.4. Визначення масових характеристик деталей	74
3.5. PhotoView 360	76
Висновки.....	79
Перелік джерел посилання.....	80

ВСТУП

Розвиток цивілізації спричинив значне подовження життя людини. Основні проблеми виникають зі старінням населення та зміною способу життя людини. Деякі з них - це різноманітні дефекти та дегенеративні захворювання кісткової системи людини. Кульшовий суглоб є одним з тих елементів, що швидко виходять з ладу. Малорухливий спосіб життя та низька фізична активність погіршать цю ситуацію в майбутньому. Медицина здатна протягом тривалого часу допомагати пацієнтам з дегенерацією кульшового суглоба за допомогою штучного протезування [1].

Метод ендопротезування суглобів є одним із найкращих варіантів оперативного лікування опорно-рухового апарату у пацієнтів. Головна мета цієї операції полягає у заміні патологічно змінених структур суглоба на штучний ендопротез, що має анатомічну форму здорового суглоба та забезпечує можливість виконання повноцінного обсягу рухів. У багатьох випадках заміна ураженого суглоба є останньою надією для пацієнта на відновлення повноцінного функціонування опорно-рухового апарату та у деяких випадках, на продовження життя в цілому (наприклад, при онкологічних ураженнях суглобів) [2].

На допомогу приходить також інженерія механіки та матеріалів. Зараз ведуться дуже інтенсивні дослідження нових матеріалів і конструкцій імплантатів. Сучасна інженерія і біомеханіка намагаються розробити форму протеза, максимально наближену до форми кістковомозкової порожнини. Це дозволить рівномірно розподілити напругу в протезі, узгодивши його з природною формою кістковомозкової порожнини [1].

Для якісного створення ендопротезу першочерговим є розробка його 3D-моделі. Швидкість та якість такого моделювання безпосередньо пов'язана з CAD-системою, яка буде виступати в ролі підсистеми його проєктування.

CAD-системи мають значний вплив на моделювання ендопротезів кульшового суглоба і призначені для полегшення процесу розробки та

виробництва таких пристроїв. Користь від використання CAD-систем наступна: можливість створювати точні та прецизійні 3D-моделі ендопротезів; прискорення процесу розробки, а саме можливість швидко створювати, модифікувати та аналізувати різні варіанти дизайну ендопротезу; проведення віртуальних тестів та аналізів, що допомагає інженерам оптимізувати форму та функції ендопротезу для забезпечення максимальної ефективності та зручності використання; автоматизація процесу виробництва завдяки легкій інтеграції з технологіями CAM-систем; можливість імітації рухів та функцій суглобу, що допомагає визначити, наскільки добре ендопротез взаємодіє з навколишніми тканинами та оптимізує фізичні властивості протезу; ефективна комунікація між різними учасниками проєкту, включаючи інженерів, лікарів та виробників.

Дана робота спрямована на вибір оптимальної CAD-системи в якості підсистеми комп'ютерного моделювання для розробки і проєктування ендопротезів.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД. АНАЛІЗ НАЙБІЛЬШ ПОШИРЕНИХ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇХ ОСОБЛИВІ РИСИ

За світовою статистикою, річна потреба в ендопротезуванні суглобів складає від 500 до 1000 випадків на кожен мільйон населення. У розвинених країнах Європи ця цифра ще вища. Проте в Україні проводять у 10 разів менше операцій, ніж необхідно [2-3]. Це пов'язано з відсутністю якісних вітчизняних ендопротезів. Важливість ендопротезування суглобів в Україні набуває особливого значення в контексті бойових дій та отриманих поранень воїнів та мирних громадян.

CAD - системи є досить поширеними і використовуються для створення різноманітних деталей та складних механізмів, включаючи ендопротези. Вони надають інженерам-конструкторам зручні інструменти для створення, модифікації, аналізу та оптимізації деталей та конструкцій, що зменшує кількість етапів розробки та поліпшує якість виробів.

CAD - системи дозволяють виробляти точні 3D-моделі ендопротезів, з яких можна виготовляти прототипи та зразки методами 3D-друку або фрезерування. Крім того, ці системи дозволяють проводити віртуальне тестування ендопротезів, що зменшує кількість потрібних фізичних тестів та поліпшує їхню ефективність.

Враховуючи широкий спектр функцій, які надають CAD - системи, їх використання може бути досить складним для новачків. Однак, з достатньою практикою та підготовкою, інженери-конструктори можуть ефективно використовувати ці інструменти для розробки та вдосконалення ендопротезів.

1.1 Види сучасних систем комп'ютерного моделювання для використання в медичній сфері

Для проєктування та аналізу ендопротезів у медичній сфері часто використовуються різні системи комп'ютерного моделювання. Деякі з них включають:

- системи автоматизованого проєктування (САПР) (CAD, Computer-Aided Design): CAD -системи дозволяють інженерам створювати 3D-моделі ендопротезів, враховуючи їх геометричні особливості та параметри. Це допомагає візуалізувати дизайн та структуру протезів;

- аналіз кінцевих елементів (Finite Element Analysis, FEA): метод кінцевих елементів дозволяє аналізувати механічну поведінку ендопротезів в різних умовах навантаження, включаючи сили та деформації, які виникають при русі;

- комп'ютерна динаміка рідин (Computational Fluid Dynamics, CFD): моделювання CFD використовується для аналізу потоків рідини або газу в межах ендопротезів, таких як штучні судини або клапани, з метою оптимізації їх дизайну;

- моделювання біосумісності: для аналізу взаємодії матеріалів ендопротезів з біологічними тканинами, що допомагає запобігти відторгненню та алергічним реакціям;

- системи віртуальної реальності: VR-технології можуть використовуватися для створення віртуальних середовищ, де спеціалісти і хірурги можуть візуалізувати та аналізувати протези та їх взаємодію з людським тілом;

- системи анімації та симуляції рухів: дозволяють аналізувати, як ендопротези реагують на рухи та навантаження при різних сценаріях.

1.2 Найбільш поширені CAD-системи

На сьогоднішній день існує багато CAD-систем, які використовуються в різних галузях промисловості, в тому числі і медичній галузі, для проектування та моделювання. Найбільш поширеними CAD-системи є наступні: Fusion 360, SolidEdge, AutoCAD, SolidWorks, NX, CATIA, Autodesk Inventor, Creo, Rhinoceros (Rhino), BricsCAD, Onshape, FreeCAD. Ці CAD-системи відрізняються своїми можливостями та підходами, і вибір конкретної системи залежить від потреб конкретного проекту чи галузі. Далі більш детально розглянемо кожен із представлених CAD-систем.

1.2.1 Fusion 360

Fusion 360 - це хмарна система автоматизованого проектування, розроблена компанією Autodesk [4]. Система може виконувати широкий спектр завдань, таких як 2D-та 3D-моделювання, робота з збірками, обчислення та оптимізація. Основні особливості включають сучасний інтерфейс користувача, покращені інструменти збірки, автономний режим, доступну цінову політику, можливості симуляції, 3D друк та вбудовану підтримку комп'ютерної підтримки виробництва (CAM).

Таким чином, Fusion 360 наступні переваги:

- є можливість працювати над проектами з будь-якого місця з доступом до інтернету;
- має великий функціонал: багато інструментів для вирішення різних задач, таких як моделювання в 2D та 3D, складання, обчислення та оптимізація;
- програма має вбудовані інструменти оптимізації для зменшення часу на вирішення задач;
- дозволяє проводити імітацію різних процесів, що відбуваються в системі;
- дозволяє автоматизувати процеси створення деталей;
- простий і зручний для використання модерний інтерфейс;

- наявність різноманітних тарифних планів з різними можливостями, в залежності від потреб користувача.

Недоліками Fusion 360 при цьому є:

- залежність від Інтернету, оскільки може бути проблемою для тих, хто не має постійного доступу до Інтернету;
- відсутність можливості використання програми безкоштовно: Fusion 360 пропонує пробний період, але після його закінчення, користувач повинен купити підписку на програму;
- багато функцій програми можуть бути складними для новачків.

Не підходить для деяких галузей - Fusion 360 не є ідеальним рішенням для всіх галузей та видів дизайну, зокрема для дизайну електронних пристроїв та програмного забезпечення.

1.2.2 SolidEdge

SolidEdge - система моделювання твердих та поверхневих тіл, розроблена компанією Siemens PLM Software [5]. Серед її переваг можна відзначити параметричне, синхронне та комбіноване середовище моделювання, інструменти для креслення згідно з європейськими стандартами, можливість розробляти литі деталі та обладнання для їхнього виробництва, 3D друк, кінематичний аналіз механізмів та бібліотеку стандартних виробів.

Переваги SolidEdge включають:

- параметричне, синхронне та комбіноване середовище моделювання, яке дозволяє швидко та зручно створювати моделі будь-якої складності;
- інструменти для створення креслень відповідно до європейських стандартів;
- можливість розробляти відливки та обладнання для їх виготовлення;
- 3D-друк;
- кінематичний аналіз механізмів;
- бібліотека стандартних продуктів.

Недоліки SolidEdge:

- в порівнянні з іншими CAD-системами він може бути менш зручним у використанні;
- він не має такої популярності, як, наприклад, AutoCAD чи SolidWorks, що може змінювати динаміку ринку робочих місць;
- він може бути менш підходящим для розробки деяких типів проєктів, порівняно з іншими CAD-системами.

1.2.3 AutoCAD

AutoCAD, розроблений та постачається компанією Autodesk, є популярною системою CAD з найбільшим попитом у світі [6]. Він дозволяє проєктувати в середовищах 2D та 3D, створювати та формувати проєктні документи та інше. AutoCAD не має конкретної спрямованості на певну галузь дизайну, тому використовується для розробки будівництва, механічної інженерії, науково-дослідних проєктів та іншого. Основні особливості включають стандартну систему CAD, гнучкий інтерфейс та інструменти, можливість створювати програми з використанням вбудованих мов (AutoLISP тощо) та API, а також має велику кількість додатків від сторонніх розробників.

1.2.4 SolidWorks

SolidWorks - це популярний пакет програмного забезпечення для комп'ютерної проєктування (CAD), розроблений компанією Dassault Systèmes[7]. Він використовується для проєктування, моделювання та підготовки продуктів до виробництва. SolidWorks пропонує широкий спектр функцій та інструментів для 2D та 3D моделювання, креслення, моделювання, рендерингу, анімації та багатьох інших. Це програмне забезпечення широко використовується у галузях, таких як машинобудування, авіаційна та автомобільна промисловість, виробництво споживчих товарів та промисловий дизайн. Переваги SolidWorks:

- досягнення високої продуктивності та ефективності проєктування завдяки розширеній функціональності, такі як велика бібліотека стандартних елементів, шаблони проєктів, автоматизація процесів і багато іншого;
- широкий спектр інструментів для 2D та 3D моделювання та редагування, а також інструментів для аналізу та імітації різних умов;

- зручний інтерфейс та можливості налаштування під конкретні потреби користувачів;
- легка інтеграція з іншими системами проєктування та програмним забезпеченням для управління даними проєктів;
- підтримка різних форматів файлів для імпорту та експорту.

Недоліки SolidWorks:

- висока вартість ліцензій та обладнання для користувачів;
- потребує значних ресурсів комп'ютера, що може вимагати оновлення апаратної частини;
- обмежені можливості для користувачів веб-версії SolidWorks;
- потребує певного рівня знань та навичок для використання всіх функцій та можливостей системи;
- можливість виникнення проблем з сумісністю при імпорті та експорті файлів з іншими системами проєктування.

1.2.5 NX

NX є потужним інтегрованим пакетом програмного забезпечення для машинобудування, розробки продуктів і виробництва, розроблений компанією Siemens PLM Software [8]. Ось кілька ключових переваг NX:

- має широкий набір інструментів для 2D і 3D моделювання, включаючи розробку поверхонь, пластичних деталей і інструментів для генерації моделей складних форм;
- має потужні інструменти для аналізу та моделювання, що дозволяє інженерам виконувати технічний аналіз і оптимізацію проєктів на ранніх етапах розробки;
- забезпечує зручне керування даними, включаючи зберігання, організацію і обмін файлами з іншими системами CAD;
- дозволяє кільком інженерам працювати над проєктами одночасно, зберігаючи всі зміни в реальному часі і спільно використовуючи всі ресурси;
- має інструменти для моделювання систем керування, електронних і механічних систем з метою підвищення ефективності і точності розробки;

- включає потужний САМ-модуль, що дозволяє створювати і оптимізовувати траєкторії різання, забезпечує зручний інтерфейс для програмування верстатів і станків з ЧПУ;
- має потужну архітектуру, що дозволяє ефективно використовувати ресурси комп'ютера, зменшуючи час, необхідний для виконання завдань.

1.2.6 CATIA

CATIA (Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application) - це потужний комп'ютерний програмний пакет для проєктування, розробки та виробництва продуктів в різних галузях промисловості. CATIA створена французькою компанією Dassault Systemes і використовується в галузях, таких як авіація, автомобілебудування, виробництво промислового устаткування та інших [9].

Деякі з основних особливостей CATIA:

- пропонує повний набір інструментів для моделювання в 3D, що дозволяє користувачам створювати детальні моделі високої якості;
- надає інтегроване робоче середовище, яке дозволяє користувачам працювати з моделями з більшою ефективністю і точністю;
- має широкий набір інструментів для різних задач, таких як моделювання, креслення, монтаж, аналіз, візуалізація та ін;
- має можливості співпраці, що дозволяють користувачам спільно працювати над проєктом, обмінюватися даними та виконувати інші завдання в режимі реального часу;
- має велику групу розробників та користувачів, які надають міцну підтримку і допомогу вирішенню проблем.

1.2.7 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor є потужним програмним забезпеченням для комп'ютерного проєктування (CAD), яке використовується для проєктування, моделювання та розробки продуктів у різних галузях, таких як машинобудування, аерокосмічна промисловість, автомобільна промисловість та інші[10].

Основні особливості Autodesk Inventor:

- надає комплексні можливості для 3D-моделювання, малювання, рендерингу та анімації;
- інструменти внутрішнього програмування, або API, дозволяють користувачам розширювати можливості програми та адаптувати її до своїх потреб;
- інтуїтивний інтерфейс та інструменти навігації допомагають користувачам швидко навчитися використовувати програму;
- дозволяє автоматизувати рутинні завдання та процеси, що дозволяє економити час та зусилля;
- підтримує широкий спектр файлових форматів, що дозволяє легко обмінюватися даними з іншими програмами та користувачами;
- моделювання деталей дозволяють виконувати різноманітні завдання, такі як розробка механізмів та інженерних систем;
- надає засоби для розробки складних збірок, з можливістю створення змінних та залежностей між деталями;
- інструменти Autodesk Inventor дозволяють розробляти та аналізувати конструкції з метою визначення оптимального варіанту.

1.2.8 Creo

Creo (раніше відомий як Pro/Engineer) є популярним програмним забезпеченням для проектування та розробки продуктів, що дозволяє інженерам створювати складні деталі та збірки з високою точністю та ефективністю [11]. Деякі з особливостей Creo включають наступне:

- має можливість створювати моделі в реальному часі, що дозволяє інженерам відразу бачити результати своєї роботи;
- дозволяє інженерам працювати з декількома дисциплінами, такими як механіка, електрика та електроніка, щоб створювати інноваційні продукти;
- має широкі можливості моделювання, включаючи 3D-моделювання; поверхневе моделювання, а також можливості створення асамблеїв і збірок;
- інтегрується з іншими програмами, такими як Mathcad, Windchill і Arbortext, що дозволяє інженерам працювати з даними з різних джерел;

- має можливість автоматизувати процеси проєктування і зменшити час на підготовку до виробництва;
- має інтуїтивний і легкий у використанні інтерфейс, що дозволяє інженерам швидко навчитися програмі та виконувати завдання ефективно.

У версії Creo 7.0 реалізовані революційні інновації в областях генеративного дизайну, проєктування багатомодульних систем, адитивного виробництва і симуляції.

1.2.9 Rhinoceros

Rhinoceros, або Rhino, є популярною системою комп'ютерного моделювання (CAD) та 3D-моделювання, яка широко використовується в різних галузях, включаючи архітектуру, дизайн, машинобудування, графіку і багато інших [12]. Ось деякі з основних рис, переваг і недоліків Rhino:

Основні риси Rhino:

- 3D-моделювання: Rhino спеціалізується на 3D-моделюванні і надає потужні інструменти для створення складних тривимірних об'єктів і асамблеїв;
- гнучкість і розширюваність: Rhino має розширювану архітектуру і дозволяє використовувати різноманітні плагіни та розширення для різних галузей та завдань;
- імпорт і експорт файлів: Rhino підтримує багато форматів файлів, що дозволяє легко обмінюватися даними з іншими системами CAD і програмами;
- підтримка точкового обліку: Rhino має потужні інструменти для точкового обліку і створення об'ємних точкових хмар для сканування об'єктів;
- графіка і рендерінг: Rhino включає інструменти для створення реалістичних рендерінгів та візуалізації проєктів.

Переваги Rhino:

- гнучкість і розширюваність: Rhino дозволяє користувачам вибирати та налаштовувати інструменти, що робить його відмінним для різних видів проєктів;
- велика спільнота користувачів і підтримка: Rhino має велику та активну спільноту користувачів і надає доступ до документації та підтримки;

- інтеграція з іншими програмами: Rhino може легко інтегруватися з іншими програмами, включаючи програми для рендерінгу та аналізу.

Недоліки Rhino:

- вивчення інтерфейсу: Інтерфейс Rhino може бути менш інтуїтивним для новачків, і вивчення може вимагати часу;
- вартість: Rhino є комерційною системою CAD і коштує гроші. Однак доступні є студентські та навчальні ліцензії;
- більшість плагінів - платні: Деякі плагіни для Rhino можуть бути платними, що збільшує загальні витрати.

Rhino - це потужна система CAD для 3D-моделювання та інженерного проектування, яка добре підходить для проєктів з високим ступенем складності та гнучкості. Вибір Rhino буде залежати від ваших потреб і бюджету.

1.2.10 BricsCAD

BricsCAD: Ця система CAD надає можливості 2D та 3D-моделювання та широко використовується в архітектурі, будівництві та машинобудуванні [13]. BricsCAD - це система автоматизованого проектування (CAD), яка надає інженерам та проєктувальникам інструменти для створення 2D і 3D-моделей. Основні риси BricsCAD, а також її переваги і недоліки, включають наступне:

Основні риси BricsCAD:

- можливість 2D і 3D-моделювання: BricsCAD підтримує як 2D-моделювання для креслень, так і 3D-моделювання для створення тривимірних об'єктів і асамблей;
- сумісність з форматом DWG: BricsCAD повністю сумісний з форматом DWG, що робить його ідеальним варіантом для користувачів AutoCAD, оскільки вони можуть легко імпортувати і експортувати файли DWG;
- широкий спектр розширень: BricsCAD підтримує додатки і розширення, які роблять його додатковою функціональністю для конкретних завдань;
- сучасний інтерфейс: BricsCAD має сучасний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який допомагає користувачам швидко оволодіти системою;

- сприяння багатьом галузям: BricsCAD може використовуватися в різних галузях, включаючи архітектуру, інженерію, будівництво, геодезію, машинобудування і інше.

Переваги BricsCAD:

- вартість: BricsCAD зазвичай коштує значно менше, ніж AutoCAD, що робить його привабливим варіантом для бюджетносвідомих користувачів;
- сумісність з DWG: Можливість імпорту і експорту файлів DWG дозволяє безперервно співпрацювати з користувачами AutoCAD;
- розширені можливості: BricsCAD пропонує розширені можливості для 3D-моделювання, мінливості і архітектурного проєктування;
- активна спільнота користувачів: Bricsys, компанія, яка розробляє BricsCAD, має активну спільноту користувачів і забезпечує оновлення та підтримку.

Недоліки BricsCAD:

- менший ринковий вплив: Більшість користувачів в індустрії CAD використовує AutoCAD, тому може бути обмежена можливість обміну файлами та інтеграції з іншими системами;
- обмежена кількість додатків і розширень: Хоча BricsCAD підтримує додатки, їх кількість може бути меншою в порівнянні з AutoCAD;
- можливі відмінності в інтерфейсі: Деякі користувачі можуть відчувати відмінності в інтерфейсі BricsCAD порівняно з AutoCAD і потребувати часу, щоб адаптуватися.

Обираючи CAD-систему, важливо розглядати свої потреби, бюджет та конкретні завдання проєкту. BricsCAD - це конкурентоздатна система CAD з багатьма перевагами, і вона може бути ідеальним вибором для багатьох користувачів.

1.2.11 Onshape

Onshape - це хмарна платформа для комп'ютерного моделювання (CAD) і спільної роботи над проєктами, яка пропонує ряд основних рис, переваг і недоліків [14]. Ось деякі з них:

Основні риси Onshape:

- хмарна платформа: Onshape базується в хмарі, що означає, що користувачі можуть отримувати доступ до своїх проєктів з будь-якого пристрою з підключенням до Інтернету, що спрощує спільну роботу та забезпечує можливість працювати над проєктами в реальному часі;
- спільна робота: Onshape надає зручні інструменти для спільної роботи над проєктами. Кілька користувачів можуть одночасно працювати над тим самим проєктом, редагуючи та переглядаючи його;
- 3D-моделювання: Платформа надає розширені можливості для 3D-моделювання, включаючи створення складних тривимірних об'єктів та асамблей;
- інтеграція з іншими інструментами: Onshape підтримує інтеграцію з іншими програмами і сервісами, такими як PDM (Product Data Management), ERP (Enterprise Resource Planning) і багато інших;
- автоматичні оновлення: Платформа автоматично оновлюється, тому користувачам не потрібно встановлювати або поновлювати програмне забезпечення.

Переваги Onshape:

- доступність: Завдяки хмарному розташуванню, Onshape доступна з будь-якого пристрою, що має підключення до Інтернету;
- спільна робота в реальному часі: Користувачі можуть спільно працювати над проєктами в реальному часі, що спрощує комунікацію та спільну роботу;
- спрощена управління версіями: Onshape автоматично веде облік версій проєкту, що спрощує керування версіями та відстеження змін;
- автоматичні резервні копії і забезпечення безпеки: Дані в Onshape зазвичай зберігаються в хмарі з регулярними автоматичними резервними копіями та заходами безпеки.

Недоліки Onshape:

- залежність від інтернет-з'єднання: Як хмарна платформа, Onshape вимагає постійного доступу до Інтернету, що може бути обмеженням для користувачів без стабільного з'єднання;

- вартість: Вартість використання Onshape може бути вищою порівняно з деякими іншими системами CAD;

- сумісність з іншими програмами: В залежності від специфіки проєкту і інших програм, може виникнути обмеження в інтеграції з іншими програмами.

Onshape - це потужна хмарна CAD-платформа, яка має свої переваги і недоліки. Вибір Onshape буде залежати від ваших потреб та специфіки проєкту.

1.2.12 FreeCAD

FreeCAD - це безкоштовна та відкрита система комп'ютерного моделювання (CAD) для 3D-моделювання і інженерного проєктування [15]. Ось деякі з основних рис, переваг і недоліків FreeCAD:

Основні риси FreeCAD:

- відкритий джерела коду: FreeCAD розповсюджується під ліцензією GNU Lesser General Public License (LGPL) і має відкритий вихідний код. Це дозволяє користувачам модифікувати і розширювати програму за власними потребами;

- 3D-моделювання: FreeCAD спеціалізується на 3D-моделюванні і надає інструменти для створення 3D-моделей об'єктів та асамблеїв;

- модульна архітектура: В FreeCAD використовується модульна архітектура, яка дозволяє додавати розширення та плагіни для різних видів моделювання та роботи з файлами;

- підтримка багатьох форматів файлів: FreeCAD підтримує імпорт і експорт файлів в різних форматах, включаючи формати стандартного обміну даними (STEP, IGES) і формати CAD (DWG, DXF) ;

- заощадження грошей: FreeCAD є безкоштовною, що робить її доступною для широкого кола користувачів і організацій.

Переваги FreeCAD:

- відкритий вихідний код: Відкритий вихідний код дозволяє користувачам змінювати програму за власними потребами та розробляти власні розширення;

- безкоштовність: FreeCAD безкоштовний, що робить його доступним для користувачів з обмеженим бюджетом;

- активна спільнота користувачів і розробників: FreeCAD має активну спільноту користувачів і розробників, які надають підтримку та розвивають програму;

- підтримка багатьох платформ: FreeCAD доступний для різних операційних систем, включаючи Windows, Linux і macOS.

Недоліки FreeCAD:

- менше розширень та плагінів: У порівнянні з комерційними системами CAD, кількість доступних розширень і плагінів для FreeCAD може бути обмеженою;

- менший функціонал порівняно зі спеціалізованими системами CAD: FreeCAD може бути менш потужним для деяких завдань, порівняно зі спеціалізованими системами CAD, які розроблені для конкретних галузей;

- вивчення інтерфейсу: Вивчення інтерфейсу FreeCAD може займати час, і він може бути менш інтуїтивним для новачків у порівнянні з іншими системами CAD.

FreeCAD - це корисна система CAD, яка може бути використана для 3D-моделювання та інженерного проектування. Її вибір буде залежати від ваших потреб і знань.

Для аналізу всіх описаних систем складемо порівняльну таблицю 1.1 .

Таблиця 1.1 - Порівняльна таблиця сучасних CAD – систем

	Легкість опанування та використання	Пряма інтеграція з верстатами ЧПК	3d- модельовання	Підтримка ЄСКД	Наявність баз даних стандартних виробів	Ціна ліцензії на рік
Fusion 360 CLOUD Commercial	+	+	+	-	-	21752 грн [16]
SolidEdge SHINING 3D EDITION SOFTWARE	+	-	+	+	+	65800 грн [17]
AutoCAD 2022	+	-	-	-	-	74 412 грн [16]
SOLIDWORKS Professional	+	+	+	+	+	139308 грн [16]
NX	-	+	+	+	+	Ціну необхідно уточнювати у виробника
CATIA	-	+	+	-	-	Ціну необхідно уточнювати у виробника
INVENTOR Professional 2023	-	-	+	-	-	91869,80 грн[16]
Creo	-	+	+	-	-	Ціну необхідно уточнювати у виробника
Rhino	-	-	+	-	-	Ціну необхідно уточнювати у виробника
BricsCAD Lite V24 -	+	+	+	-	-	423 561 грн (11088\$) [13]
Onshape	+	-	+	+	-	Ціну необхідно уточнювати у виробника
FreeCAD	+	-	+	-	-	Безкоштовна

1.3 Вибір оптимальної системи для проєктування ендопротезу кульшового суглобу

Проаналізувавши таблицю 1.1 «Порівняльна таблиця сучасних CAD – систем» виявили, що найбільш оптимальними для проєктування та розробки ендопротезів є система SolidWorks, бо має продуманий інтерфейс користувача та є достатньо простою та зручною для опанування [18]. Вона орієнтована як на конструкторську, так і на технологічну підготовку виробництва. Система має розпізнавання та параметризацію імпортованої геометрії, також в даній системі відсутні обмеження по кількості компонентів складних креслень. SolidWorks має можливість тестування на міцність спроектованих моделей в приближених реальних умовах тестування та має можливість проведення аналізу кінематики та процесу динаміки. Ціна на рік пакету SolidWorks Professional є прийнятною та повністю відповідає якості функціональному наповненню системи. SolidWorks також пропонує рішення 3DEXPERIENCE WORKS, що дозволяє об'єднати фахівців, ідеї, дані і рішення в інтерактивному середовищі для спільної роботи, забезпечуючи зв'язок між віртуальним середовищем і реальним світом.

2 РОЗРОБКА НІЖКИ ЕНДОПРОТЕЗУ КУЛЬШОВОГО СУГЛОБУ ЗА ДОПОМОГОЮ CAD-СИСТЕМИ SOLIDWORKS

Отже, в першому розділі було проведено аналітичний огляд різноманітних CAD – систем. Проведено аналіз та розглянули різні CAD – системи, їх основні характеристики та особливості. Виділено основні критерії для відбору систем комп'ютерного моделювання та проведено аналіз у відповідності з обраними критеріями (табл. 1.1). На основі таблиці вибрано найбільш підходящу систему, якою виявився SolidWorks. Далі більш детально розглянуто систему SolidWorks,

його історію розвитку, призначення, програмні продукти, інтерфейси програми, а також підібрано параметри та побудовано ніжку ендопротезу, голівку сферичну, чашку півсферичну та вкладку, а та зібрано їх в одну збірку, що разом утворює ендопротезу кульшового суглобу.

2.1 Основні відомості про SolidWorks. Історія розвитку та призначення SolidWorks

SolidWorks – програмний комплекс САПР для автоматизації робіт промислового підприємства На етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва. Забезпечує розробку виробів будь-якого ступеня складності і призначення. Працює в середовищі Microsoft Windows. Розроблено компанією SolidWorks Corporation, створеної з нуля Джоном Хірштіком, а з 1997 року є незалежним підрозділом компанії Dassault Systemes (Франція). Програму почали розробляти в 1993 році, вона почала продаватися в 1995 [19] і склала таким продуктам, як AutoCAD і Autodesk Mechanical desktop. Система SolidWorks стала першою САПР, що підтримує твердотільне моделювання для платформи Windows.

Завдання, які вирішуються:

а) конструкторська підготовка виробництва:

- 1) 3D проєктування виробів (деталей і зборок) будь-якого ступеня складності з урахуванням специфіки виготовлення;
- 2) створення конструкторської документації в суворій відповідності з ДСТУ;
- 3) промисловий дизайн;
- 4) відтворення програмного коду;
- 5) проєктування комунікацій (електроджгутів, трубопроводів, тощо);

6) інженерний аналіз (міцність, стійкість, теплопередача, частотний аналіз, динаміка механізмів, газо / гідродинаміка, оптика і світлотехніка, електромагнітні розрахунки, аналіз розмірних ланцюгів і ін.);

7) експрес-аналіз технологічності на етапі проектування;

8) підготовка даних для ІЕТР;

9) управління даними і процесами на етапі конструкторської підготовки виробництва;

б) технологічна підготовка виробництва:

1) проектування оснащення і інших засобів технологічного оснащення;

2) аналіз технологічності конструкції виробу;

3) аналіз технологічності процесів виготовлення (лиття пластмас, аналіз процесів штампування, витяжки, гнучкі та ін.);

4) розробка технологічних процесів по ЄСТД;

5) матеріальне та трудове нормування;

б) механічна обробка: розробка керуючих програм для верстатів з ЧПУ, верифікація УП, імітація роботи верстата. Фрезерна, токарна, токарно-фрезерна і електроерозійна обробка, лазерне, плазмове і гідроабразивне різання, вирубні штампи, координатно-вимірювальні машини;

7) управління даними і процесами на етапі технологічної підготовки виробництва;

в) управління даними і процесами:

1) робота з єдиною цифровою моделлю виробу;

2) електронний технічний і розпорядчий документообіг;

3) технології колективної розробки;

4) робота територіально-розподілених команд;

5) ведення архіву технічної документації по ДСТУ;

6) проектне управління;

7) захист даних ЕЦП;

8) підготовка даних для ERP, розрахунків собівартості.

2.2 Програмні продукти SolidWorks

Програмний комплекс SolidWorks включає базові конфігурації SolidWorks Standard, SolidWorks Professional, SolidWorks Premium, а також різні прикладні модулі:

- управління інженерними даними: SolidWorks Enterprise PDM;
- інженерні розрахунки: SolidWorks Simulation Professional, SolidWorks Simulation Premium, SolidWorks Flow Simulation ;
- електротехнічне проєктування: SolidWorks Electrical ;
- розробка інтерактивної документації: SolidWorks Composer;
- механообробка ЧПУ: CAMWorks;
- верифікація УП: CAMWorks Virtual Machine;
- контроль якості: SolidWorks Inspection;
- аналіз технологічності: SolidWorks Plastics, DFM і ін.

Оскільки під час проєктування будемо використовувати SolidWorks Professional 2012 то розглянемо більш детально його інструменти, прикладні модулі та експертні системи.

2.3 SolidWorks Professional 2012

SolidWorks Professional 2012 включає: гібридне параметричне моделювання: твердотільне моделювання, моделювання поверхонь, каркасне моделювання та їх комбінації без обмеження ступеня складності.

Проєктування виробів з урахуванням специфіки виготовлення: деталі з пластмас, листового матеріала, прес-форми, штампи, металоконструкції тощо.

Проєктування зборок: проєктування «знизу вгору» і «зверху вниз». Проєктування від концепції. Робота зі складними збірками: SpeedPak -управління

продуктивністю системи, управління відображеннями, управління конфігураціями, робота з мозаїчними даними, режим скорочених зборок і креслень.

Бібліотеки проєктування: єдина бібліотека фізичних властивостей матеріалів, текстур і штриховок. Типові конструктивні елементи, стандартні деталі і вузли, елементи листових деталей і т. п. Бібліотека стандартних компонентів від постачальників-виробників.

Пряме редагування геометрії: технології Instant3D.

Проєктування на основі баз знань: технології DriveWorksXpress. Експертні системи:

- SketchXpert - аналіз конфліктів в ескізах, пошук оптимального рішення;
- Feature Xpert, FilletXpert, DraftXpert - автоматичне керування елементами заокруглень і ухилів, оптимізація порядку побудови моделі;
- Instant3D - динамічне пряме редагування 3D моделей деталей і зборок, стандартних компонентів;
- DimXpert - автоматизована проstanовка розмірів і допусків в 3D моделі, а також розмірів в кресленнях, можливість роботи з імпортованою геометрією;
- AssemblyXpert аналіз продуктивності великих зборок, підготовка варіантів рішень щодо поліпшення швидкодії;
- Matexpert - аналіз сполучень зборок, пошук оптимального рішення;
- інженерний аналіз: експрес-розрахунки масово-інерційних характеристик, кінематики та динаміки механізмів, міцності і аеро / гідродинаміки;
- аналіз технологічності моделі: механічна обробка, обробка листа, лиття, заповнення прес-форм;
- екологічна експертиза проєкту: технології Sustainability Xpress.

Оформлення креслень по ЄСКД: двонаправленна асоціативність 3D моделі, креслення і специфікації. Використання бібліотек оформлення КД по ДСТ: спеціальні символи, бази, допуски і посадки, шорсткості, таврування і маркування, технічні вимоги, елементи гідравлічних та електричних схем і т. д.

Трансляція даних:

- нейтральні формати: STEP AP203 / AP214, Parasolid, ACIS, IGES, VDAFS, STL, VRML;

- прямі транслятори: Pro / ENGINEER, NX, Solid Edge, Inventor, AutoCAD, CATIA Graphics;

- Побудова 3D моделі друкованої плати за імпортованими даними з P-CAD, Altium Designer, Mentor Graphics, CADENCE і ін.; анімація: створення мультиплікації (анімації) на основі 3D моделей;

- API SDK: підтримка програмування на мовах Visual Basic, Visual C++ і ін., Запис і редагування макросів (VBA);

- SolidWorks Rx: утиліта автоматичної діагностики комп'ютера на відповідність вимогам SolidWorks;

- SolidWorks eDrawings: кошторис узгодження технічної документації;

- DraftSight: спеціальні ліцензії професійної 2D САПР для роботи даними DWG (створення, редагування, перегляд). Ліцензії надаються безкоштовно в необхідній кількості.

Бібліотеки стандартних виробів (SolidWorks Toolbox): кріплення, підшипники, кулачки, шківів, шестерні і т. п.) За стандартами ГОСТ, ISO, ANSI, BSI, DIN, JIS, CISC, PEM®, SKF®, Torrington®, Truarc®, Unistrut. Toolbox різних версій Solidworks несумісний і при установці Solidworks є можливість поновлення або установки нової версії Toolbox. Оновити Toolbox можна і вручну.

Інтерактивна документація: підготовка даних для IETP Photoview 360, eDrawings Professional.

Розпізнавання і параметризація імпортованої геометрії: технології FeatureWorks.

Автоматична перевірка і коректування моделей / креслень на відповідність СТІ: технології Design Checker.

Порівняння документів SolidWorks: деталі, збірки, креслення: технології SolidWorks Utilities.

Планування завдань (Task Scheduler): настройка завдань для виконання за розкладом. Плановані завдання: групова друк, імпорт / експорт, перевірка проєкту на відповідність стандартам підприємства і т. д.

2.4 Підбір параметрів для розробки ендопротезу кульшового суглоба

На сьогоднішній день у світовій практиці широко застосовується ендопротезування кульшового суглоба двох напрямків:

- тотальне заміщення кульшового суглоба та його ревізійне (повторне) ендопротезування – операція по заміні стегнової головки та кульшової западини;
- однополюсне заміщення (геміартропластика) - операція по заміні тільки стегнової головки зі збереженням кульшової западини пацієнта.

Тотальне ендопротезування кульшового суглоба за типом фіксації у кістку можна розділити на:

При цементній фіксації кістковий цемент заповнює весь простір між ніжкою ендопротеза і внутрішнім кортикальним шаром, формуючи таким чином своєрідне "ложе" для ніжки ендопротеза. Цемент в операційній поступово з рідкого полімеризується в міцний твердий. Цементний варіант фіксації ендопротезу застосовується для лікування людей похилого віку, у зв'язку зі зниженням у даної категорії пацієнтів щільності та міцності кісткової тканини. Остеопорозна структура кістки при інтеграції ендопротезу у кісткову тканину не може гарантувати міцність сполуки, тому ендопротез фіксується за допомогою цементу;

На рис.2.9 представлена чашка цементної фіксації (Muller, фірма Zimmer), Чашка по периметру має ряди кісткових ребер для більш щільної пресурізації цементу і кращої фіксації. По краю є рентген позитивний ободок для визначення орієнтації чашки на рентгенограмах.



Рисунок 2.9 - Чашка цементної фіксації Zimmer [20]

Ніжка цементної фіксації рис. 2.10 , класична пряма ніжка цементної фіксації по філософії М. Мюллера. Дуже хороша первинна фіксація та ротаційна стабільність. Структура ніжки с двома повздовжніми бороздками забезпечую чудову цементну фіксацію.



Рисунок 2.10- Ніжка цементної фіксації CPT, фірма Zimmer [21]

При безцементній фіксації ендопротез імплантується в кістку за типом щільної посадки («press-fit» фіксація), для надання шорсткості конструкції, ендопротез покривають пористим або гідроксиапатитовим покриттям. Це дозволяє підвищити біологічну фіксацію та остеоінтеграцію ендопротеза в кісткову тканину. При даному типі фіксації ендопротез встановлюють на місце методом «щільної посадки», що дозволяє надалі покращити кістковій тканині інтегрування в ендопротез.

Нижче представлені зовнішній вигляд компонентів безцементної фіксації, чашка фірми DePuy (рис. 2.11), ніжка Corail (фірма DePuy) (рис. 2.12), зовні покрита гідроксиапатитом, який сприяє вторинній остеоінтеграції (тобто більш швидкому вrostанню кістки в мікропори поверхні ніжки).



Рисунок 2.11 - чашка фірми DePuy [22]



Рисунок 2.12 - ніжка Corail (фірма DePuy) [23]

Штучний суглоб складається з: чашки ендопротеза, вкладки ендопротеза (при безцементному протезуванні), головки ендопротеза та ніжки ендопротеза. Існує дуже велика кількість відомих компаній, які займаються розробкою цих компонентів (DePuy (США), Zimmer Biomet (США), Smith&Nephew (Великобританія), Stryker (США), Lima Lto s.p.a. (Італія) й інші), кожен з них мають свої переваги та особливості конструкції ендопротезів.

Найбільш навантаженою та відповідальною частиною конструкції ендопротезу кульшового суглоба - є ніжка. І в залежності від правильності обраної конструкції, фіксації та встановлення ніжки ендопротезу залежить подальша експлуатація всього ендопротезу, а значить і життєдіяльність пацієнта.

Першою для проєктування виберемо ніжку ендопротезу безцементної фіксації. Це класична пряма ніжка кульшового суглобу безцементної фіксації, яка розроблена швейцарським професором ортопедії та хірургії М.Мюллером. Завдяки особливості будови ніжки ендопротезу кульшового суглоба та фіксації її в кістковомозковому каналі, дана конструкція ендопротезу останні 25 років займає рекордну кількість (понад мільйону пацієнтів) з ендопротезування в усьому світі.

Основні переваги конструкції даної ніжки ендопротезу безцементної фіксації:

- дуже хороша первинна фіксація та ротаційна стабільність;
- структура ніжки с двома повздовжніми бороздками забезпечує чудову фіксацію в дистальній частині;
- клиноподібна геометрія забезпечує посадку заклинюванням, за рахунок чого досягається медіолотеральна стабільність.

Для розроблюваної ніжки встановимо такі основні характеристики:

- шийково-діафізарний кут 138° (кут інклінації шийки стегна)- це кут, що утворюється при перетині поздовжніх осей шийки та діафізу стегнової кістки. Існують вікові, статеві та індивідуальні відмінності у величині даного кута. У середньому нормальний «природний» шийково-діафізарний кут у дорослих становить $125^{\circ} \dots 138^{\circ}$. Відхилення від нормального значення веде до патології та

тяжких змін кісткових структур, коксартрозу. Тому оптимальний шийково-діафізарний кут для проєктування ніжки ендопротеза - 138° ;

- offset 40 мм -це найменша відстань між центральною поздовжньою віссю стегнової кістки та центром обертання кульшового суглоба. Цей параметр важливий для забезпечення стабільності положення головки ендопротезу у вертлюжній западині. Оптимальне середнє значенням- 40 мм;

- довжина ніжки 140,7 мм - обирається з міркувань розподілу навантаження на конструкцію та площею контакту з кістковомозковим каналом;

- задній кут -12° ;

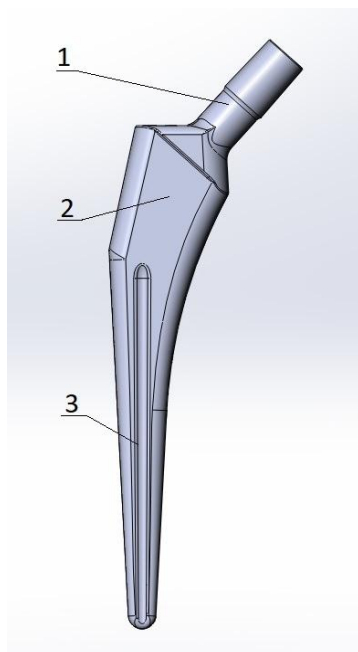
- кут ніжки в дистальній частині- 6° .

Вибір параметрів конструкції ніжки ендопротезу тазостегнового суглоба - індивідуальний підхід до ситуації кожного пацієнта. У цій роботі розглядається конструкція ніжки оптимальної конфігурації із середньостатистичними параметрами.

2.5 Проєктування ніжки

Проєктування ніжки виконується в CAD-системі SolidWorks .

Ніжка ендопротезу має такі складові частини:



- 1- Шийка ніжки
- 2-Проксимальна частина
- 3-Дистальна частина

Рисунок 2.13- складові частині ніжки

Шийка ніжки - дозволяє досягти стабільності ендопротеза і забезпечити відновлення анатомо-фізіологічних функцій, за рахунок точного регулювання офсету, довжини кінцівки, варуса/вальгуса, анте/ретроверсії і правильного розподілу навантаження.

Проксимальна частина - її геометричні форми забезпечують повну осьову стабільність, збільшує стійкість до торсійних навантажень, попереджаючи тим самим просідання і ротацію стегнового компонента.

Дистальна частина - збільшує площу контакту ніжки з кісткою і гарантує надійну додаткову механічну фіксацію.

Проектування ніжки починаємо з побудови шийки ніжки . Задаємо всі основні параметри шийки та конусу в ескізі. Параметри шийки:

- довжина конусу -18 мм;
- кут конусу - $2^{\circ}51'52''$;
- контрольний діаметр конусу - 12.5;
- довжина шийки - 35 мм ;
- діаметр шийки - 12.5 мм.

Побудову шийки починаємо з вибору площини на якій будемо будувати, для чого в дереві конструювання «FeatureManager» вибираємо площину «Спереди» і на панелі інструментів натискаємо кнопку ескіз. Далі за допомогою основних елементів ескізу (крапка, лінія, прямокутник, крива та інші.) будуємо половину контуру шийки та за допомогою кнопки «Автоматичне нанесення розмірів» наносимо всі основні розміри шийки (Рис. 2.14).

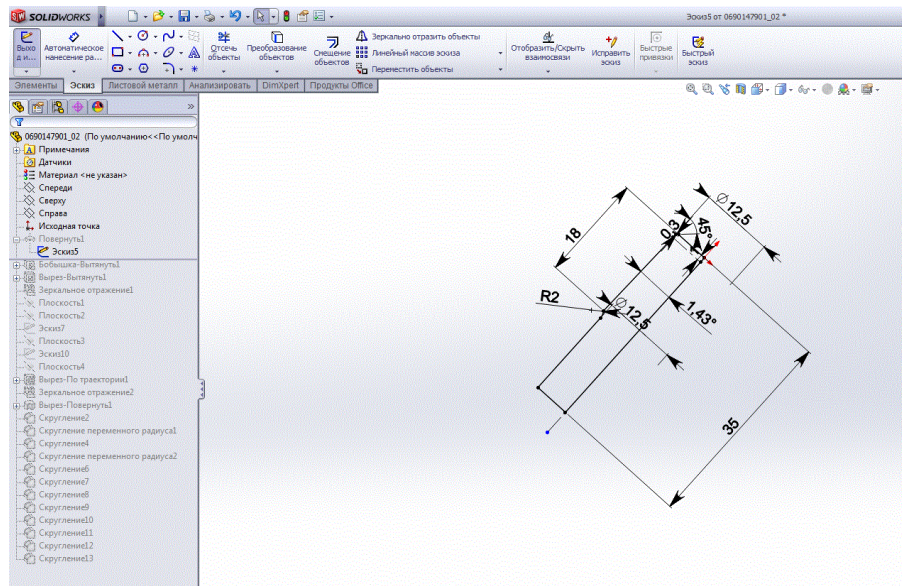


Рисунок 2.14- Побудова ескізу шийки ніжки

Зазначимо, що легкість побудування ескізів та автоматизована постановка розмірів відбувається за допомогою експертної системи «DimXpert», а в разі виникнення конфліктів в ескізах, в пошуку оптимально рішення допоможе експертна система «SketchXpert». Призначення цих та інших експертних систем зазначені в п.2.3.

Далі на панелі інструментів обираємо розділ «елементи» і натискаємо кнопку «Повернута бобишка» (це булева операція, яка прокручує утворений ескіз навколо центральної осі) та утворюємо першу твердотільну модель, тобто отримуємо готову шийку (Рис. 2.15).

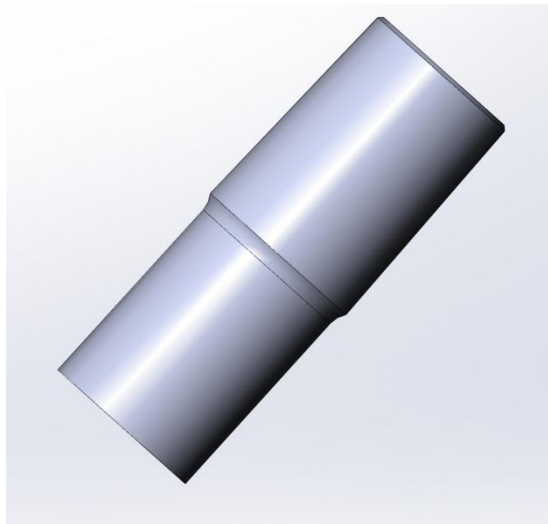


Рисунок 2.15 - Шийка ніжки

Далі починаємо будувати основну частину ніжки, для чого в дереві конструювання «FeatureManager» вибираємо площину «Спереді» і на панелі інструментів натискаємо кнопку «ескіз». Далі за допомогою основних елементів ескізу (крапка, лінія, прямокутник, крива та інші.) будуємо контур проксимальної та дистальної частини ніжки та за допомогою кнопки «Автоматичне нанесення розмірів» наносимо всі основні розміри:

- шийково-діафізарний кут -138;
- Offset -40 мм;
- довжина ніжки- 140,7 мм;
- задній кут -12°;
- кут ніжки в дистальній частині-6°;
- радіус передньої частині проксимального відділу-R142.

Побудований ескіз проксимальної та дистальної частини ніжки представлений на рис.2.16.

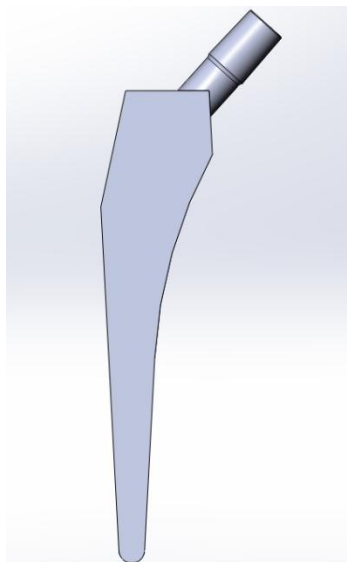


Рисунок 2.17- Основа проксимальної та дистальної частина ніжки

Далі будемо допоміжні ескізи та починаємо зменшувати основну частину ніжки, відсікаючи зайві елементи та надаючи їй форми «клина» (Рис 2.18).

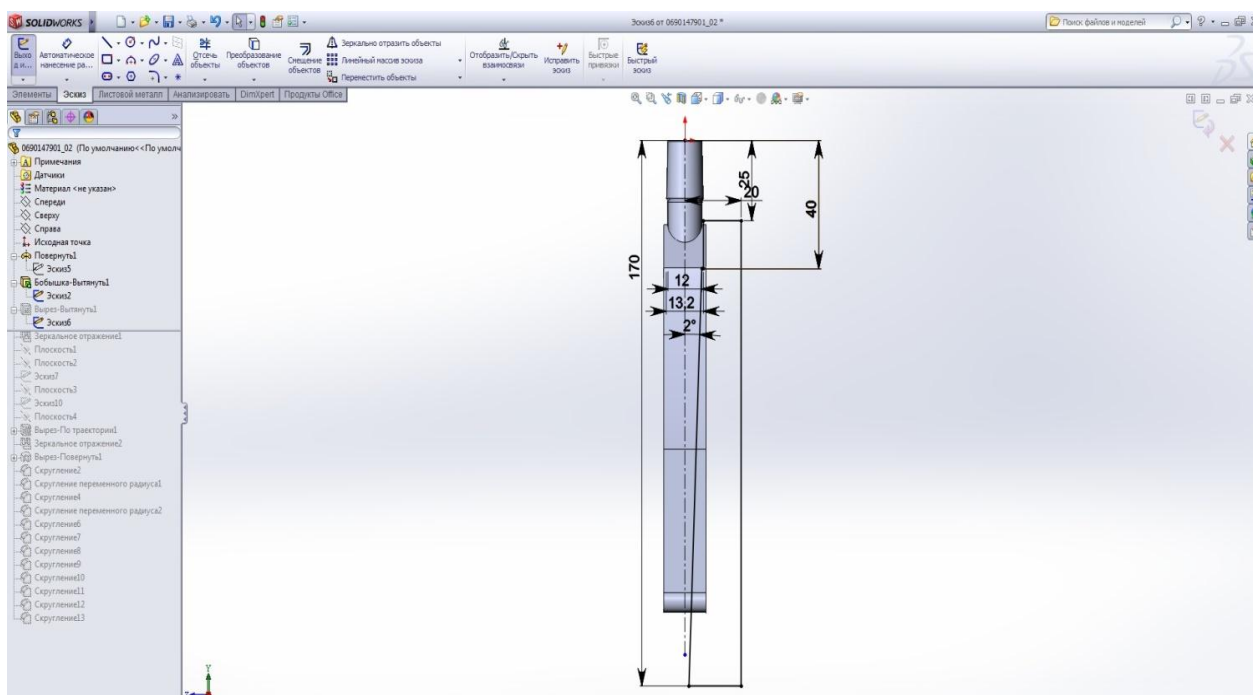


Рисунок 2.18 – Ескіз наданням форми «клина» основній частині ніжки

Після вводу всіх параметрів виконуємо булеву операцію «виріз-витягнути» (булева операція, основною функцією якої є виріз елементів згідно ескізу) за допомогою чого відсікаємо зайві елементи з твердотільної моделі (Рис.2.19) та «дзеркальне відображення» (булева операція, яка дзеркально відображає елементи відносно заданої площини). Результат останньої операції наведено на рис.2.20.

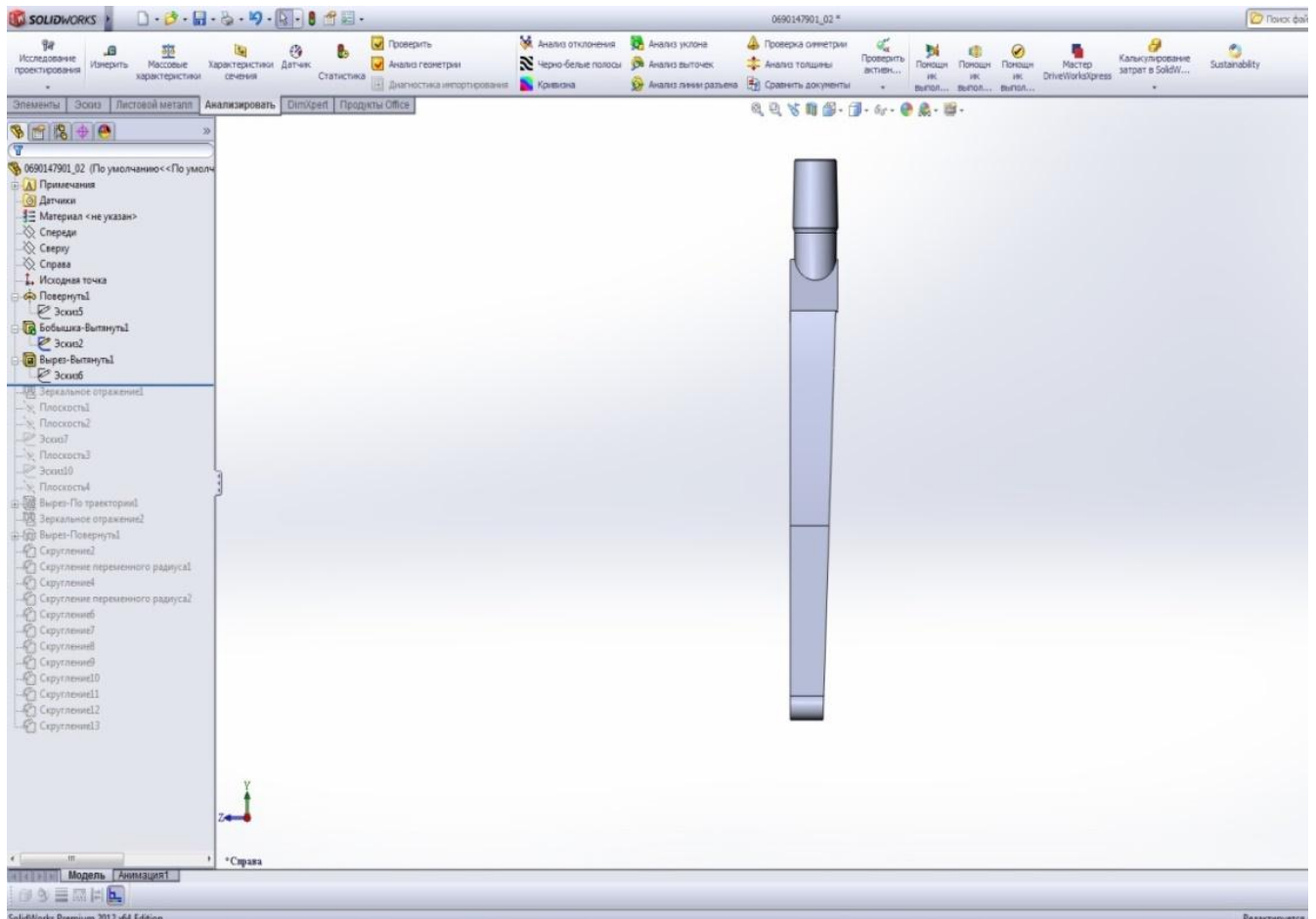


Рисунок 2.19-виконання булевої операції «виріз-витягнути»

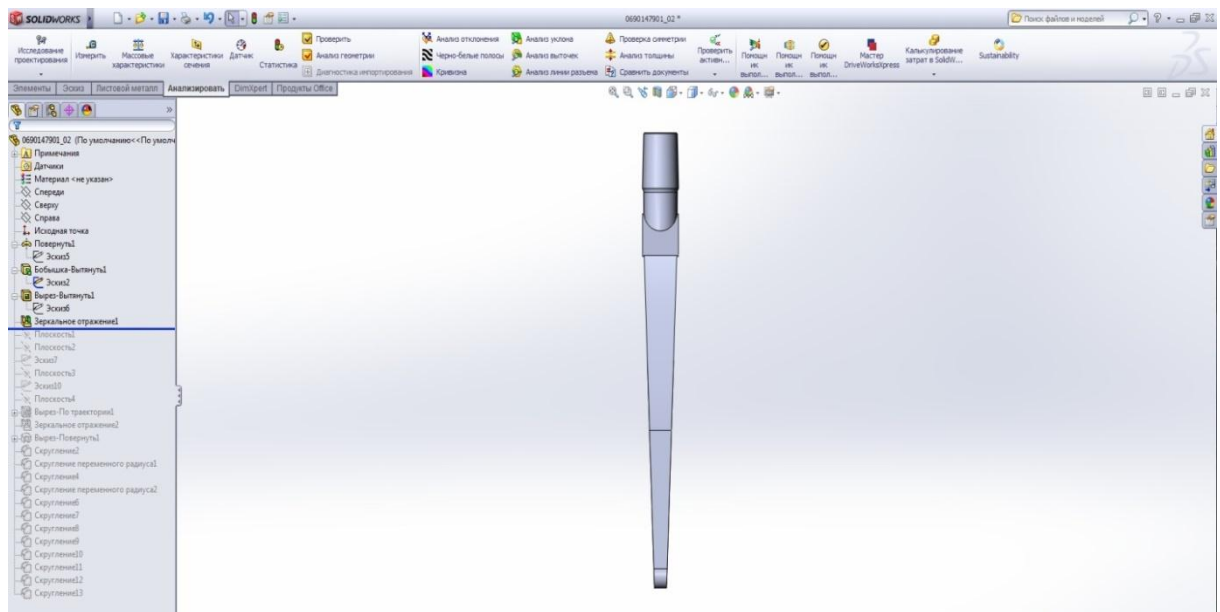


Рисунок 2.20- Отримання форми «клина» основній частині ніжки

Для отримання поздовжнього пазу будуюмо «виріз по траєкторії». Для чого спочатку необхідно побудувати один ескіз, який буде надавати траєкторію для майбутнього вирізу, а другий ескіз буде профілем самого вирізу (умовно як фреза на станку). Процес наведено на рис.2.21. Далі виконуємо булеві операції «виріз по траєкторії» (рис.2.22) і «дзеркальне відображення» (рис 2.23).

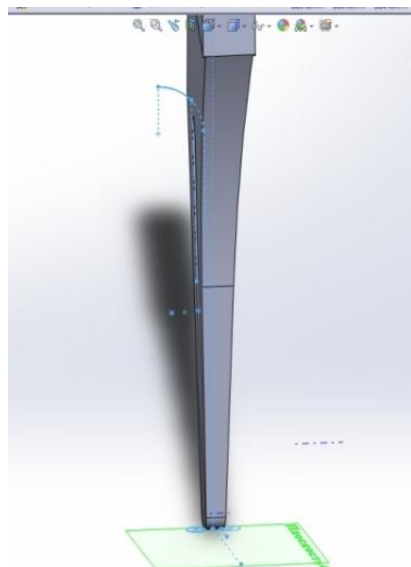


Рисунок 2.21- Побудова ескізів для «вирізу по траєкторії»

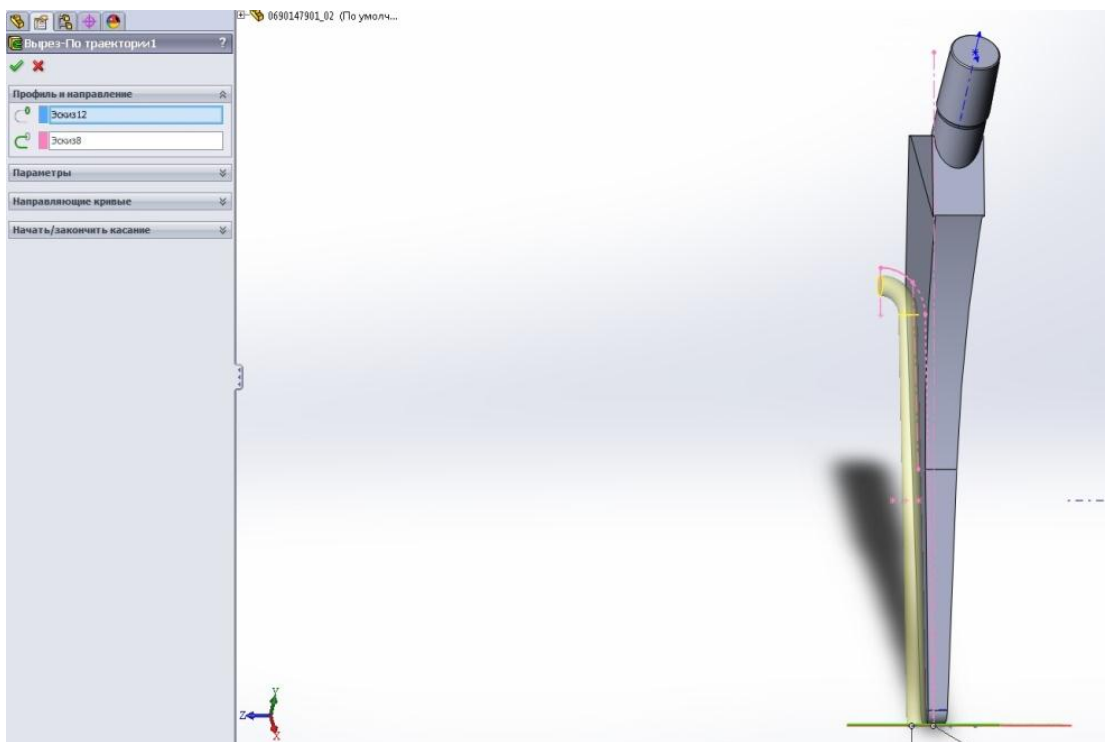


Рисунок 2.22- булева операція «виріз по траєкторії»

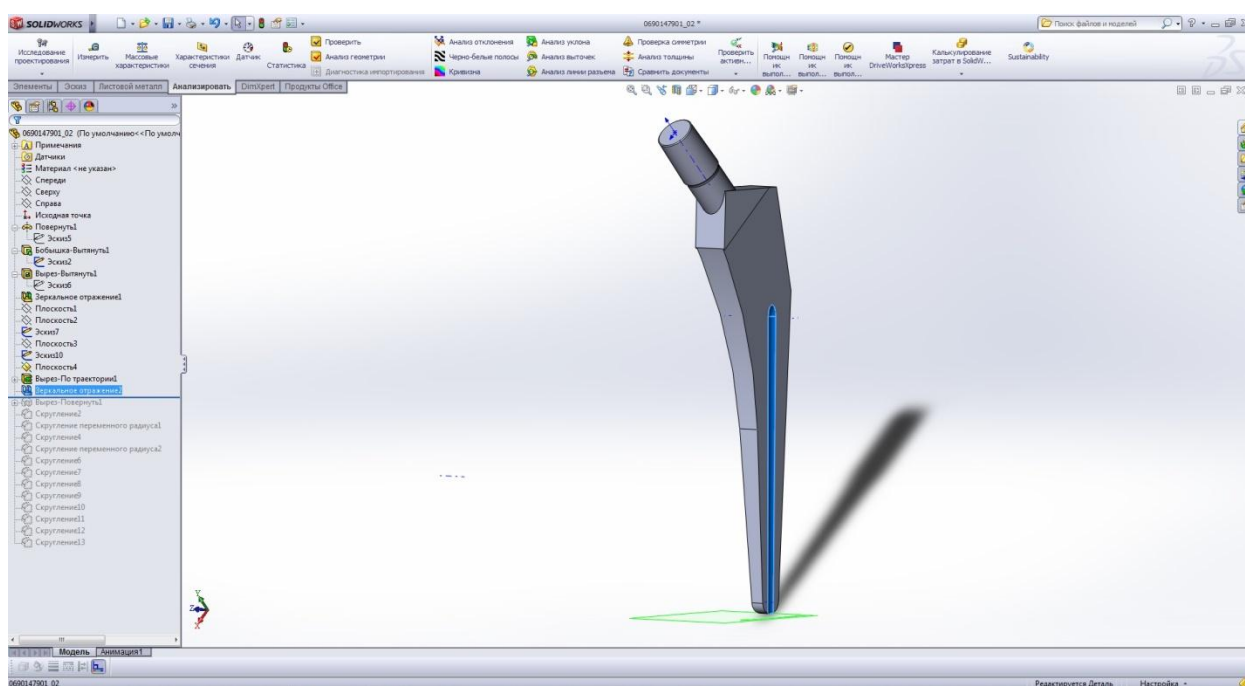


Рисунок 2.23- Булева операція «дзеркальне відображення»

У проксимальній частині ніжки будуємо ескіз різбового отвору (рис. 2.24).

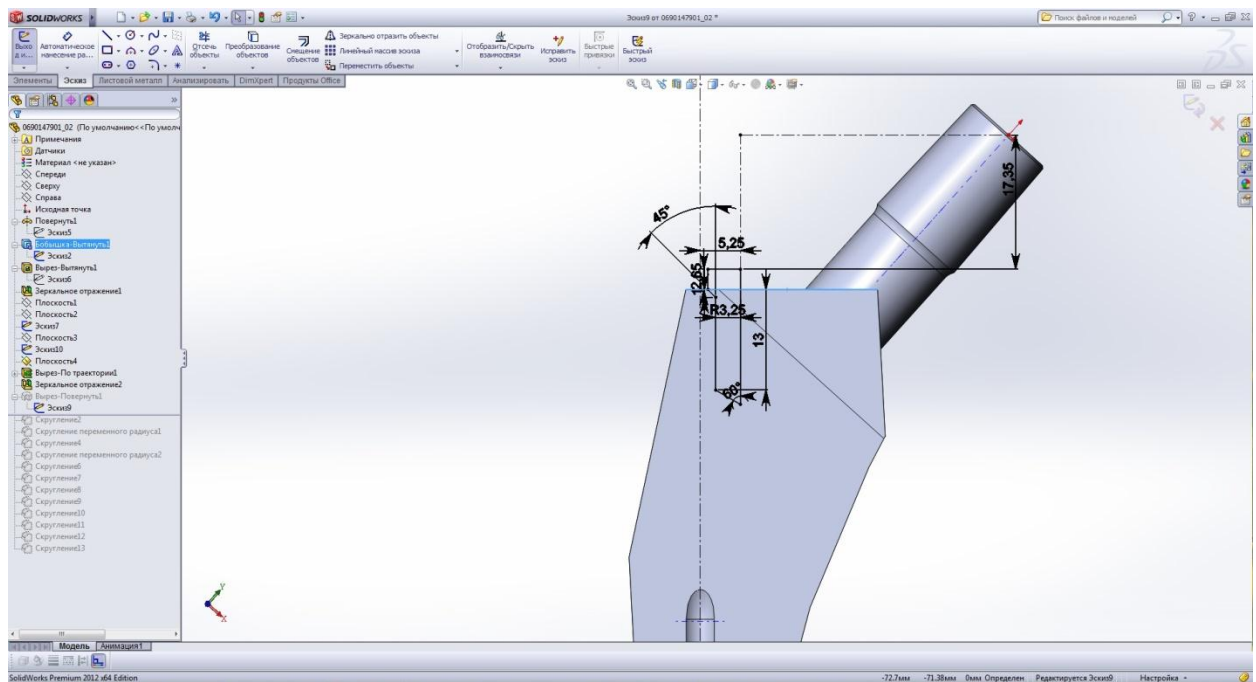


Рисунок 2.24- Ескіз різьбового отвору

Виконуємо булеву операцію «виріз-витягнути» рис.2.25. та отримуємо бажаний отвір.

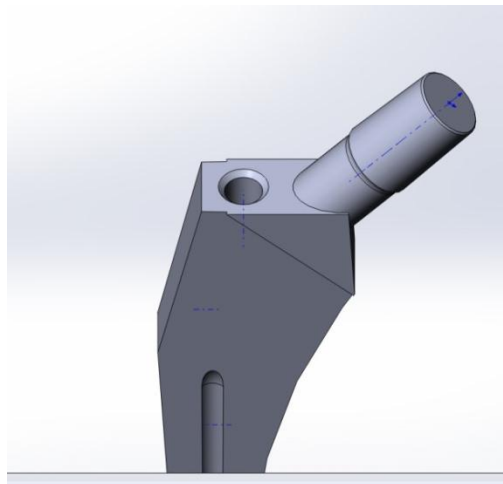


Рисунок 2.25- Різьбовий отвір

Далі за допомогою булевої операцію «заокруглення» на ніжці заокруглюємо всі краї ніжки (рис. 2.26).

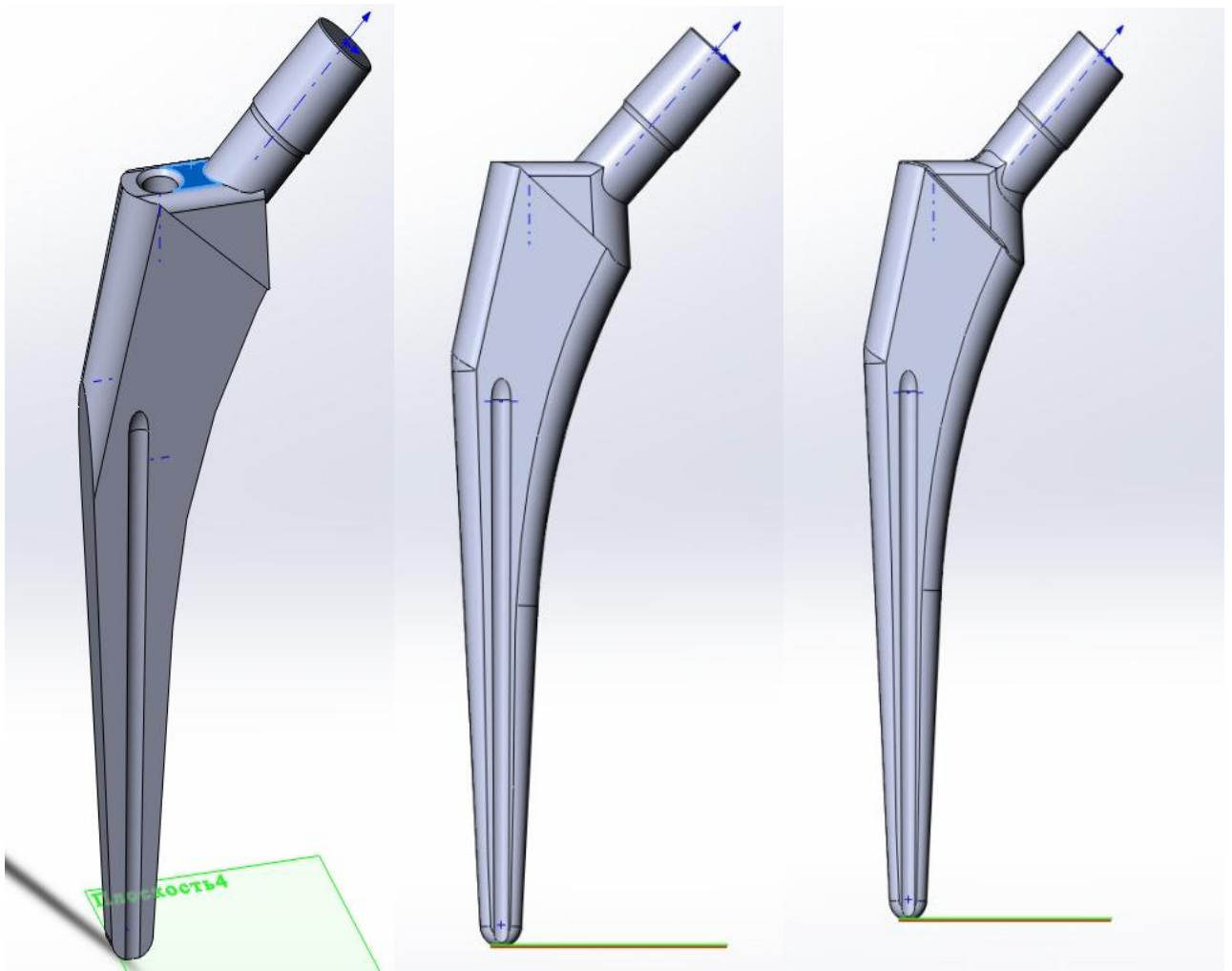


Рисунок 2.26 - Операція «заокруглення»

Остаточно готова ніжка представлена на рис.2.27.

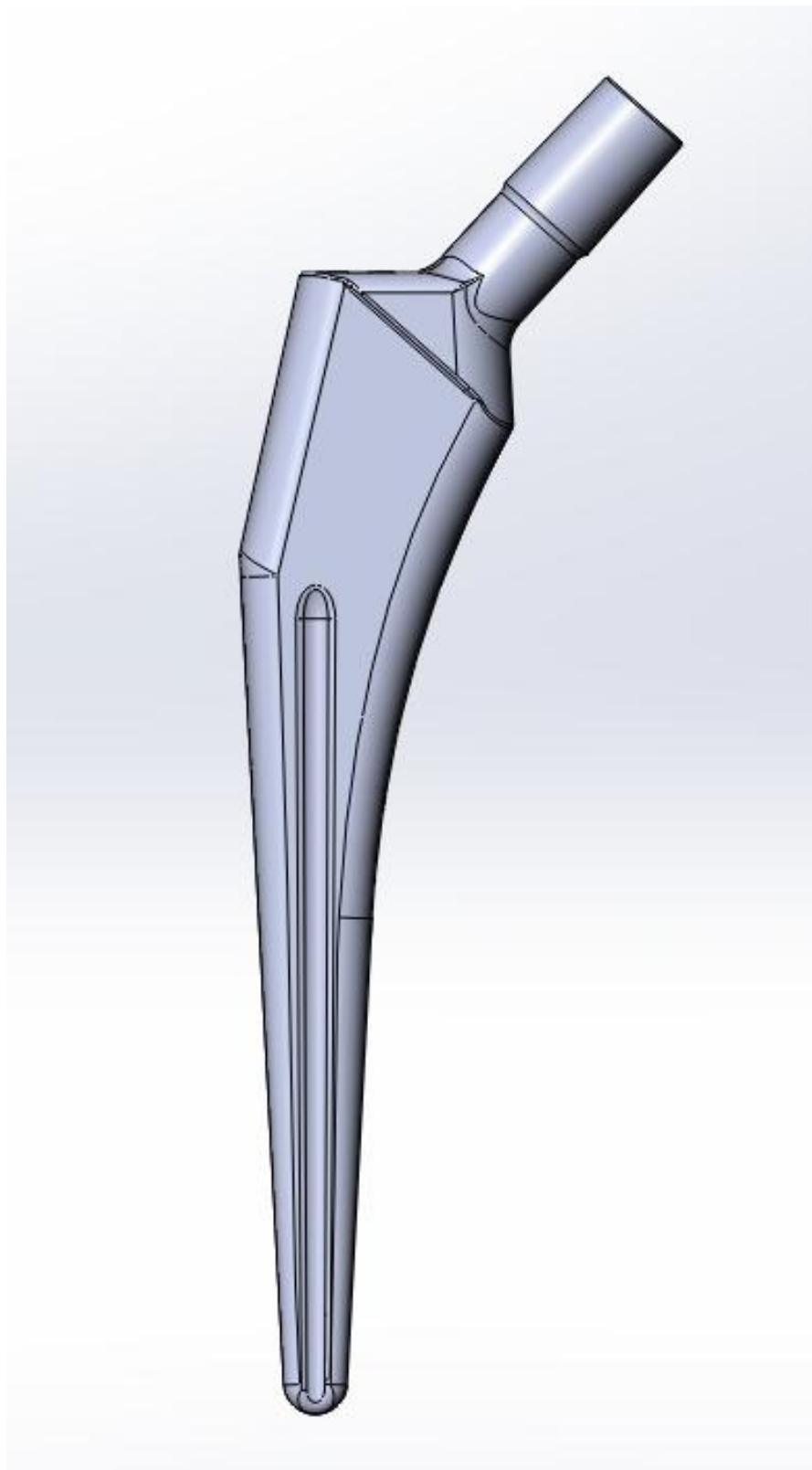


Рисунок 2.27 - Готова 3D-модель деталі ніжка ендопротезу

Спроектована ніжка ендопротезу кулькового суглобу є прикладом використання підсистеми комп'ютерного моделювання. Даний крок є проміжним

між етапами проєктування суглобів з урахуванням вимог лікарів та подальшим моделювання їх навантаження в умовах експлуатації. Тільки за результатами отриманих досліджень приймається рішення про доцільність виготовлення суглобу даної конструкції.

2.6.Проектування головки сферичної

Головка сферична ендопротезу кульшового суглобу виглядає як куля і призначена для заміни природної головки стегнової кістки у хірургічному лікуванні артрити, травматичних ушкоджень чи інших патологій, що впливають на цей суглоб. Головка ендопротезу зазвичай виготовляється з металу (наприклад, кобальт-хрому-молібдену) або кераміки. Важливо, щоб матеріал був стійким до зношування, мав достатню міцність та біологічну сумісність з тканинами тіла, дивись рисунок 2.28 та 2.29.



Рисунок 2.28- Головка сферична з кобальт-хрому-молібдену [24]



Рисунок 2.29- Головка сферична з кераміки [25]

Хірург вибирає розмір і тип головки сферичної ендопротезу залежно від індивідуальних особливостей пацієнта та характеристик суглобу. Під час операції головка ендопротезу встановлюється в суглобі, забезпечуючи його нормальну функцію.

Головки сферичні мають такі діаметри: 22мм, 28мм, 32 мм , 36мм, 40мм. Дані значення означають саме діаметр сфери головки. Найбільш популярні- це 28мм та 32 мм.

Також головки сферичними відрізняють довжиною компоненту , за рахунок наявності шийки або її відсутності, дивись рисунок 2.28. Це позначення маркується на головці і має такі типорозміри: -3;+0; +6; +12 Під час операції, лікар підбирає підходящу головку сферичну, де типорозмір: -3;+0; +6; +12- означає, на скільки мм подовжується або скорочується значення Offset .

Для побудови оберемо головку сферичну d32+6. Задаємо всі основні параметри головки в ескізі. Параметри головки:

- розмір сфери - R16мм;
- довжина головки - 35мм;
- довжина конусу - 20 мм;
- кут конусу - $2^{\circ}51'52''$;
- контрольний діаметр конусу - 12.5;
- контрольна довжина конусу - 15 мм.

Побудову голівки починаємо з вибору площини «Спереду» і на панелі інструментів натискаємо кнопку ескіз. Далі за допомогою основних елементів ескізу (крапка, лінія, прямокутник, крива та інші.) будуємо половину контуру голівки та за допомогою кнопки «Автоматичне нанесення розмірів» наносимо всі основні розміри головки, дивися рисунок 2.30.

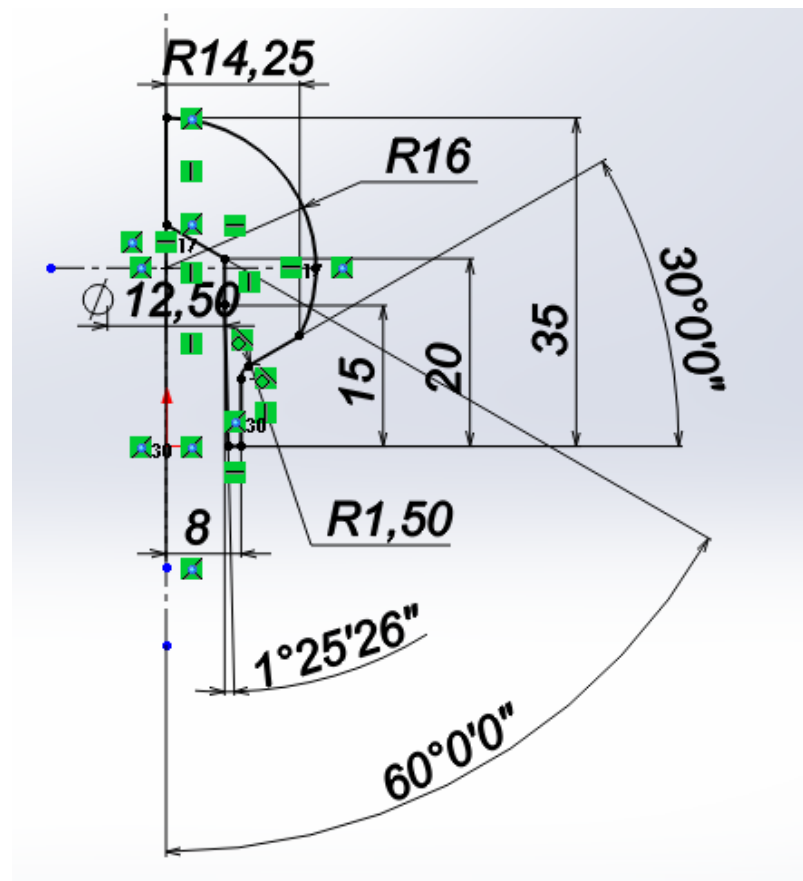


Рисунок 2.30- Побудування ескізу голівки

Далі на панелі інструментів обираємо розділ «елементи» і натискаємо кнопку «Повернута бобишка» та утримуємо твердотільну модель головки, дивися рисунок 2.31.

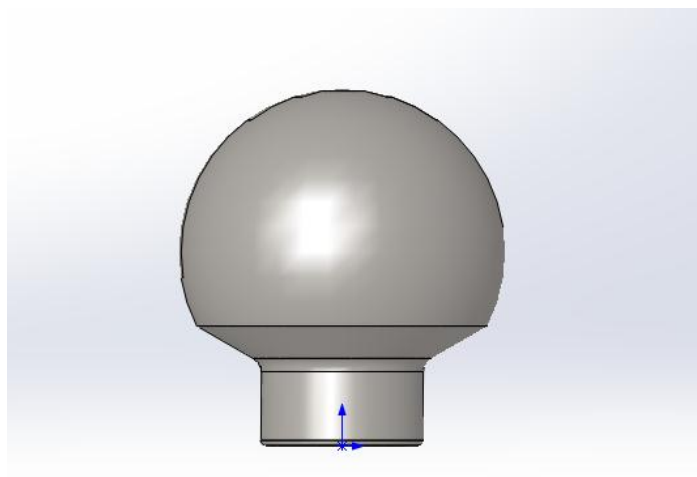


Рисунок 2.31- Готова головка сферична

За допомогою команди «розріз» можна подивитися на модель головки в розрізі, рисунок 2.32.

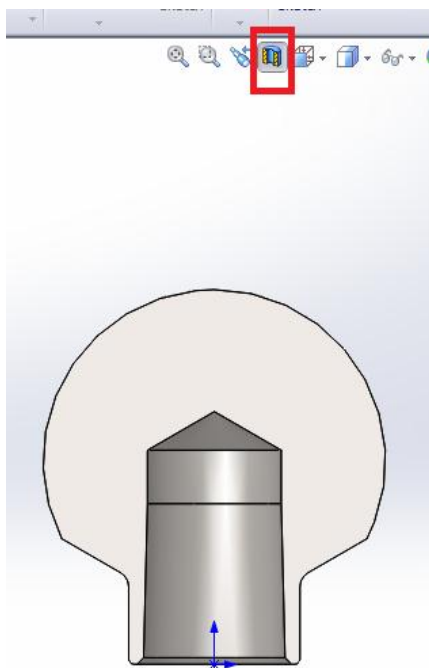


Рисунок 2.32- Готова 3D-модель деталі головки сферичної розрізі

2.7 Проєктування чашки півсферичної

Чашка півсферична ендопротезу кульшового суглобу (його вертлужний компонент) має напівсферичну форму. Після обробки вертлужної западини тазової кістки спеціальними фрезами чашка кріпиться у ній цементним чи безцементним способом. Відповідно, чашки бувають цементні та безцементні. Оскільки ми вибрали для проєктування ніжку з безцементним типом фіксації, то, відповідно, проєктувати будемо безцементну чашку півсферичну.

Чашки півсферичні безцементні виконані з титанового сплаву ВТ-6, оскільки він являється біологічно інертним до живого організму, що поєднується з корозійною стійкістю, високими механічними якостями, доступністю і відносно невеликою ціною. Для надання шорсткості конструкції, чашку півсферичну покривають пористим титановим або гідроксиапатитовим покриттям (рис. 2.33).



Рисунок 2.33- Чашку півсферична з пористим титановим покриттям [26]

Найбільш популярний типорозмірний ряд чашки півсферичної такий: 46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60, 62, 64, 66, 68, 70 мм. Цифри даного ряду вказують на зовнішній діаметре сфери чашки. Діаметр внутрішньої сфери залежить від товщини чашки та способу фіксації з вкладкою, в кожного виробника даний параметр відмінний.

Для побудови оберемо чашку півсферичну D58. Задаємо всі основні параметри чашки в ескізі. Параметри чашки:

- діаметр зовнішньої сфери - 58мм;

- діаметр внутрішньої сфери - 50мм;
- висота чашки - 27мм;
- діаметр замка - 49,5мм;
- діаметр пазу - 50,2мм;
- ширина пазу - 3мм;

Побудову чашки починаємо по аналогії з ніжкою, а саме з вибору площини «Спереди» та побудови ескізу. Будуємо половину контуру чашки та наносимо всі основні розміри чашки характерні для даного типорозміру, дивися рисунок 2.34.

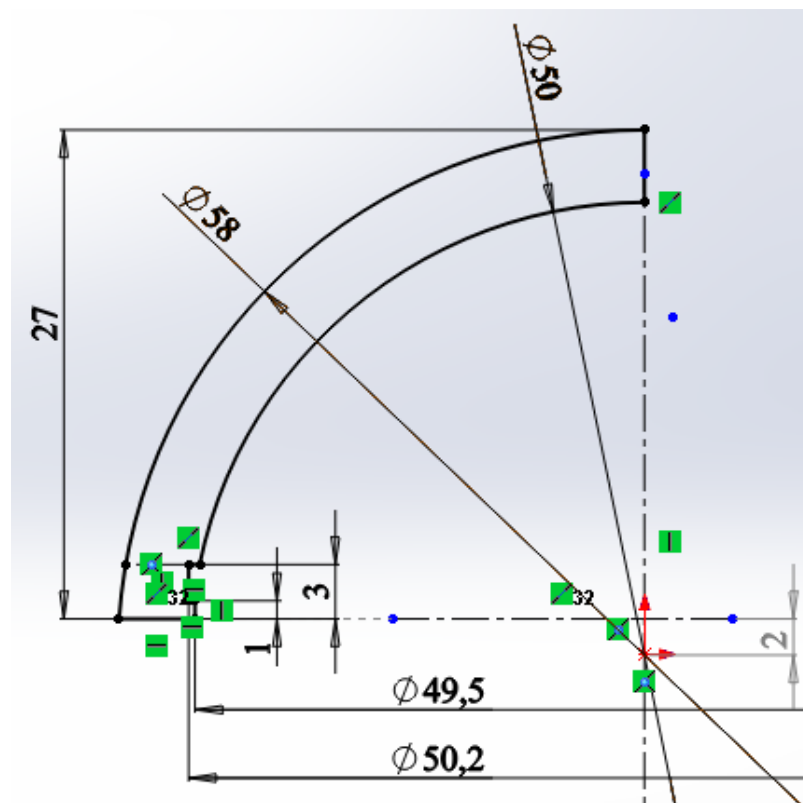


Рисунок 2.34- Ескіз чашки півсферичної

Далі на панелі інструментів обираємо розділ «елементи» і натискаємо кнопку «Повернута бобишка» та утримуємо твердотільну модель чашки, дивися рисунок 2.35.

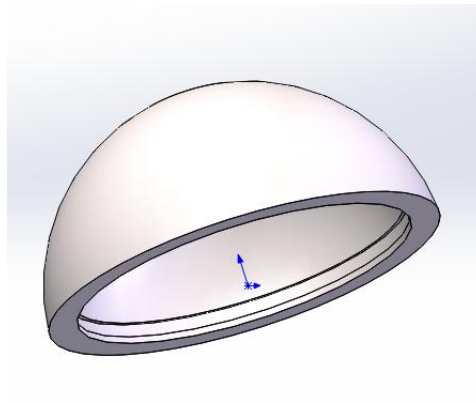


Рисунок 2.35- Чашка півсферична

Оскільки чашка півсферична має безліч виступів та отворів, то побудову кожного елемента не будемо описувати, адже вони виконуються за допомогою стандартних операцій.

В декілька операцій побудували наступне: центральний отвір з різьбою, який використовується для встановлення чашки півсферичної; 8 пазів в нижній частині чашки, дані пази допомагають лікарю правильно встановити чашку в кульшову западину; антиротаційний виступ для уникнення провороту вкладки в чашці, дивись рисунок 2.36

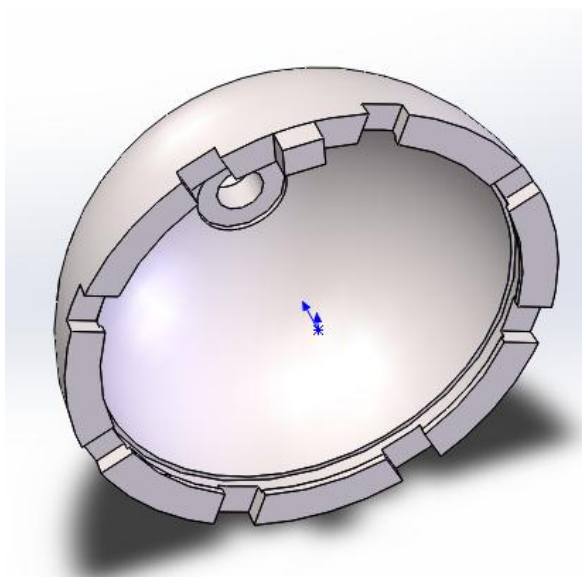


Рисунок 2.36 - Побудова центрального отвору, пазів, та антиротаційного виступу

Далі робимо отвір за допомогою ескізу та операції «виріз-витягнути» на сферичній частині чашки та розмножуємо його за допомогою операції «круговий масив», дивись рисунок 2.37 и рисунок 2.38. Через дані отвори за допомогою гвинтів виконується додаткова фіксація чашки до вертлужної западини. Чашка півсферична повністю побудована.

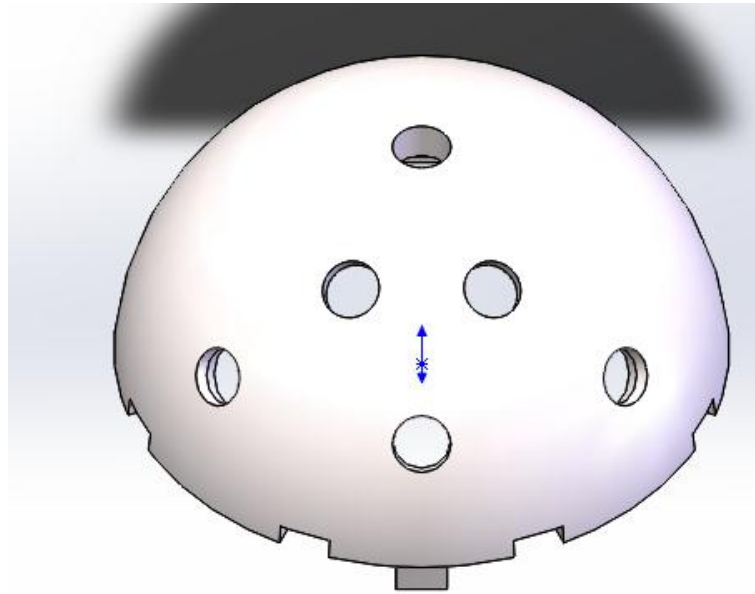


Рисунок 2.37 – Бокові отвори на чашці

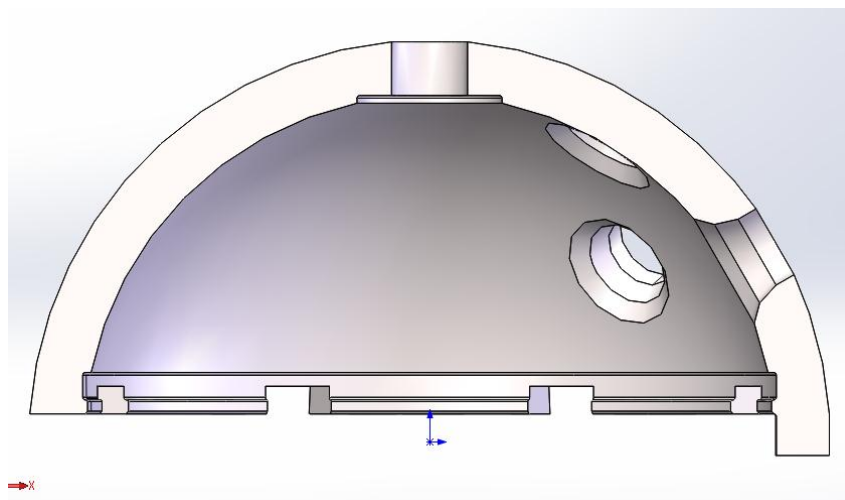


Рисунок 2.38 – Готова 3D-модель деталі чашка в розрізі

2.8Проектування вкладки

Вкладка відіграє важливу роль у суглобі, надаючи поверхню для тертя та плавного руху між компонентами ендопротезу. Вибір матеріалу вкладки може залежати від різних факторів, включаючи стійкість до зношування, біосумісність та інші характеристики.

Вкладка для кульшових ендопротезів можуть бути виготовлені з різних матеріалів, включаючи:

- поліетилен високої щільності (ПВХП): Це один із найпоширеніших матеріалів для вкладишів. Він має гарну стійкість до зносу і забезпечує плавний рух у суглобі.
- кераміка: деякі вкладки можуть бути виготовлені з керамічних матеріалів. Керамічні вкладиші зазвичай мають високу стійкість до зносу і менший коефіцієнт тертя.
- метали: хоча металеві вкладки менш поширені, вони також можуть використовуватися. Зазвичай вони виготовлені із матеріалів, таких як кобальт-хром або титан.

При ендопротезуванні кульшового суглоба створюється штучна пара тертя між головкою сферичною стегнового компонента і вкладкою. Ми використали найбільш стійку до зносу та надійну пару тертя, а саме поліетилен високої щільності в вкладці – кобальт –хром-молібденовий сплав в головці сферичній.

Для побудови оберемо вкладку D58-32, яка відповідає чашці D58 та головці сферичній d32. Задаємо всі основні параметри вкладки в ескізі. Параметри вкладки:

- радіус зовнішньої сфери - 25мм;
- радіус внутрішньої сфери - 16мм;
- висота вкладки - 29мм;
- ширина вкладки - 56мм;
- діаметр замка - 49,7мм;

- діаметр пазу - 50,2мм;
- ширина замку - 2,7мм.

Побудову вкладки починаємо по аналогії з ніжкою, а саме з вибору площини «Спереду» та побудови ескізу. Будуємо половину контуру вкладки та наносимо всі основні розміри чашки характерні для даного типорозміру, дивися рисунок 2.39.

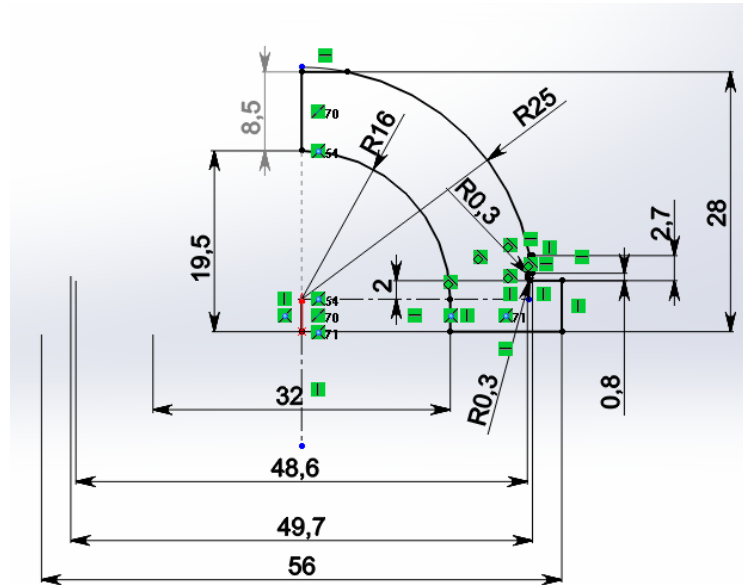


Рисунок 2.39 - Ескіз вкладки

Далі на панелі інструментів обираємо розділ «елементи» і натискаємо кнопку «Повернута бобишка» та утримуємо твердотільну модель вкладки, для наочності на рисунку 2.40 показаний розріз деталі.

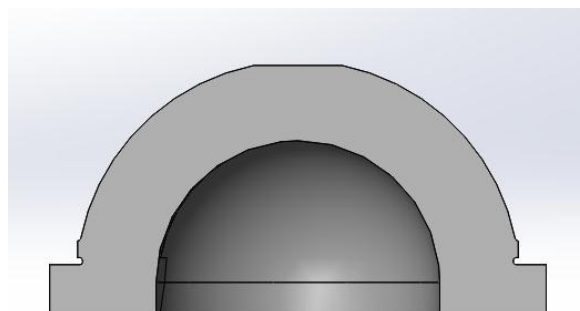


Рисунок 2.40 - Розріз вкладки

Далі робимо антиротаційний паз за допомогою ескізу та операції «виріз-випасти» на циліндричній частині вкладки, дивись рисунок 2.41.

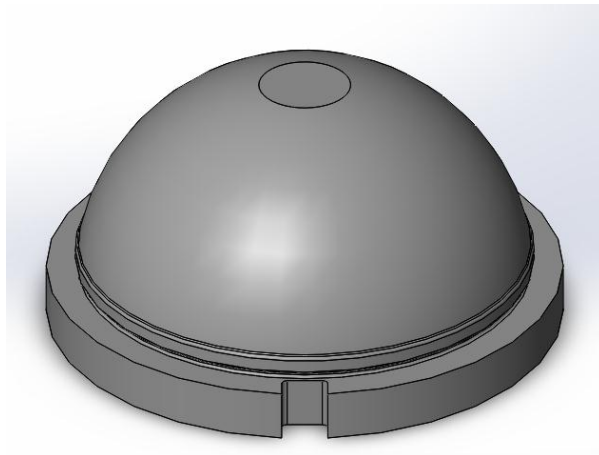


Рисунок 2.41- Готова 3D-модель деталі вкладка

2.9 Збірка ендопротезу кульшового суглобу

Для подальших тестувань перевірки діапазону кутових рухів між стегновим і вертлюжним компонентами необхідно виконати збірку всіх складових частин, які розробили в пунктах 2.5-2.8, в одну збірку. Всі компоненти разом утворюють ендопротез кульшового суглоба.

Збірка- це вузол, що складається з двох або більше деталей, які називаються компонентами. Одна зборка може бути вузлом іншої зборки. Проектування збірки може виконуватись двома способами: знизу-вгору або зверху-вниз. В нашому випадку збірка виконувалась зверху-вниз. Це обумовлено тим, що вертлюжний компонент є статичним, а кульшовий компонент рухається по сферичній поверхні.

Отже, створюємо новий файл для збірки. Далі за допомогою кнопки «Вставити компоненти», на панелі інструментів, додаємо 3D модель чашки півсферичної (рис. 2.42).

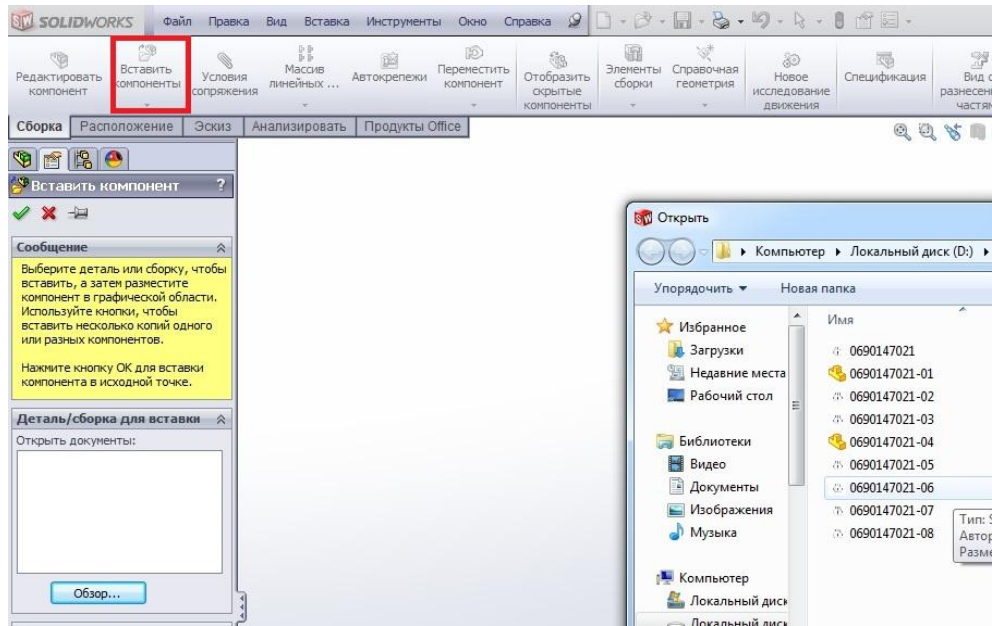


Рисунок 2.42.- Додавання 3D-моделі чашки півсферичної

Будуємо ескіз в площині «Спереду», на якому будуємо вертикальну осьову лінію, яка проходить через центральну точку системи координат, та будуємо додаткову лінію, ліворуч від вертикальної осьової лінії під кутом 45° , див . рисунок 2.43.

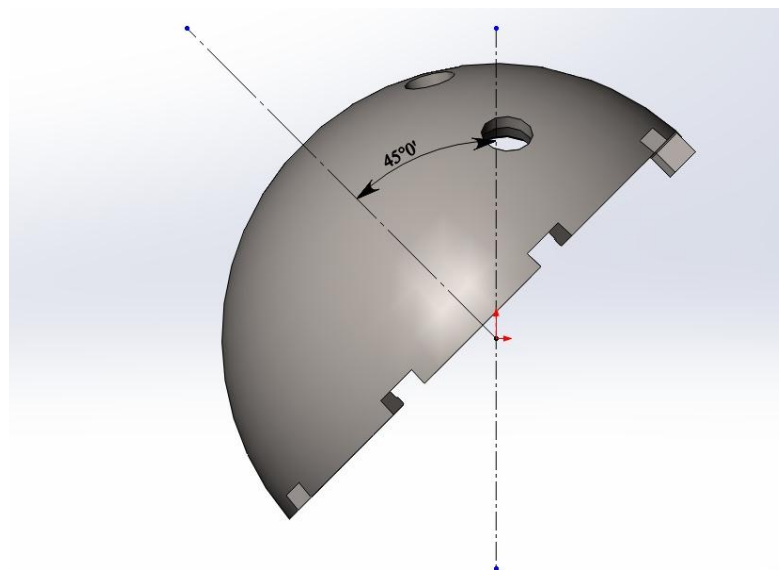


Рисунок 2.43 - Ескіз з додатковими осьовими лініями

Позиціонуємо компонент та фіксуємо його за допомогою взаємозв'язків сполучень. Для чого натискаємо кнопку «умови сполучень» на панелі інструментів та фіксуємо в центральній точці чашки півсферичної з центральною точкою базової системи координат за допомогою в взаємозв'язку «співпадіння» та зливаємо нещодавно побудовану осьову лінію (під 45°) з осьовою лінією чашки півсферичної за допомогою взаємозв'язку «колінеарно». Взаємозв'язки сполучення дозволяють точно розташовувати компоненти в зборці відносно одне одного. Вони дозволяють визначити, які компоненти переміщуються, а які обертаються щодо інших деталей. Послідовно додаючи взаємозв'язки сполучення можна переміщати компоненти в потрібне положення. Сполучення створює геометричні взаємозв'язки, такі як «співпадіння», «перпендикулярність», «паралельність»

Далі за допомогою кнопки «Вставити компонент», на панелі інструментів, додаємо 3D-модель вкладки. Позиціонуємо компонент та фіксуємо його за допомогою взаємозв'язків сполучень. Натискаємо кнопку «умови сполучень» та фіксуємо вкладку відносно чашки півсферичної за допомогою взаємозв'язку «концентричність» по внутрішній сфері чашки півсферичної та зовнішній сфері вкладки, дивись рисунок 2.44.

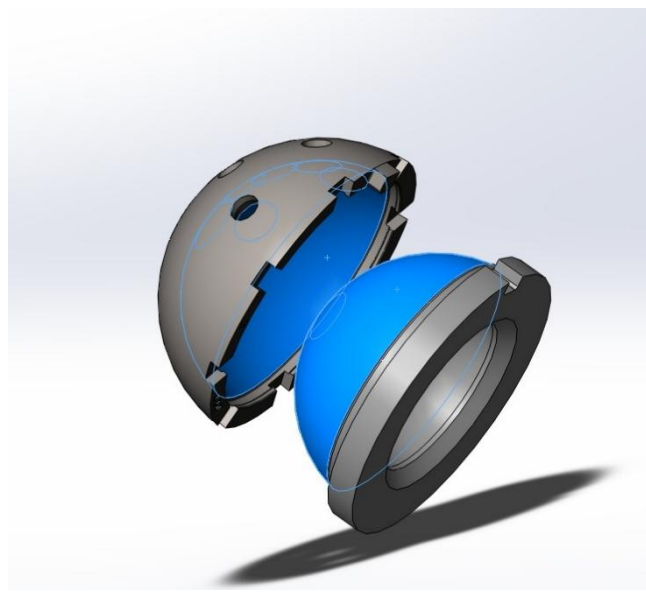


Рисунок 2.44- Фіксуємо вкладку відносно чашки півсферичної

Повторюємо ту ж команду та додаємо взаємозв'язку «співпадіння», по нижній площині чашки півсферичної та верхній площині бортика вкладки, дивись рисунок 2.45. Також додаємо взаємозв'язку «співпадіння» між фіксаційним виступом на чашка півсферичній та пазом вкладки, для уникнення провороту вкладки, дивись рисунок 2.46.

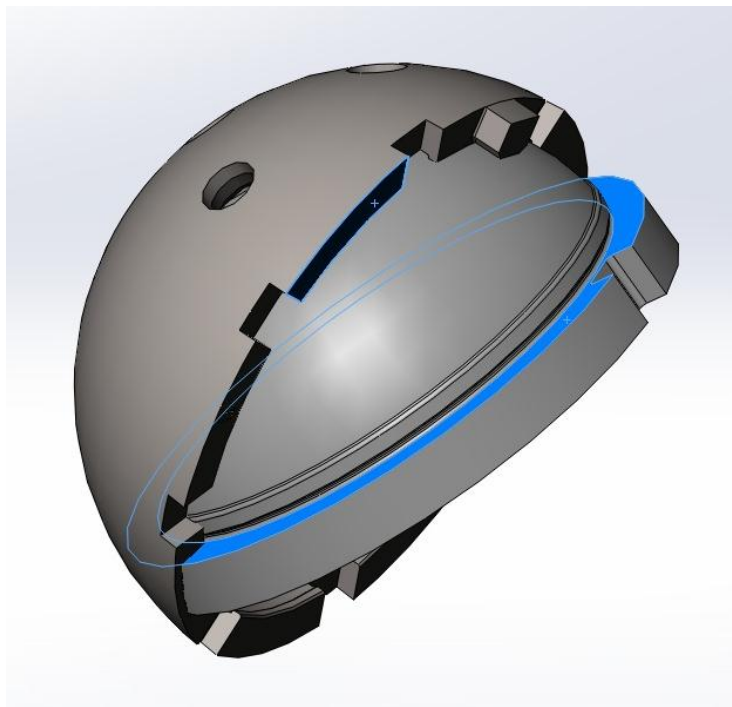


Рисунок 2.45- Взаємозв'язок «співпадіння» чашки та вкладки

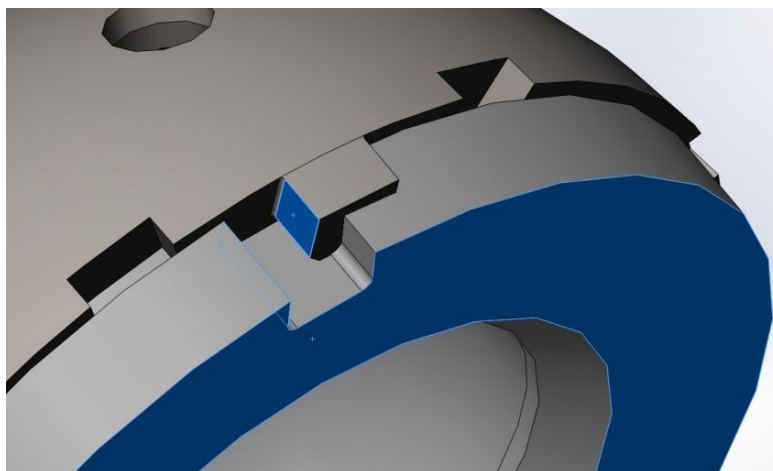


Рисунок 2.46- Взаємозв'язок «співпадіння» пазу

Далі за допомогою кнопки «Вставити компонент», на панелі інструментів, додаємо 3D-модель головку сферичну. Позиціонуємо компонент та фіксуємо його за допомогою взаємозв'язків сполучень. Натискаємо кнопку «умови сполучень» та фіксуємо головку сферичну відносно вкладки за допомогою в взаємозв'язку «концентричність» по внутрішній сфері вкладки та зовнішній сфері головки сферичної, дивись рисунок 2.47.

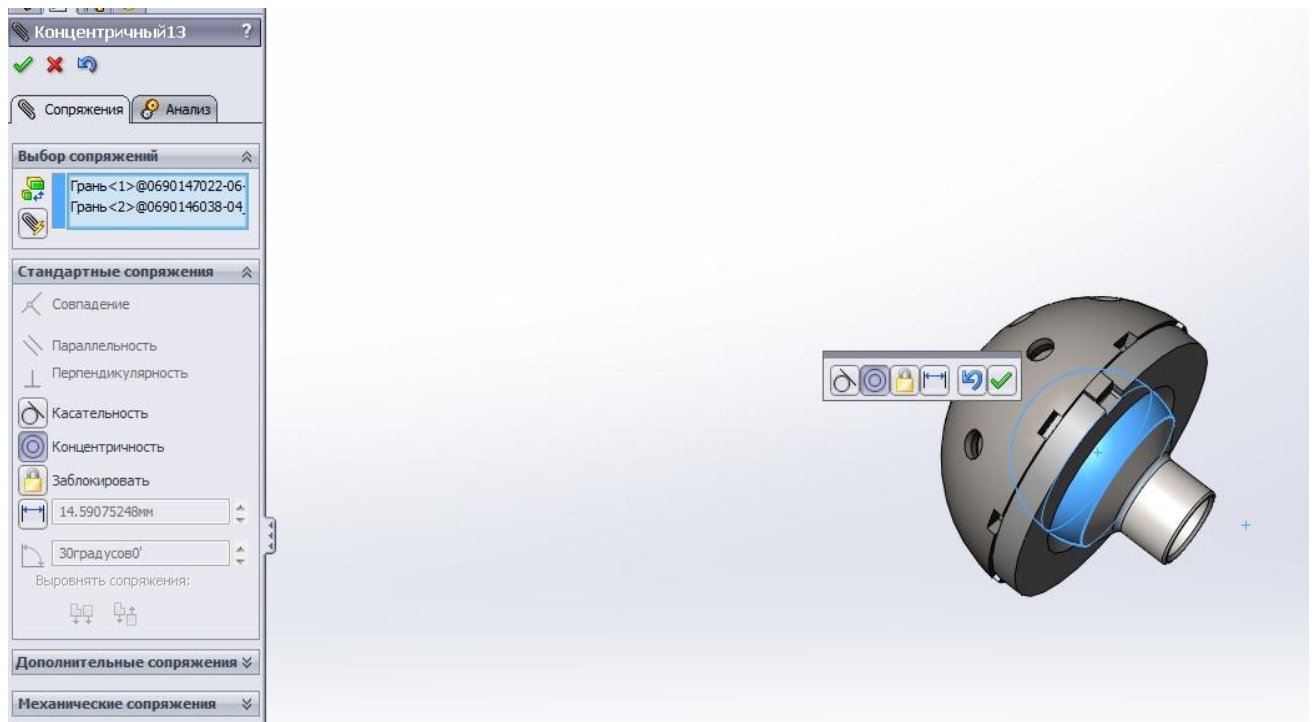


Рисунок 2.47 - Взаємозв'язок «концентричність» вкладки та головки

Аналогічно додаємо 3D-модель ніжки. Позиціонуємо компонент та фіксуємо його за допомогою взаємозв'язків сполучень. Натискаємо кнопку «умови сполучень» та фіксуємо конус ніжки відносно конусу головки сферичної за допомогою в взаємозв'язку «концентричність» по циліндричних частинах конусів, дивись рисунок 2.48.

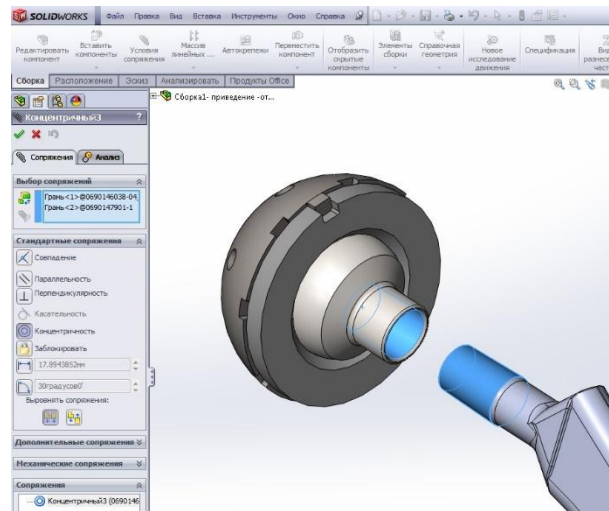


Рисунок 2.48- Взаємозв'язок «концентричність» конусів головки та ніжки

Також додаємо взаємозв'язку «співпадіння», по внутрішній площині конусу головки сферичної та зовнішньому краю конусу ніжки, дивись рис. 2.49.

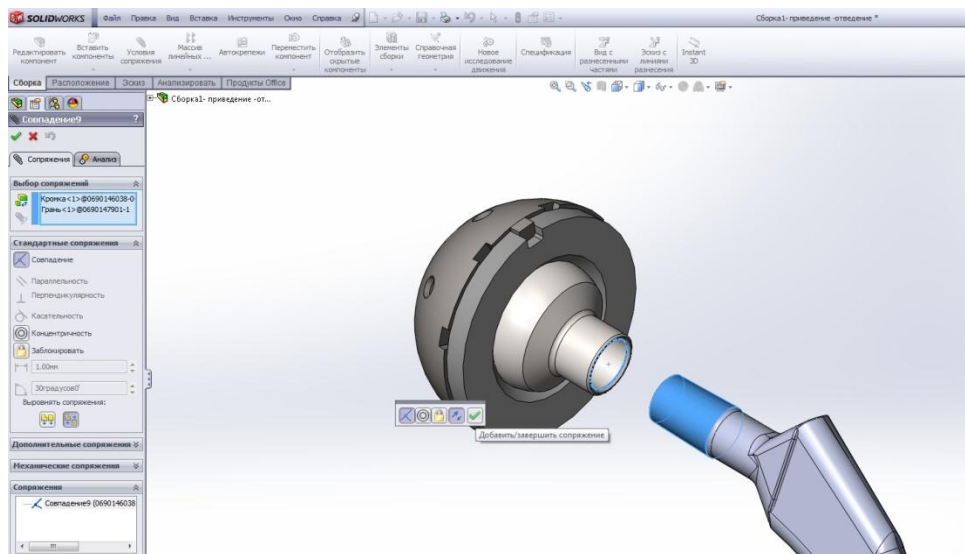


Рисунок 2.49- Взаємозв'язок «співпадіння» конусів головки та ніжки

Конус ніжка одягається на конус головки. Кульшовий суглоб повністю зібраний, дивись рис. 2.50.

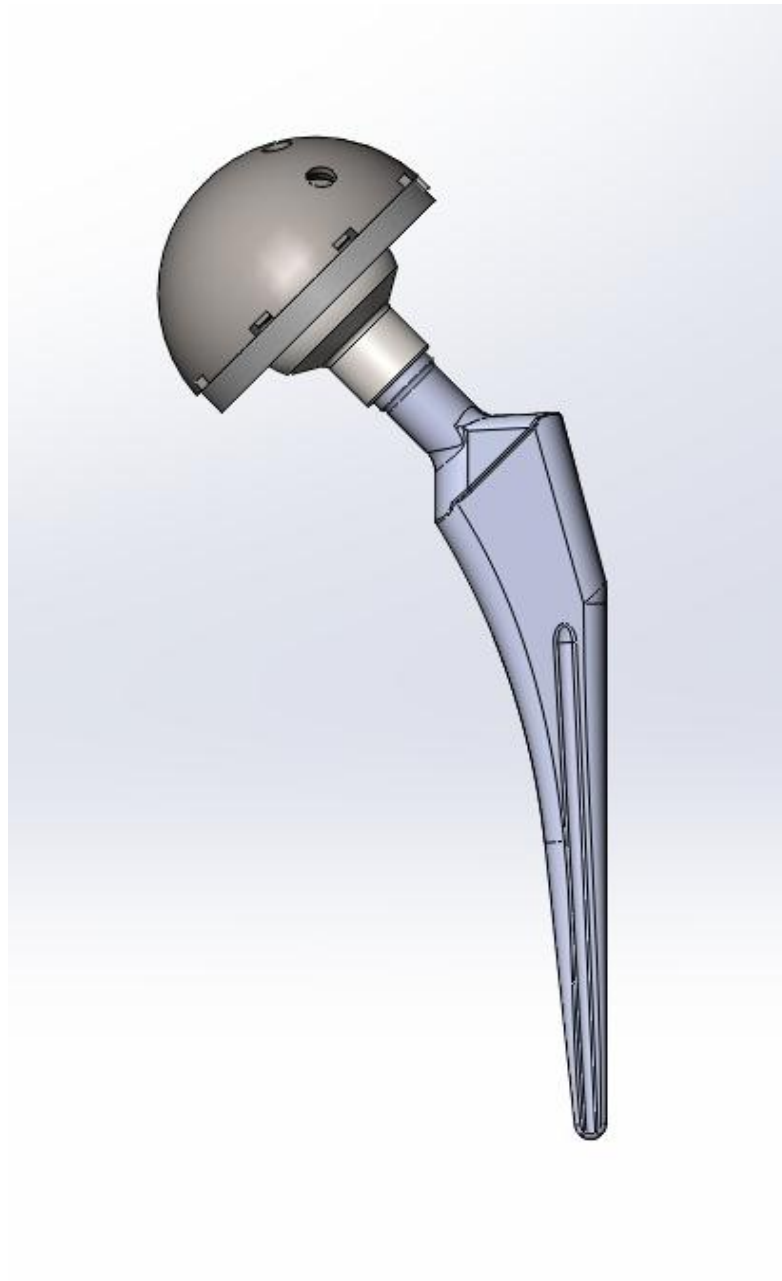


Рисунок 2.50- Зібраний ендопротез кульшовий суглоб

Спроектована збірка ендопротезу кулькового суглобу є прикладом використання SolidWorks як підсистеми комп'ютерного моделювання.

Спроектований ендопротезу кулькового суглобу є прикладом використання SolidWorks, як підсистеми комп'ютерного моделювання. Даний ендопротез побудований з урахуванням всіх світових тенденцій при розробці ендопротезів. Але даний протез має пройти ще безліч випробувань та тестувань.

3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕДОПРОТЕЗА КУЛЬШОВОГО СУГЛОБА В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ SOLIDWORKS

3.1 Виконання розрахунку запасу міцності

Проведемо розрахунок на запас міцності ніжки ендопротезу безцементної фіксації методом кінцевих елементів у системі SolidWorks.

Для цього розрахунку були побудовані 3D моделі типорозмірів ніжок з головками сферичними d32 з різними значеннями Offset (-3;+0; +6; +12), які тестувалися. Як зазначалось раніше в п.2.4, Offset -це найменша відстань між центральною поздовжньою віссю стегнової кістки та центром обертання кульшового суглоба, найбільш оптимальним значення Offset становить 40мм. Але під час оперативного втручання або в'язку за патологіями пацієнта лікар, під час операції, компенсує цей параметр за допомогою головки сферичної, де значення: -3;+0; +6; +12- означає, на скільки мм подовжується або скорочується значення Offset .

Для перевірки на стійкість до статичних навантажень застосували схему навантаження відповідно до ISO 7206-4-2005 [27], дивись рис. 3.1. Сутність схеми полягає в тому, що ендопротез закріплюють в робочому положенні (симулюють закріплення і положення протезу в кістці). На головку сферичну під кутом 25° (кут навантаження на імплантат відповідає куту навантаження на головки кульшового суглобу в повсякденному житті) відносно осі ніжки прикладають статичну силу, еквіваленту максимальному значенню, яке витримує кульшовий суглоб, рівне 4000 Н. На схемі навантаження ніжки, рис. 3.1, зеленими стрілками вказано місце закріплення протезу, а фіолетовими стрілками показано напрямок прикладання статичного навантаження .

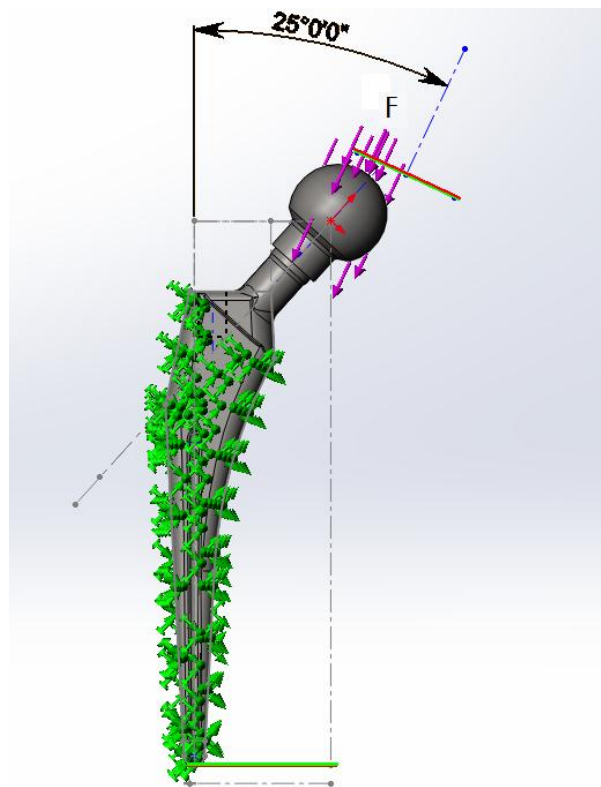


Рисунок 3.1 - Схема навантаження ніжки

Проведемо моделювання навантаження суглобу на прикладі ніжки №7.5 (тип Мюллера), яка характеризується найменшим типорозміром ніжки. Вона виготовлена з титану ВТ 6 із сферичною головкою Offset +6. Результатом виконаного дослідження є шкала еквівалентних напруг по критерію von Mises (Па) зображена на рис. 3.2, 3.3, та зміщення головки щодо вихідного положення, зображена на рис.3.4. З рис.3.2, 3.3.

Критерій максимальної напруги von Mises ґрунтується на теорії Mises-Hencky, також відомої як теорія енергії формозміни. Теорія стверджує, що пластичний матеріал починає пошкоджуватися в місцях, де напруга за von Mises стає рівною граничній нарузі. У більшості випадків, межа плинності використовується як гранична напруга. Однак, програма дозволяє використовувати граничне розтягування або задавати свою граничну напругу.

Таким чином, дослідження показали, що найбільш навантаженим елементом ніжки є перехід шийки ендопротезу до основи ніжки, максимальне

значення напруги становить $\approx 322\text{МПа}$. Варто зазначити, що значення напруги видно як за шкалою, так і за кольором.

Межа міцності титану ВТ 6 становить -1050МПа , виходячи з цього, коефіцієнт запасу міцності становить $- 3,262$. Зміщення головки згідно з рис. 3.4 склало $- 0,025\text{мм}$.

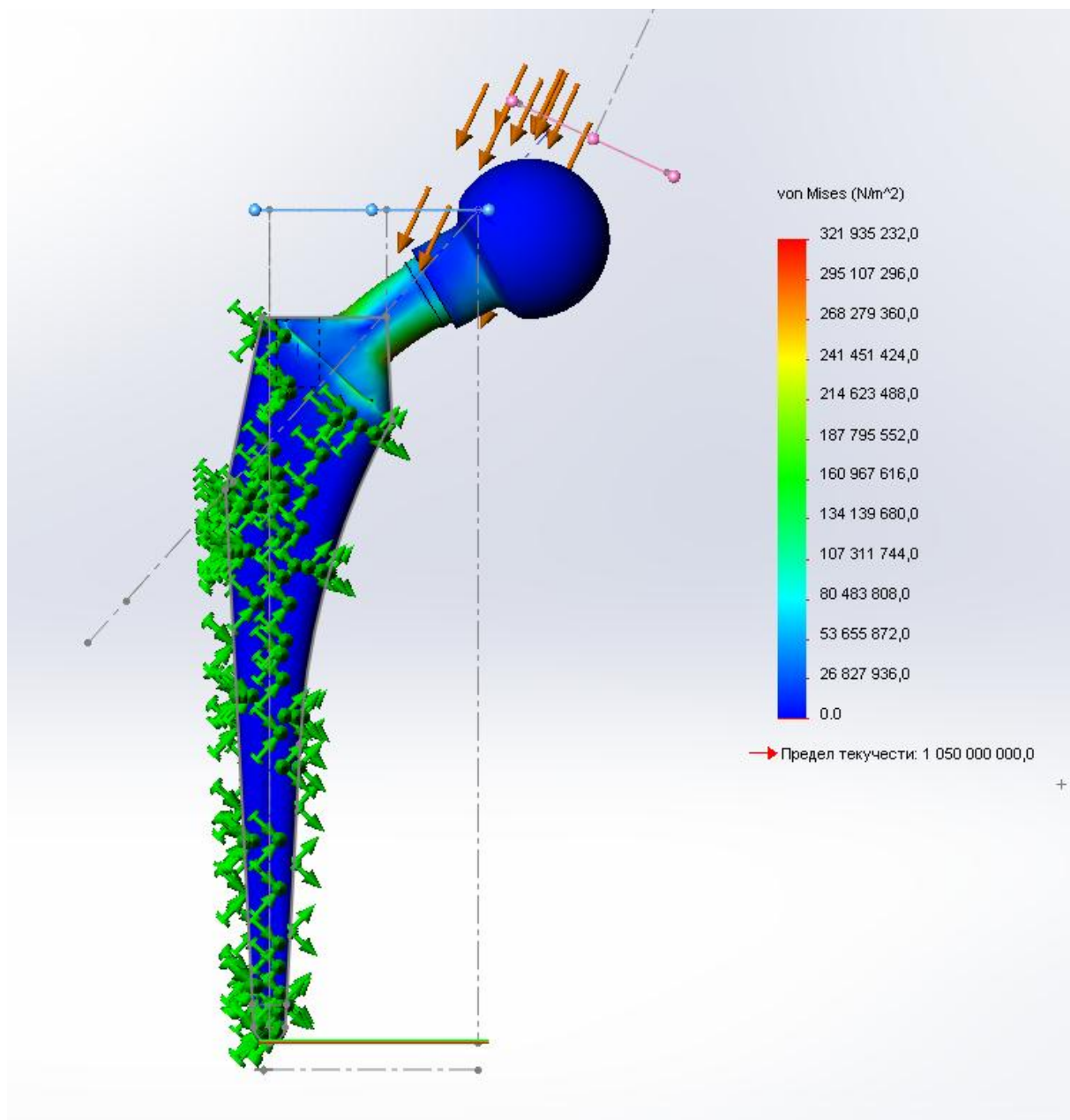


Рисунок 3.2 - Розподіл еквівалентних навантажень по критерію von Mises

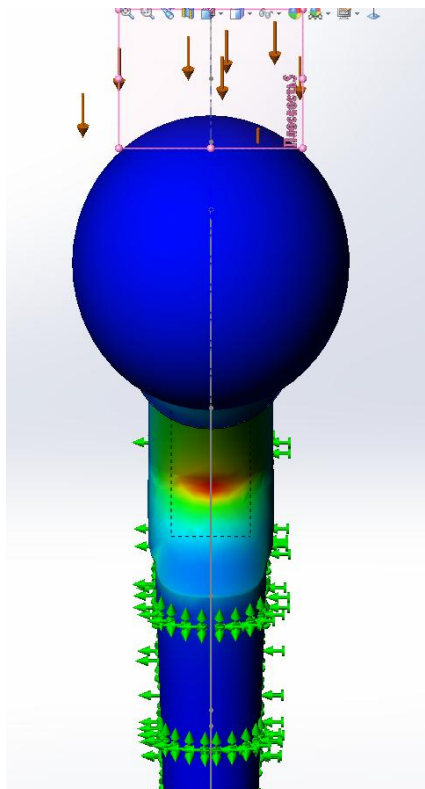


Рисунок 3.3 - Розподіл еквівалентних навантажень по критерію von Mises

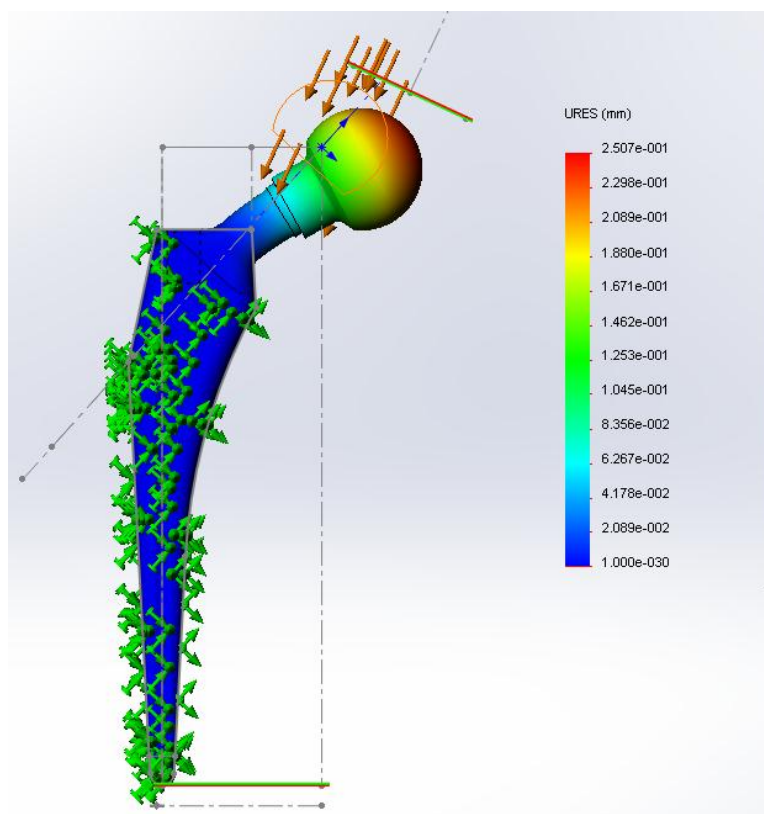


Рисунок 3.4 - Зміщення головки відносно вихідного положення

3.2 Порівняння міцності розроблювального ендопротезу з ендопротезами «ІТО- Мотор Січ» розробленими раніше.

Проаналізувавши дослід по запасу міцності, виконані в п.3.1, бачимо, що розроблений протез майже не має слабких місць, а його найбільш навантаженим елементом ніжки є перехід шийки ендопротезу до основи ніжки, однак навіть в цьому місці запас міцності має значення - 3,262.

Всі люди різні за антропометрією і один розмір ендопротезу всім не підходить. Тому для врахування цих особливостей інженерами розроблений цілий ряд типорозмірів ендопротезів, які дають можливість підібрати імплантат будь-якому пацієнту. Тому необхідно проводити випробування на міцність для всього ряду типорозмірів ендопротезів. В даній роботі провели випробування не для всього ряду, а для трьох типорозмірів: найменший, найбільший та середній.

Також для порівняння провели випробування ендопротезів «ІТО- Мотор Січ» з аналогічними технічними характеристиками і вимогами, які були розроблені раніше. Для реалізації даного випробування було розроблено проєкт ендопротезу кульшового суглобу даного виробника в цьому ж середовищі.

За підсумками проведених випробувань складено зведену таблицю 3.1 і побудовано графік залежності запасу міцності від типорозміру ендопротезів і головок сферичних, що використовуються до них, дивись рис. 3.5.

Таблица 3.1 – Запас міцності розроблювальної ніжки (тип Мюллера) і ніжки «ІТО-Мотор Січ»

Ніжка (Тип Мюллера)	Запас міцності	Ніжка «ІТО-Мотор Січ»	Запас міцності
Ніжка №7.5 з головкой (-3)	4,080	ІТО-Мотор Січ №1 з головкой (-3)	2,12
Ніжка №7.5 з головкою (+0)	3,738	ІТО-Мотор Січ №1 з головкой (+0)	1,674
Ніжка №7.5 з головкой (+6)	3,262	ІТО-Мотор Січ №1 з головкой (+6)	1,260
Ніжка №7.5 з головкой (+12)	2,840	ІТО-Мотор Січ №1 з головкой (+12)	1,028
Ніжка №12.5 з головкой (-3)	4,324	ІТО-Мотор Січ №5 з головкой (-3)	2,820
Ніжка №12.5 з головкой (+0)	3,996	ІТО-Мотор Січ №5 з головкой (+0)	2,476
Ніжка №12.5 з головкой (+6)	3,432	ІТО-Мотор Січ №5 з головкой (+6)	2,298
Ніжка №12.5 з головкой (+12)	3,018	ІТО-Мотор Січ №5 з головкой (+12)	1,842
Ніжка №22.5 з головкой (-3)	4,542	ІТО-Мотор Січ №9 з головкой (-3)	2,318
Ніжка №22.5 з головкой (+0)	4,124	ІТО-Мотор Січ №9 з головкой (+0)	1,978
Ніжка №22.5 з головкой (+6)	3,658	ІТО-Мотор Січ №9 з головкой (+6)	1,732
Ніжка №22.5 з головкой (+12)	3,128	ІТО-Мотор Січ №9 з головкой (+12)	1,594

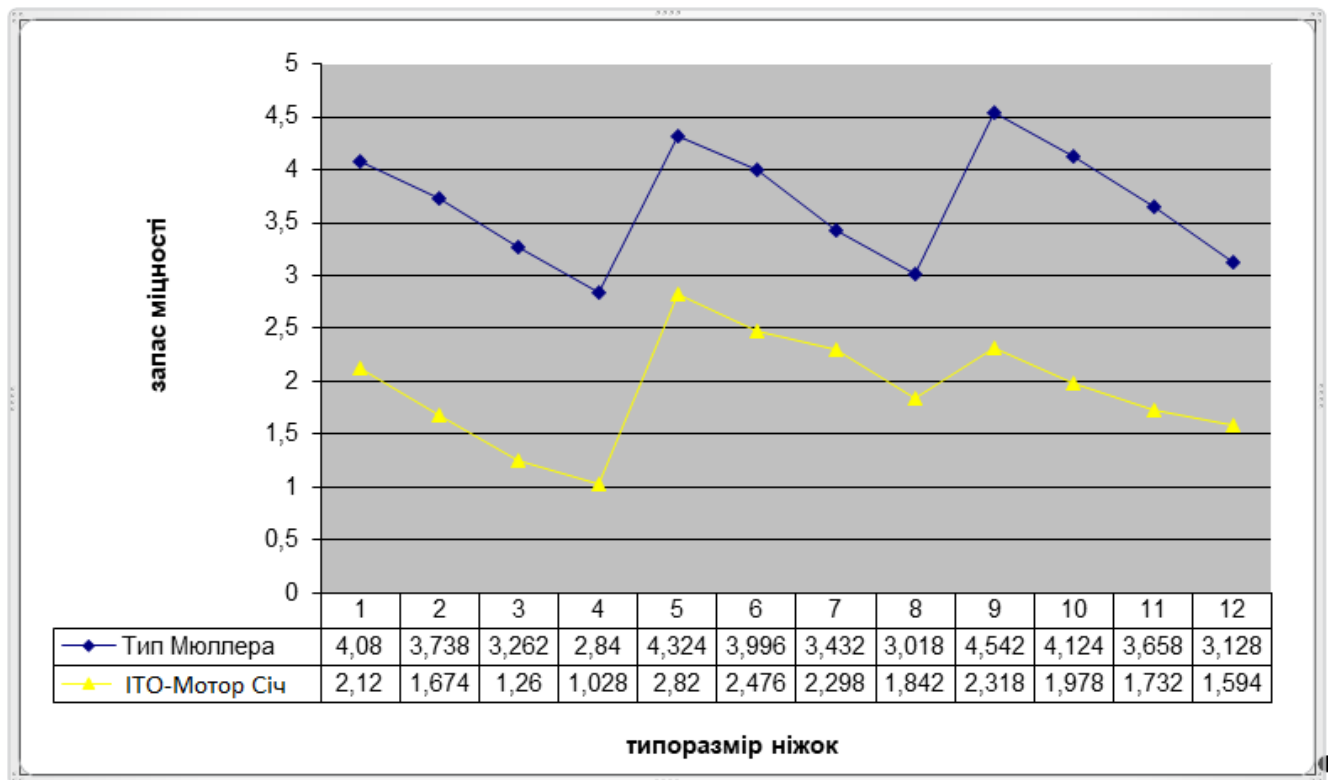


Рисунок 3.5 - Графік залежності запасу міцності від типорозміру ендопротезів і сферичних головок, що застосовуються до них

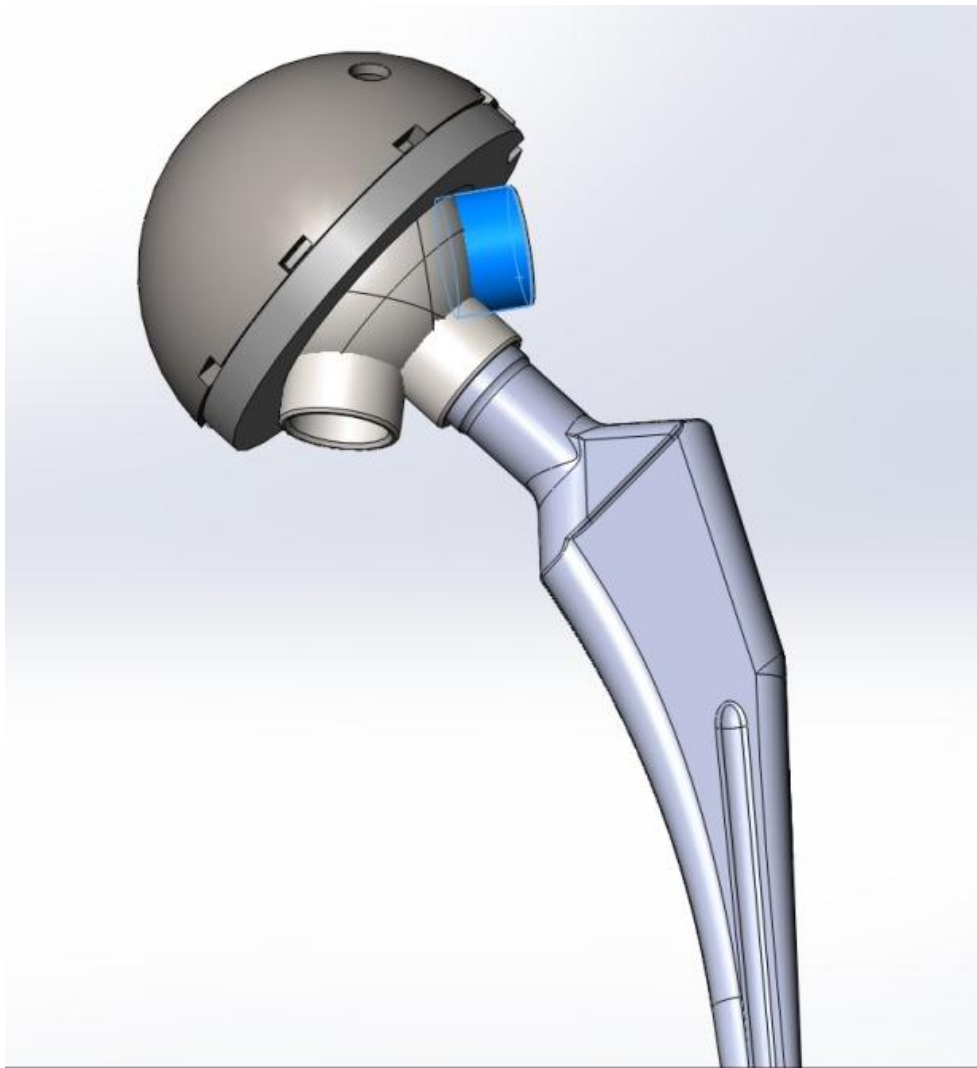
Результати розрахунків показали, що ніжки за типом Мюллера (синя крива на графіку) мають достатній запас міцності і значно перевершують запас міцності ендопротезів «ІТО-Мотор Січ» (жовта крива на графіку).

3.3 Перевірка діапазону кутових рухів між стегновим і вертлюжним компонентами.

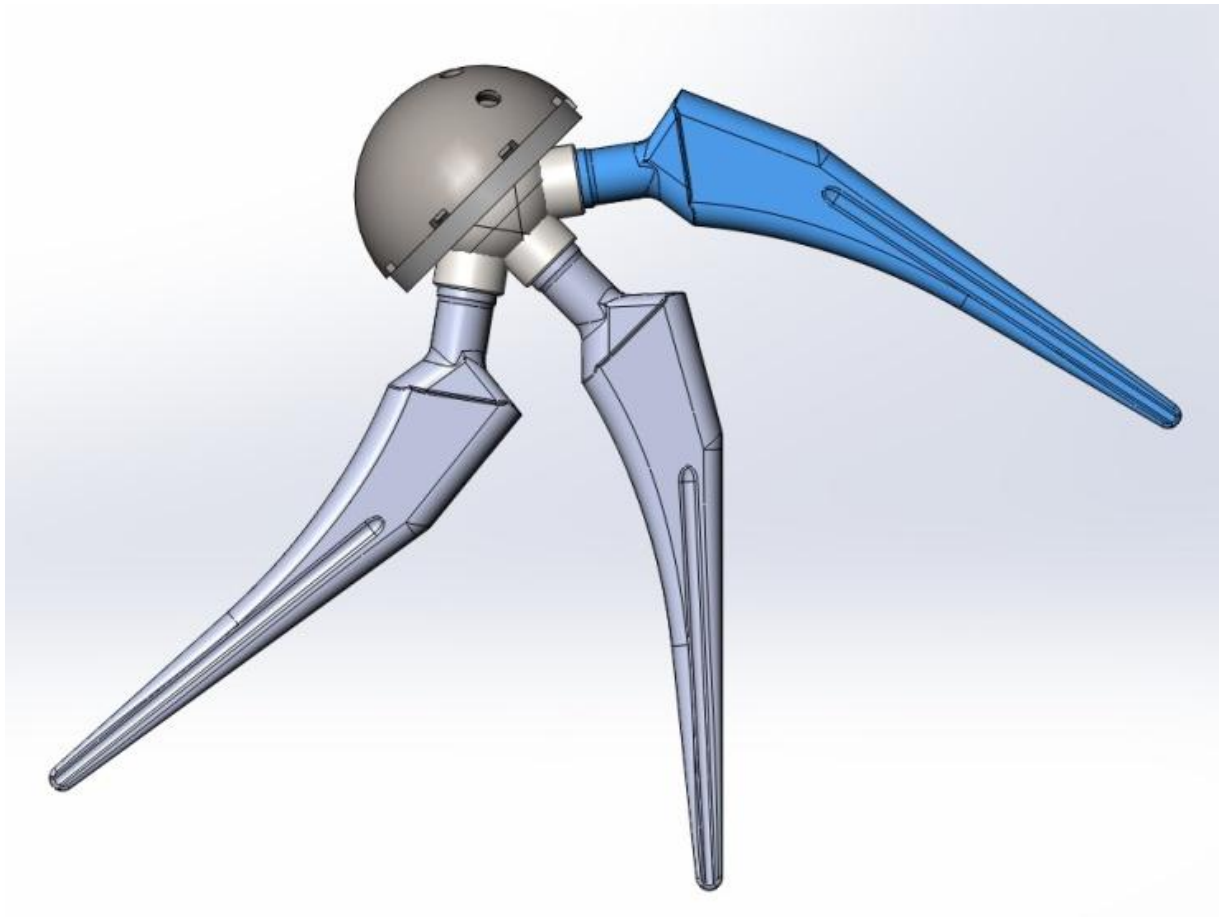
Іще одним важливим критерієм якості кульшового суглобу є максимально доступний діапазон кутових рухів, можливість виконання перевірки якого можна реалізувати засобами середовища SolidWorks.

Для виконання перевірки діапазону кутових рухів між стегновим і вертлюжним компонентом спочатку розробили окремо всі складові частини: ніжку, головку (стегновий компонент), вкладку та чашку півсферичну (вертлужний компонент) та зібрали їх в одну збірку, дивись пункти 2.5-2.9.

Далі, для більшої візуалізації та можливості поміряти кути, додаємо ще дві ніжки та дві головки сферичних та додаємо їм необхідних взаємозв'язків, дивись рисунки 3.6 и 3.7.



Рисунки 3.6 - Кульшовий суглоб з двома додатковими головками



Рисунки 3.7 - Кульшовий суглоб з двома додатковими ніжками

Виконаємо перевірку діапазону кутових рухів між стегновим і вертлюжним компонентами. Метод перевірки взятий згідно ISO 14242-1-2012[28] . Мінімальний діапазон кутових рухів між стегновим і вертлюжним компонентами, згідно ISO 14242-1-2012, повинен мати наступні значення:

- 60° при відведенні - приведенні;
- 100° при згинанні-розгинанні;
- 90° при ротації всередину – назовні ;

В результаті моделювання свободи рухів кульшового суглобу в фронтальній, сагітальній і горизонтальній площинах отримали:

- кут відведення-приведення в фронтальній площині становить 107°52' (рисунок 3.8);
- кут згинання-розгинання в сагітальній площині становить 109°18'

(рисунок 3.9);

- кут ротації всередину - назовні в горизонтальній площині становить $169^{\circ}24'$ (рисунок 3.10).

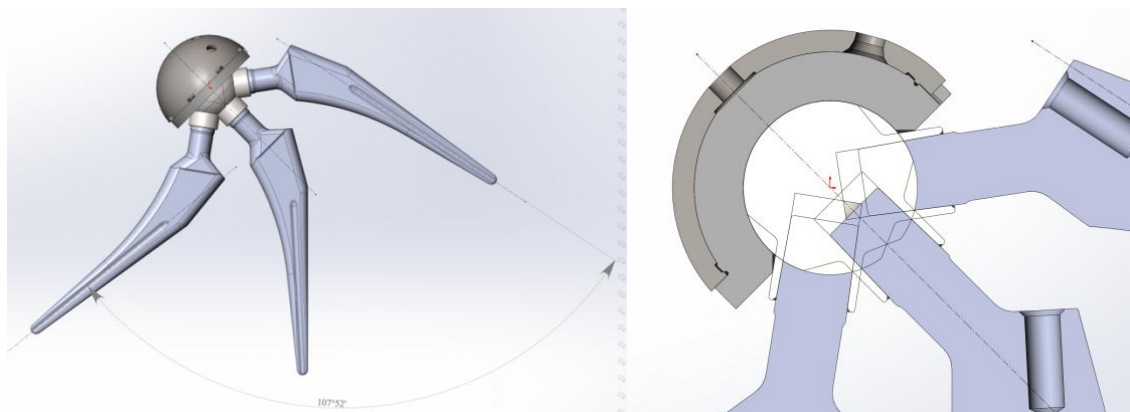


Рисунок 3.8 - Кут відведення-приведення в фронтальній площині

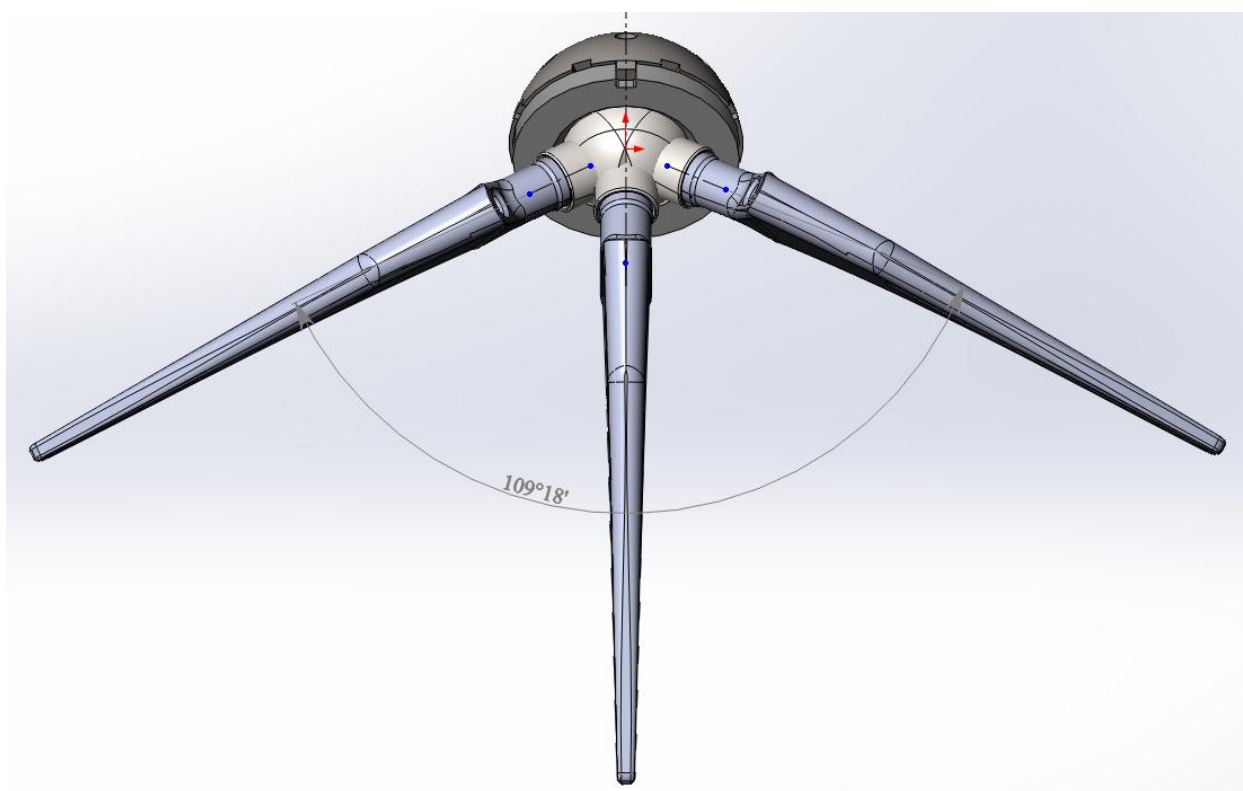


Рисунок 3.9 - Кут згинання-розгинання в сагітальній площині

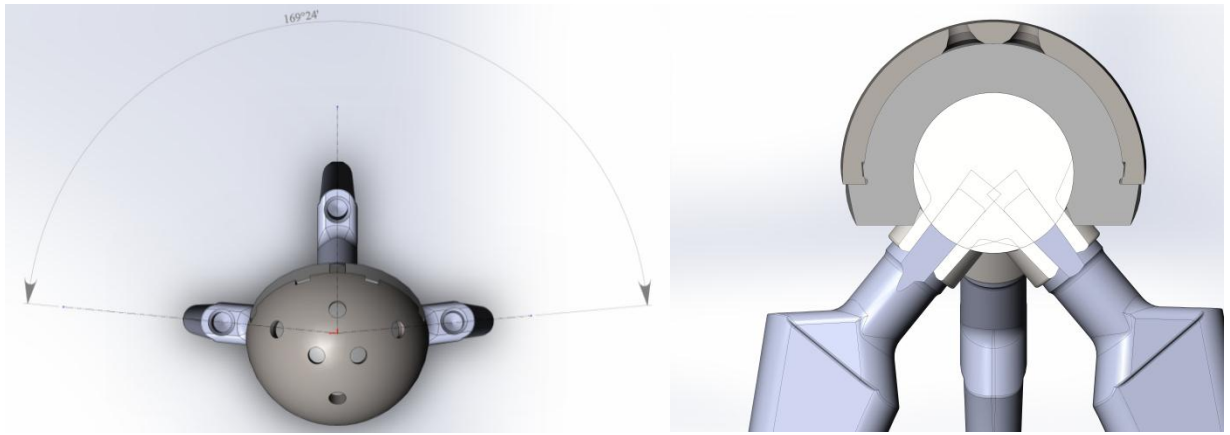


Рисунок 3.10 - Кут ротації всередину - назовні в горизонтальній площині

По результатам моделювання видно, що розроблювальний ендопротез кульшового суглоба повністю забезпечує необхідний обсяг рухів в фронтальній, сагітальній і горизонтальній площинах.

3.4 Визначення масових характеристик деталей

SolidWorks має безліч корисних модулів для проєктування та розробки виробів медичного призначення. Один із таких корисних модулів є визначення масових характеристик деталей. Цей модуль дає можливість визначити масу будь якого виробу тільки по 3D-моделі. Це дуже корисно, адже при розробці ендопротезів маса має не менш важливе значення, на ряду з міцністю та корозійною стійкістю матеріалів. Для прикладу візьмемо ніжку, спроектовану по п.2.5, та заміряємо її масу. Для цього ніжці треба присвоїти матеріал, в нас це титан BT-6, дивись рисунок 3.11.

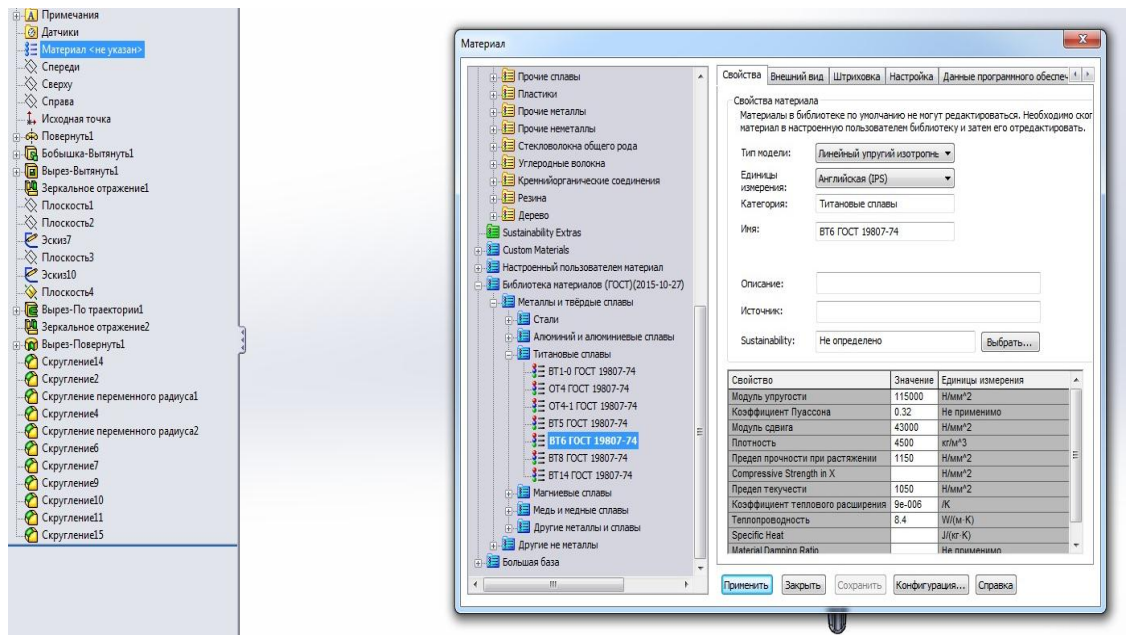


Рисунок 3.11 - Присвоення матеріалу ніжці

Далі переходимо до розділу «Аналізувати» на панелі інструментів та натискаємо кнопку «Масові характеристики», результати аналізу представлені на рисунку 3.12.

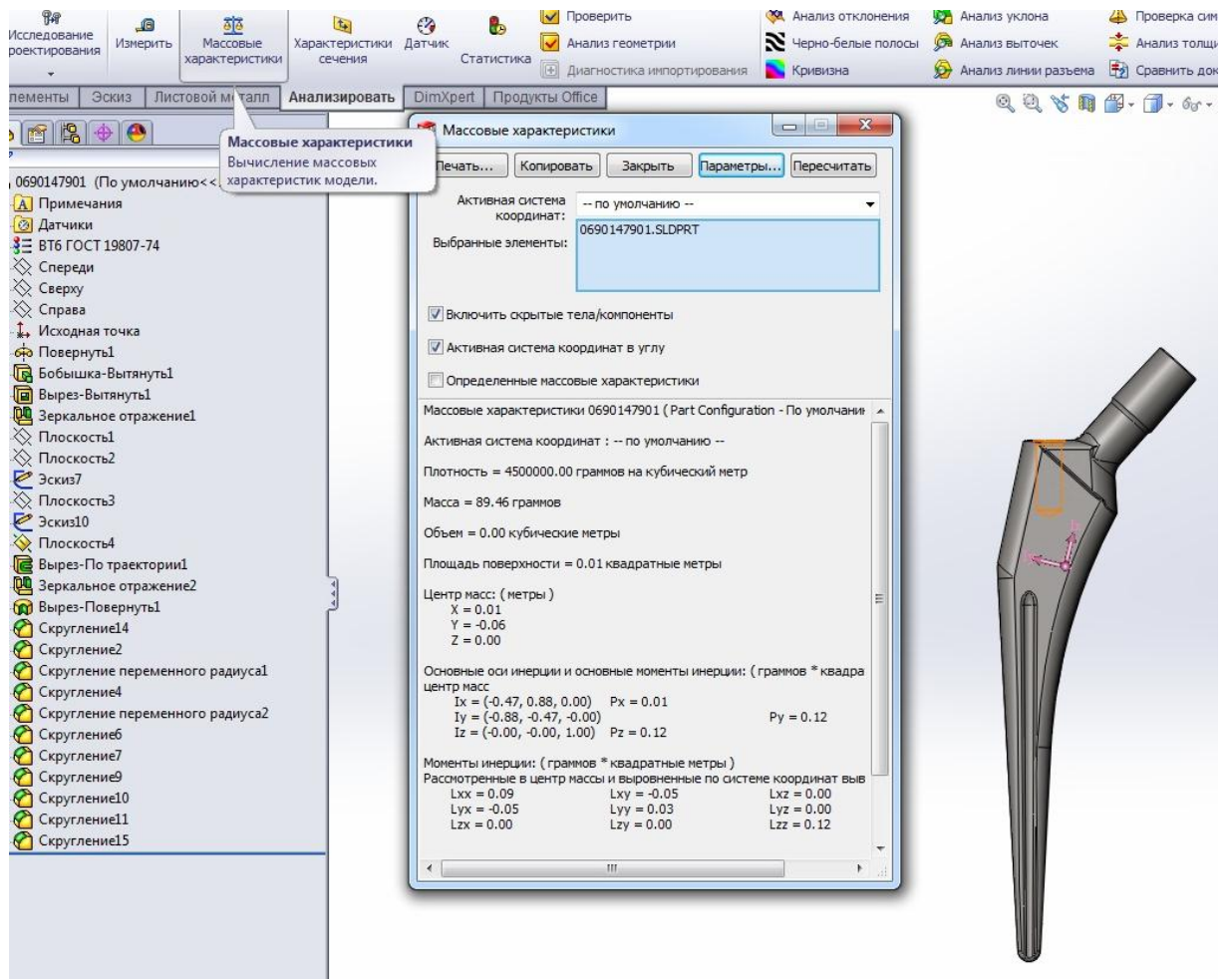


Рисунок 3.12- Масові характеристики ніжки

По результатам аналізу бачимо, що вага розробленої ніжки встановить 89,46 грам. Можливо змінити титан на будь-який матеріал із бази даних та провести аналіз знову. Для прикладу вага даної ніжки з нержавіючої сталі становить 156 грам.

3.5 PhotoView 360

Ще один корисний модуль SolidWorks, який надає можливості надати будь-якій 3D-моделі натурального вигляду, за допомогою корекції кольорів, фону, освітлення тощо. Тобто- це фото редактор вбудований в SolidWorks.

Задаємо ніжці наступні параметри: фон стандартний, освітлення стандартне, зовнішній вигляд «титан з насічками» та рендеремо ніжку, результати дивимося на рисунку 3.13.



Рисунок 3.13- Відрендерена ніжка

Змінено в ніжці деякі параметри: фон «3 точки,тьмяний», освітлення стандартне для вибраного фону, зовнішній вигляд «титан з насічками» та рендеремо ніжку, результати дивимося на рисунку 3.14



Рисунок 3.14- Відрендерена ніжка

Як бачимо по рисункам 3.13 та 3.14, тільки за рахунок зміни фону, відображення однієї і тієї моделі змінилось. І це тільки вершина айсбергу можливостей даного модуля. Ці можливості можна використати при розробці рекламної продукції по даній тематиці або для розробки інструкцій по експлуатації без залучення фотографів та реальних деталей.

Таким чином, середовище SolidWorks дозволяє виконати багатогранний аналіз об'єкту, що розробляється, а також виконати його моделювання за різними технічними характеристиками і вимогами.

ВИСНОВКИ

Метою даної дипломної роботи була розробка ендопротезу кульшового суглобу. Для цього проведено аналіз ряду існуючих систем комп'ютерного моделювання і обрано в якості підсистеми моделювання середовище SolidWorks.

У процесі написання магістерської роботи було вирішено такі завдання:

- за даними науково-методичної літератури розглянуто різні системи комп'ютерного моделювання, їх основні риси, переваги та недоліки;
- обрано найбільш підходящу підсистеми комп'ютерного моделювання для розробки та проєктування ендопротезу.
- показано принципи використання обраної системи на прикладі розробки ендопротезу кульшового суглобу;
- показано можливості використання обраної системи на прикладі моделювання роботи ендопротезу кульшового суглобу в умовах експлуатації.

Перший розділ магістерської роботи являє собою аналітичний огляд різноманітних систем комп'ютерного моделювання та вибір оптимальної системи для розробки ендопротезу кульшового суглоба.

У другому розділі представлена обрана підсистема комп'ютерного моделювання - SolidWorks. Описані його функції можливості, та безпосередньо представлена розробка ендопротезу кульшового суглобу за допомогою SolidWorks.

У третьому розділі представлено можливості SolidWorks при моделюванні роботи ендопротезу кульшового суглобу ніжки в умовах експлуатації, оцінка запасу міцності методом кінцевих елементів.

Таким чином, у ході роботи було реалізовано всі поставлені завдання, заявлену мету досягнуто.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Human endoprosthesis design using finite element metod and rapid prototyping/ Kamola Jagosz, Krzysztof Lalik, 2013.
2. Алгоритм розробки показань та протипоказань до ендопротезування кульшового суглоба / А. Е. Лоскутов, А. Е. Олейник, М. Л. Головаха //Вісник ортопедії, травматології та протезування. — 2004. — № 3. — С. 8–12
3. Двостороннє тотальне ендопротезування кульшових суглобів: Методичні рекомендації / О.Є. Лоскутов, Д.А. Синегубов, М. Л. Головаха, О.Є. Олійник. — К.: Дніпропетровська державна медична академія МОЗ України, 2005. — 31с.
4. Офіційний сайт Fusion-360. URL:https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1_YEAR&tab=subscription
5. Офіційний сайт Siemens Digital Industries Software. URL: <https://www.plm.automations.com/n.siem>
6. Офіційний сайт autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/>
7. Офіційний сайт SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com>
8. Офіційний сайт Siemens NX. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/>
- 9 Офіційний сайт CATIA URL: <https://www.3ds.com/products-services/catia/>
- 10 Офіційний сайт Autodesk Inventor URL:[https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?term=1-
YEAR&tab=subscription](https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?term=1_YEAR&tab=subscription)
11. Офіційний сайт PTC. URL: <https://www.ptc.com>
12. Офіційний сайт Rhinoceros URL: <https://www.rhino3d.com/>
13. Офіційний сайт BricsCAD URL: <https://bricscad-ukraine.com.ua/>
14. Офіційний сайт Onshape URL: <https://www.onshape.com/en/>
15. Офіційний сайт FreeCAD URL: <https://www.freecad.org/>
16. Постачальник ліцензій та програмного забезпечення. URL: <https://www.softkey.ua/>

17. Постачальник ліцензій та програмного забезпечення. URL: <https://3ddevice.com.ua/product/%D0%BF%D0%BE-solid-edge-shining-3d-edition-software/>.

18. - Вініченко Д.І., Вибір оптимальної CAD-системи для розробки і проектування ендопротезів / Д.І. Вініченко, М.Ю. Тягунова, Т.В. Голуб // Тиждень науки-2023. Факультет комп'ютерних наук і технологій : наук.-техн. конф., 24-28 квітня 2023 р. : тези доп. – / Редкол. : Вадим ШАЛОМЄСВ (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. – С. 65-68 – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – назва з тит. екрана.

19. Комп'ютерна графіка SolidWorks / М.М. Козяр, Ю.В. Фешук, О.В. Парфенюк// «ОЛДІ-ПЛЮС»,м. Херсон-2018- с.15-30.

20. Чашка цементної фіксації Zimmer URL: <https://stemcup.ch/wAssets/img/slides/weblication/wThumbnails/6179b2cd-924f645a@01l.jpg>.

21. Ніжка цементної фіксації CPT, фірма Zimmer URL: <https://stemcup.ch/wAssets/img/slides/weblication/wThumbnails/6179b2cd-924f645a@01l.jpg>.

22. Чашка фірми DePuy URL: <https://www.zimmerbiomet.eu/en/products>

23. Ніжка Corail (фірма DePuy) URL: https://studwood.net/1634334/meditsina/bestsementnye_chashki

24. Головка сферична з кобальт-хрому-молібдену URL: <https://guide.medicalexpo.com/choosing-the-right-hip-prosthesis/>

25. Головка сферична з кераміки URL: <https://www.k-implant.de/en/products/hip/femoral-heads/femoral-heads-cocrmo/?ntid=2&land=%E4%B8%AD%E5%9C%8B/%E4%B8%AD%E5%9B%BD>.

26. Чашку півсферична з пористим титановим покриттям <https://www.beznoska.cz/pro-odborniky/produkty/aloplastika/kycle/revizni-implantaty?view=article&id=219&catid=10>.

27. ISO 7206-4-2010 «Implants for surgery - Partial and total hip joint prostheses- Part 4: Determination of endurance properties and performance of stemmed femoral components » - 3-5 с.

28. ISO 14242-1-2012 « Implants for surgery - Wear of total hip-joint prostheses
- Part 1: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and
corresponding environmental conditions for test » - 2-7 с.